



D-6719

ESCUELA SUPERIOR
POLITECNICA DEL LITORAL
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA

"PROTECCION SUPERFICIAL DURANTE EL
TRATAMIENTO TERMICO DE ACEROS"

Tesis de Grado
Previa a la obtención del Título de
INGENIERO MECANICO

presentada por

RICARDO ERNESTO BRAVO MUÑOZ

Guayaquil-Ecuador

1983

AGRADECIMIENTO

A la Escuela Superior
Politécnica del Litoral

Al Ing. IGNACIO WIESNER, F.,
Director de Tesis, por su
ayuda a la realización del
presente trabajo.

DEDICATORIA

A mis queridos Padres:

Dr. Ricardo Bravo G.

Dra. Estela Muñoz de Bravo

A mis Hermanos:

Lcdo. Jorge Bravo M.

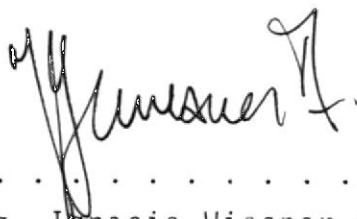
Dra. Inés Bravo M.

Sra. Aída de Bland.

Sr. Ariel Bravo M.

A mi Novia:

Srta. Gina Altamirano V.



.....
Ing. Ignacio Wiesner F.,

DIRECTOR DE TESIS

DECLARACION EXPRESA

"La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestos en esta Tesis me corresponden exclusivamente; y, el patrimonio intelectual de la misma, a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL".

(Reglamento de Exámenes y Títulos Profesionales de la ESPOL).

Ricardo Bravo Muñoz

RICARDO E. BRAVO MUÑOZ

R E S U M E N

La presente investigación está encaminada a introducir en nuestro País, la técnica de protección superficial del acero en procesos de tratamientos térmicos, mediante atmósfera protectora, con lo cual se logra que las piezas salgan del horno completamente limpias, ésto es sin la capa de óxidos de hierro que se forma en atmósferas comunes, y manteniendo además las propiedades mecánicas en la superficie.

Para lo cual, previamente se hace circular una corriente de amoníaco disociado en la cámara del horno, luego, se introducen las piezas, manteniéndose la atmósfera generada durante el tiempo que dure el tratamiento, lográndose mediante este proceso eliminar los problemas que trae el efectuar el ciclo de calentamiento en una atmósfera común.

La zona descarburizada que se forma en los tratamientos térmicos sin atmósfera protectora, presenta una microestructura completamente diferente y una dureza muy baja en relación con el metal no afectado.

I N D I C E G E N E R A L

	Pág.
RESUMEN.	VI
INDICE GENERAL	VII
INDICE DE FIGURAS.	X
INDICE DE TABLAS.	XV
ABREVIATURAS.	XVII
INTRODUCCION	19
I FUNDAMENTOS TEORICOS	22
1.1 Generalidades.	22
1.2 Relaciones Químicas entre Gases y Metal.	25
1.2.1 El Equilibrio Químico.	34
1.2.2 Oxidación de metales a altas temperatu- ras.	49
1.2.3 Difusión del carbón disuelto en el metal.	56
1.2.4 Determinación del grado de descarburí- zación en aceros	70
1.3 Atmósferas protectoras usadas en tratamientos térmicos.	77

VIII

Pág.

1.4	Protección mediante Atmósfera de NH_3 dissociado.	81
1.4.1	Acero utilizado.	82
1.4.2	Aplicaciones.	83
1.4.3	Ventajas y Desventajas.	84
1.5	Análisis de la Composición de la Atmósfera en Tratamientos Térmicos.	85
II	TRABAJO EXPERIMENTAL.	91
2.1	Técnica Operativa	91
2.1.1	Horno de Tratamiento.	94
2.1.2	Generador de Atmósfera.	96
2.1.3	Puesta en marcha del equipo	100
2.2	Control de Atmósfera.	101
2.2.1	Porcentaje de Disociación	103
2.2.2	Control de Temperatura.	104
2.2.3	Control de Presión.	105
2.3	Experiencias en acero AISI 01 con diferentes atmósferas.	108
2.4	Ensayos de Control.	109
2.4.1	Dureza Vs tiempo de austenización a temperatura constante	109
2.4.2	Profundidad de la descarburización Vs tiempo de austenización a temperatura constante.	110

2.4.3 Variación de Peso Vs tiempo de austenización a temperatura constante.	111
2.4.4 Metalografía.	111
III DISCUSION DE RESULTADOS	144
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	151
APENDICES.	154
DIAGRAMAS, TABLAS Y ANEXOS	154
BIBLIOGRAFIA	166

I N D I C E D E F I G U R A S

Nº	Pág.
1.1	Oxidación de hierro por dióxido de Carbono. 39
1.2	Constantes de equilibrio para la reacción $CO_2 + C \rightleftharpoons 2 CO$ 41
1.3	Reducción de Oxido de Hierro por Hidrógeno. 42
1.4	Equilibrio para el Sistema $C_{Fe} + H_2O \rightleftharpoons CO + H_2$. . . 43
1.5	Constantes de equilibrio para la reacción $Fe_3C + CO_2 \rightleftharpoons 3Fe + 2CO$ 45
1.6	Relación entre P^2B/PA y PB/PA para diferentes valores de $PA + PB$ 46
1.7	Relación entre el porcentaje de constituyente B en una mezcla de gases a una atmósfera de pre - sión total y $K = PB/PA$ para diferentes valores de $PA + PB$ 48
1.8	Relación entre el porcentaje de constituyente B en una mezcla de gases a 1 atmósfera de presión total y $K = P^2B/PA$ para diferentes valores de $PA + PB$ 49
1.9	Relaciones de equilibrio entre Fe, H_2 y H_2O y entre Fe, CO y CO_2 a temperaturas de tratamientos térmicos. 52

Nº	Pág.
1.10 Esquemas de los mecanismos de difusión.	56
1.11 Energía de activación para difusión.	58
1.12 Esquematzación del gradiente de concentración y autodifusión a) $t = t_0$; b) $t_0 < t < t_\infty$; c) $t = t_\infty$	59
1.13 Difusión a lo largo de una dislocación de cuña. .	60
1.14 Condición de un acero descarburizado.	87
2.1 Horno de tratamiento marca LINDBERG, modelo TREET- ALL, rango de temperatura 0-1100°C.	95
2.2 Control Automático de temperatura marca HONEYWELL.	97
2.3 Generador de atmósfera Atmo Gen, Modelo Lam 100 Marca LINDBERG.	98
2.4 Controles de presión del sistema.	107
2.5 Dureza a una distancia de 0.050 mm. de la su- perficie Vs tiempo de austenización en diferen- tes atmósferas. Material acero AISI 01. Tempe- ratura de Tratamiento 850°C.	115
2.6 Dureza a una distancia de 0.100 mm. de la super- ficie Vs tiempo de austenización en diferentes atmósferas. Material acero AISI 01, temperatura de tratamiento 850°C.	116
2.7 Dureza a una distancia de 0.150 mm. de la super- ficie Vs tiempo de austenización en diferentes atmósferas. Material Acero AISI 01. Temperatura	

Nº	Pág.
de Tratamiento 850°C.	117
2.8 Dureza a una distancia de 0.200 mm. de la superficie Vs tiempo de austenización en diferentes atmósferas. Material Acero AISI 01. Temperatura de Tratamiento 850°C.	118
2.9 Dureza a una distancia de 0.250 mm. de la superficie Vs tiempo de austenización en diferentes atmósferas. Material ACERO AISI 01. Temperatura de Tratamiento 850°C.	119
2.10 Dureza a una distancia de 0.300 mm. de la superficie Vs tiempo de austenización en diferentes atmósferas. Material Acero AISI 01. Temperatura de Tratamiento 850°C.	120
2.11 Dureza a una distancia de 0.350 mm. de la superficie Vs tiempo de austenización en diferentes atmósferas. Material Acero AISI 01. Temperatura de Tratamiento 850°C.	121
2.12 Dureza a una distancia de 0.400 mm. de la superficie Vs tiempo de austenización en diferentes atmósferas. Material Acero AISI 01. Temperatura de Tratamiento 850°C.	122
2.13 Profundidad de la descarburización Vs tiempo de austenización en diferentes atmósferas. Material	

XIII

Nº	Pág.
Acero AISI 01. Temperatura 850°C.	124
2.14 Variación de peso Vs tiempo de austenización en diferentes atmósferas. Material Acero AISI 01. Temperatura 850°C.	128
2.15 Gráfica comparativa entre la profundidad de la descarburización teórica y experimental en atmósferas descarburizantes del acero AISI 01. Temperatura de Tratamiento 850°C.	130
2.16 Gráfica comparativa entre la variación de peso teórica y experimental en atmósferas descarburizantes del acero AISI 01. Temperatura 850°C. . .	132
2.17 Probeta correspondiente a un acero recocido AISI 01 sin tratamiento.	134
2.18 Zona exterior de un acero AISI 01, tratado a 850°C en una atmósfera de aire normal. Tiempo de austenización 20 min.	135
2.19 Zona exterior de un acero AISI 01, tratado a 850°C en una atmósfera de aire normal. Tiempo de austenización 100 min.	136
2.20 Zona exterior de un acero AISI 01, tratado a 850°C en una atmósfera de aire normal. Tiempo de austenización 180 min.	137
2.21 Zona exterior de un acero AISI 01, tratado a 850°C en una atmósfera de CO ₂ . Tiempo de aus-	

Nº	Pág.
tenización 20 min.	138
2.22 Zona exterior de un acero AISI 01, tratado a 850°C en una atmósfera de CO ₂ . Tiempo de austenización 100 min.	139
2.23 Zona exterior de un acero AISI 01, tratado a 850°C en una atmósfera de CO ₂ . Tiempo de austenización 180 min.	140
2.24 Zona exterior de un acero AISI 01, tratado a 850°C en una atmósfera de NH ₃ disociado. Tiempo de austenización 20 min.	141
2.25 Zona exterior de un acero AISI 01, tratado a 850°C en una atmósfera de NH ₃ , disociado. Tiempo de austenización 100 min.	142
2.26 Zona exterior de un acero AISI 01, tratado a 850°C en una atmósfera de NH ₃ disociado. Tiempo de austenización 180 min.	143

I N D I C E D E T A B L A S

Nº	Pág.
1.1	Constantes de equilibrio para las siguientes reacciones:
1)	$\text{Fe} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{FeO} + \text{H}_2$
2)	$\text{Fe} + \text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{FeO} + \text{CO}$
3)	$\text{C} + \text{CO}_2 \rightleftharpoons 2\text{CO}$
4)	$\text{CH}_4 \rightleftharpoons \text{C} + 2\text{H}_2$ 44
1.2	Parámetros de difusión de algunas impurezas en el hierro. 65
1.3	Constantes de difusión. 68
1.4	Cálculo teórico de la descarburización del acero AISI 01 a una temperatura de 850°C. 90
2.1	Composición Química del acero recocido AISI 01. . 94
2.2	Mediciones de durezas en un acero AISI 01 tratado en una atmósfera de aire normal, a una temperatura de 850°C. 112
2.3	Mediciones de durezas en un acero AISI 01 tratado en una atmósfera de CO ₂ , a una temperatura de 850°C. 113

Nº	Pág.
2.4 Mediciones de durezas en un acero AISI 01 tratado en una atmósfera de amoniaco disociado, a una temperatura de 850°C.	114
2.5 Profundidad de la descarburización del acero AISI 01 tratado en diferentes atmósferas, a una temperatura de 850°C.	123
2.6 Variación de peso en un acero AISI 01 tratado a una atmósfera de aire normal, a una temperatura de 850°C.	125
2.7 Variación de peso en un acero AISI 01 tratado en una atmósfera de CO ₂ , a una temperatura de 850°C.	126
2.8 Variación de peso en un acero AISI 01 tratado en una atmósfera de amoniaco disociado, a una temperatura de 850°C.	127
2.9 Tabla comparativa entre los resultados teóricos y experimentales de la profundidad de la descarburización en el acero AISI 01 tratado en atmósferas descarburizantes, a una temperatura de 850°C.	129
2.10 Tabla comparativa entre los resultados teóricos y experimentales de la variación de peso en el acero AISI 01 tratado en atmósferas descarburizantes a una temperatura de 850°C.	131

A B R E V I A T U R A S

AISI	American Iron and Steel Institute
°C	Grados Centígrados
cm	Centímetro
cm ² /seg	Centímetros cuadrados por segundo
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
H ₂ O	Vapor de agua
H ₂	Hidrógeno Molecular
Fe	Hierro
Fe _α	Hierro Alfa
Fe _γ	Hierro Gamma
Kg/mm ²	Kilogramos por milímetros cuadrados
m ³ /h	Metros cúbicos por hora
NH ₃	Amoniaco
P	Presión
Fig.	Figura
Rc	Rockwell C.
K	Constante de Equilibrio
bcc	Cúbico de cuerpo centrado
ccc	Cúbico de cara centrada
(C)	Carbono disuelto en austenita

FeO	Oxido de Hierro
O ₂	Oxígeno molecular
Fe ₃ C	Carburo de Hierro
gr	Gramo
°K	Grados Kelvin

INTRODUCCION

En la localidad existen escasas empresas dedicadas a realizar actividades relacionadas con tratamientos térmicos de piezas de aceros, más en las que existen, se ha detectado que es común que las piezas salgan del horno completamente oxidadas en su superficie, y que al entrar en servicio al cabo de muy pocas horas sufren un desgaste prematuro, o no cumplen su función a cabalidad dado que la superficie es más suave que el resto de la sección, lo cual se explica por efecto de la descarburización sufrida por el acero, que casi siempre suele acompañar a la oxidación.

Los técnicos que realizan los tratamientos térmicos han tenido problemas para evitar estos efectos superficiales y mucho menos no logran explicarlos dado que el contexto de este conocimiento cae dentro de planos científicos y tecnológicos no accesibles sin las bases que posee el ingeniero.

Es pues urgente la transferencia de tecnología, hacia aquellas personas que requieren conocer los efectos adversos que los gases de la atmósfera del horno ejercen sobre

el acero; ésto ha servido como incentivo para realizar la presente investigación encaminada a estudiar los efectos de la oxidación y la descarburización sobre el metal, y además dar a conocer los métodos de protección superficial que deben usarse a fin de lograr éxito en procesos de tratamientos térmicos.

La atmósfera de amoniaco disociado es un método de protección superficial del acero, que consiste en hacer circular en el horno, una corriente de gas a fin de eliminar la presencia de oxígeno libre. Nitrógeno e Hidrógeno se llevan al horno de tratamientos térmicos provenientes de la disociación del amoniaco, la cual es realizada en un generador de atmósfera a 850°C y se mantiene esta condición hasta que las piezas salgan del horno para su enfriamiento posterior.

En el presente trabajo se ha utilizado un acero AISI 01 el cual ha sido tratado en atmósferas conocidas como nocivas para el material y así poder evaluar la eficiencia de la atmósfera protectora. La primera atmósfera ensayada fue aire, que contiene en su composición oxígeno, que posee efectos oxidantes y descarburizantes, con ella se obtuvieron profundidades de zona descarburizada de hasta 0.41 mm. y durezas de 46.5 Rc en dicha zona. La segunda atmósfera

fue generada mediante un flujo constante de dióxido de carbono, un gas fuertemente descarburizante y con tendencia a oxidar el acero, con este gas se obtuvieron espesores de zona descarburizada de 0.5 mm. y durezas de tan sólo 39 Rc en dicha zona. La tercera atmósfera ensayada fue amoníaco disociado, reconocida como neutral para todos los porcentajes de carbono en el acero, obteniéndose espesores de zona descarburizada de 0.115 mm. y durezas mínimas de 63 Rc en ella.

C A P I T U L O I

FUNDAMENTOS TEORICOS

1.1 GENERALIDADES

Cuando un acero es calentado a temperaturas de tratamiento térmico en el interior de la cámara del horno, la atmósfera que está encerrada, o que se encuentra circulando en la cámara, reacciona químicamente con la superficie del metal, provocando oxidación y carburización o descarburización dependiendo del porcentaje de carbono del acero.

La oxidación del acero a altas temperaturas, forma una escama (óxidos de hierro) de color gris oscura que afecta principalmente a la presentación y acabado de la superficie, lo cual en un proceso de fabricación en serie es un serio problema, que obliga al fabricante a realizar limpiezas y maquinados posteriores al tratamiento con el fin de eliminar la capa formada, lo cual indudablemente afecta a los costos de producción.

La escama formada por la oxidación superficial retarda la velocidad de enfriamiento del acero, este retardo es a veces suficiente para que un acero templado no sólo tenga martensita en su microestructura, sino que también pudiera tener bainita, la cual es una microestructura menos dura.

En los aceros de alto carbono la oxidación está acompañada de una descarburización, es decir una difusión de átomos de carbono desde la superficie del metal, debido al efecto de la atmósfera.

La descarburización, es un problema importante especialmente durante el tratamiento térmico de temple, el cual se realiza en piezas que necesitan gran dureza, pero como es debido al porcentaje de carbono que el acero se endurece, aquellas zonas afectadas por la descarburización quedarán relativamente suaves.

Existen muchas soluciones para combatir la oxidación y la descarburización, pero la mayoría sólo se justifican para pequeños talleres artesanales; la única solución que se adapta para una producción en serie es la atmósfera protectora.

Existen varios tipos de atmósferas protectoras como se explicará más adelante, pero en el presente trabajo se estudiará la efectividad de la atmósfera de amoniaco disociado, mediante una comparación directa con atmósferas de gran poder oxidante y descarburizante, como son el aire, y una atmósfera con un flujo constante de CO_2 .

La atmósfera de amoniaco disociado es una atmósfera neutral para todos los porcentajes de carbón del acero, y todos los tratamientos que tengan como denominador común, el calentamiento del material dentro de la cámara del horno.

Los gases provenientes de la disociación del amoniaco son nitrógeno e hidrógeno; el nitrógeno es completamente inerte para el acero, y el hidrógeno es un gas netamente reductor, lo cual asegura aún más la calidad de la superficie.

El método de protección atmosférica encuentra aplicación en la fabricación de:

- Camisas de Cilindros
- Herramientas

- Engranajes
- Rodillos de laminación
- Moldes para la industria del plástico.

1.2 REACCIONES QUIMICAS ENTRE GASES Y METAL

Antes de analizar las reacciones que se producen entre los gases posibles en una atmósfera de horno y la superficie del metal, se estudiarán las propiedades más importantes de los gases y se hará una revisión de los principales gases.

Las moléculas de los gases tienen la particularidad de moverse incansablemente en el espacio en el cual ellas se encuentran.

Los gases se diferencian de los líquidos básicamente en dos propiedades:

- a) Los gases son altamente compresibles, y
- b) Son capaces de llenar el recinto donde ellos se encuentran encerrados.

Los gases se asemejan a los líquidos, en que ambos son capaces de:

- a) Fluir
- b) Ejercer presión sobre superficies con las cuales ellas están en contacto, y
- c) Exhiben una velocidad de flujo que puede ser medida a través de un orificio.

Las propiedades más importantes de los gases son las siguientes:

Presión de los Gases.- La característica de la compresibilidad de los gases, lleva a una simple relación entre la presión de un gas y su volumen. Esta relación es conocida como la Ley de Boyle que dice: "El volumen de un gas encerrado dentro de un cuerpo varía inversamente a la presión absoluta, a temperatura constante".

Difusión.- Cuando dos o más recintos contienen diferentes gases, y éstos están intercomunicados de tal manera de que cada gas tiene acceso a todos los vestíbulos, y asumiendo que no hay reacción química, el movimiento molecular causa que cada gas penetre en el volumen entero de todos los recintos. Para esta difusión, la mezcla será eventualmente homogénea.

Cada gase se expande en el total del volumen disponible

como si los otros gases no estuviesen presente. Recordando la Ley de Boyle tenemos que la presión absoluta de cada gas es reducido a su valor más bajo llamada presión parcial. La presión de la mezcla resultante de gases será igual a la suma de las presiones parciales de los gases constituyentes. Este fenómeno es expresado como la Ley de Dalton: "Una mezcla de algunos gases, los cuales no reaccionan químicamente ejercerán una presión igual a la suma de las presiones con las cuales estos gases podrían ejercer separadamente si cada uno ocupara sólo el espacio total a la misma temperatura.

Densidad.- La densidad de un gas es la cantidad de masa contenida en una unidad de volumen, y la densidad es influenciada por la presión y la temperatura. La densidad y la presión incrementan en la misma proporción y los gases se expanden cuando son calentados y se contraen cuando son enfriados.

Un litro de aire a temperatura y presión constantes pesa 1.293 grs, por lo tanto, la densidad del aire es 1.3 Kg/m^3 .

Viscosidad.- La fricción molecular o viscosidad, está

presente tanto en gases como en líquidos, aunque el espaciamiento molecular dé como resultado una menor viscosidad en los gases.

Esta fricción retarda el movimiento de los gases a través de canales, tubos y ductos. Los coeficientes de viscosidad para gases y líquidos son expresados en poises o centipoises.

Efecto de la Temperatura.- La Ley de Charles dice: "El volumen de una masa fija de gas y su presión varían directamente con la temperatura absoluta".

Usando el efecto de la temperatura, una ley general de los gases puede ser escrita en la forma de una ecuación matemática como sigue:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \quad \text{donde}$$

P = Presión absoluta

V = Volumen de la masa fija

T = Temperatura absoluta

Y en donde los puntos 1 y 2 son dos diferentes juegos de condiciones de presión, volumen y temperatura.

PRINCIPALES GASES: Los gases más importantes para nuestro estudio son los siguientes:

Aire.- Es un importante gas en atmósfera de hornos, porque comprime la atmósfera en un horno en el cual atmósfera protectora no es usada. La composición química del aire es aproximadamente 79% de Nitrógeno y 21% de Oxígeno con pequeñas trazas de dióxido de Carbono.

El aire usado como atmósfera de horno se comporta como una atmósfera oxidante, debido a que el oxígeno es el constituyente más activo en aire.

Oxígeno.- El oxígeno reacciona con la mayoría de los metales para formar Oxidos, además el oxígeno reacciona con el carbón disuelto en el acero bajando el contenido de carbono del acero.

Nitrógeno.- Nitrógeno molecular es pasivo para ferrita y es enteramente satisfactorio para uso como atmósfera en el recocido de aceros de bajo cordón, sin embargo, éste debe estar completamente seco para ser usado como una atmósfera protectora para aceros de alto carbono, debido a que pequeñas cantidades de vapor de agua en el Nitrógeno causarían descarburización. El Nitrógeno

atómico (creado por temperaturas normales de tratamiento térmico) se combina con hierro para formar Nitruros que imparten dureza a la superficie.

La concentración del Nitrógeno en una mezcla de gases es importante porque diluye las concentraciones de los demás componentes.

Dióxido de Carbono y Monóxido de Carbono.- Estos dos gases son importantes en atmósferas usadas en tratamientos térmicos del acero. A temperaturas de austenización, el dióxido de Carbono reacciona con el carbono superficial del acero para producir monóxido de carbono según la siguiente reacción:



en la cual (C) representa el carbono disuelto en austenita. Esta reacción continúa hasta que no hay dióxido de carbono disponible o hasta que la superficie del acero esté libre de carbono, a tal punto que si se continúa el suministro de dióxido de carbono hierro será oxidado según la siguiente reacción:



El óxido de hierro (FeO) es el óxido estable formado sobre 555°C (1030°F).

Estas reacciones progresan a una velocidad que depende del tiempo, temperatura y presión del sistema.

Hidrógeno.- Hidrógeno reduce los óxidos de hierro a hierro. Bajo ciertas condiciones el Hidrógeno puede descarbonizar el acero.

El efecto descarbonizante del Hidrógeno por debajo de 705°C es despreciable, pero éste incrementa marcadamente sobre esta temperatura.

Vapor de agua incrementa el efecto descarbonizante porque se disocia, proveyendo así un suministro de Hidrógeno y Oxígeno nacientes.

Hidrógeno naciente es más activo que molecular, por lo tanto la descarbonización es más efectiva de acuerdo a la siguiente reacción:

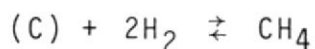


El oxígeno naciente reacciona con el carbono del acero

para formar monóxido de carbono.



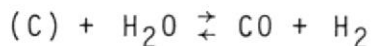
Aún un bajo punto de rocío de la atmósfera de hidrógeno tiene algún efecto descarburizante, particularmente en los aceros de alto contenido de carbono, debido a que el hidrógeno molecular puede reaccionar con carbono.



Vapor de Agua.- El vapor de agua es oxidante para el hierro.



y se combina con el carbono del acero para formar monóxido de carbono e hidrógeno.



Hidrocarburos.- Los gases hidrocarburos más comúnmente añadidos a la atmósfera de un horno son:

Metano (CH₄)

Etano (C_2H_6)

Propano (C_3H_8)

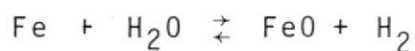
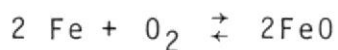
Butano (C_4H_{10})

Estos gases imparten una tendencia carburizante a la atmósfera del horno, debido a que a altas temperaturas se descomponen generando átomos de carbono.

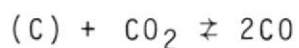
La descomposición térmica da como resultado la formación de hollín en cantidades proporcionales al número de átomos de carbono en el hidrocarburo.

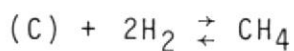
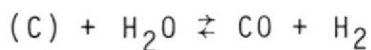
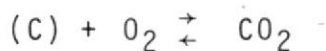
En resumen, las reacciones químicas posibles entre gases y metal a temperaturas de tratamiento térmico son las siguientes:

I. Reacciones oxidantes

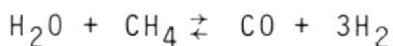


II. Reacciones descarburizantes





III. Reacciones entre gases



Como se puede apreciar los componentes gaseosos que reaccionan más intensamente con el acero son el dióxido de carbono, el oxígeno y el vapor de agua.

El oxígeno es un gas que cuando está presente en la atmósfera del horno lleva inevitablemente a la oxidación y descarburización; el dióxido de carbono es un gas fuertemente oxidante, pero su acción puede ser controlada mediante un conocimiento perfecto de las leyes que rigen el equilibrio químico.

1.2.1 El Equilibrio Químico

La selección de una atmósfera protectora para

tratamientos térmicos requiere un perfecto conocimiento de las variables que deben ser controladas y de los componentes del gas que tienden a reaccionar con el metal.

Esta información es suministrada por los datos sobre la composición del equilibrio del gas en contacto con el metal y un óxido o con el metal y un carburo a diferentes temperaturas, estos datos de equilibrio deben ser bien interpretados por el metalúrgico.

En la práctica, las atmósferas controladas más importantes son aquellas que se usan para prevenir la oxidación y descarburización de los aceros de alto contenido de carbono; las reacciones que causan estos efectos indeseables son usadas como ejemplos para entender los principios de equilibrio.

Experimentos han demostrado que si hierro y óxido ferroso son calentados en una cámara a temperatura constante y en contacto con alguna mezcla de gases, la composición del gas cambia hasta alcanzar una cierta composición definida, la cual es característica de esta temperatura.

Las reacciones que ocurren dependen de muchos factores, pero en general la velocidad de reacción es alta a temperaturas elevadas, así que es seguro asumir que oxidación o reducción pueden ocurrir a temperaturas de tratamiento si la composición del gas es favorable. Hay pocas excepciones como en el caso de hidrógeno cuidadosamente purificado, el cual pese a su marcada tendencia a descarburizar no remueve carbono a una velocidad apreciable, sin embargo trazas de vapor de agua incrementa la velocidad de reacción tremendamente.

La presencia de oxígeno o un óxido gaseoso, lleva a una reacción rápida, a menos que como pasa ocasionalmente, algunos elementos aleantes presentes en el acero forman una capa impermeable de un óxido, el cual actúa como una barrera para el paso de carbono, frenando la reacción.

Los datos de equilibrio son expresados cuantitativamente por la Ley de acción de masas, la cual dice que "sea cual fuese la concentración de las sustancias A, B, C y D envueltas en la reacción:



la reacción toma lugar de tal forma que la composición de equilibrio satisface la relación:

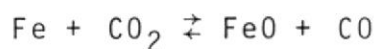
$$\frac{(C)^c (D)^d}{(A)^a (B)^b} = \text{constante}$$

En la cual los parentésis son usados para denotar la concentración de las moléculas, la constante, la cual tiene un valor definido para cada temperatura, es llamada la constante de equilibrio y es comúnmente representada por K.

Al evaluar K, aquellas sustancias que aparecen en el lado derecho de la ecuación química son generalmente colocadas en el numerados de la fracción, la cual representa la relación de concentraciones. Si una de las sustancias A, B, C ó D es un sólido, su concentración no cambia aunque la cantidad del sólido presente puede variar; sin embargo, estas concentraciones podrían ser incluidas en el valor de la constante de equilibrio y nosotros tratamos solo con aquellas sustancias que sean líquidos o gases y cuyas concentraciones puedan variar.

Tomemos una ilustración específica, en la reac -

ción:



La constante de equilibrio podría ser escrita:

$$\frac{(\text{FeO}) \cdot (\text{CO})}{(\text{Fe}) \cdot (\text{CO}_2)} = \text{constante} = K^1$$

pero la concentración de la fase hierro es siempre la misma como la de óxido de hierro, por lo tanto estas concentraciones constantes podrían ser incluidas en la constante de la siguiente manera:

$$\frac{(\text{CO})}{(\text{CO}_2)} = K^1 \cdot \frac{(\text{Fe})}{(\text{FeO})} = K$$

El valor de la constante de equilibrio es así dada por la razón de concentraciones de monóxido de carbono a dióxido de carbono. La Fig. 1.1 nos da las constantes de equilibrio para la oxidación de hierro por dióxido de carbono.

La manera más conveniente de expresar la concentración de un gas es como su presión parcial, ésto es, como la presión que el gas ejercería si

$$K = \frac{P_{\text{CO}_2}}{P_{\text{CO}}} = \frac{P \times \text{fracción de volumen de CO}_2}{P \times \text{fracción de volumen de CO}}$$

donde P_{CO_2} y P_{CO} son las presiones parciales de CO_2 y CO en atmósferas, respectivamente, y P es la presión total del sistema en atmósferas, siendo una atmósfera igual a 760 mm. de mercurio.

Como no hay cambio de volumen en esta reacción, la presión parcial de cada gas aparece en la expresión para K con el mismo exponente, llamémosla la unidad, entonces la presión total se cancela y la composición del gas en equilibrio es independiente de la presión total de los gases que reaccionan.

Hay sin embargo un gran número de reacciones, en las cuales hay un cambio de volumen, como por ejemplo la reacción de la Fig. 1.2 ($\text{CO}_2 + \text{C} \rightleftharpoons 2\text{CO}$), entonces la presión total debe ser tomada en cuenta.

$$K = \frac{P_{\text{CO}}^2}{P_{\text{CO}_2}} = \frac{(P \times \text{fracción de volumen de CO})^2}{(P \times \text{fracción de volumen de CO}_2)}$$

Una propiedad de las constantes de equilibrio es

ción de estas constantes es equivalente a adicionar o sustraer el cambio de energía libre de dos reacciones para encontrar el cambio en una tercera.

En la Tabla 1.1 se dan valores de la constante de equilibrio para algunas reacciones, en un rango de temperatura que va desde 400°C hasta 1300°C. Los valores de K obtenidos en la tabla son una reexaminación de la misma Tabla publicada anteriormente por Austin y Day², por lo tanto, son altamente confiables.

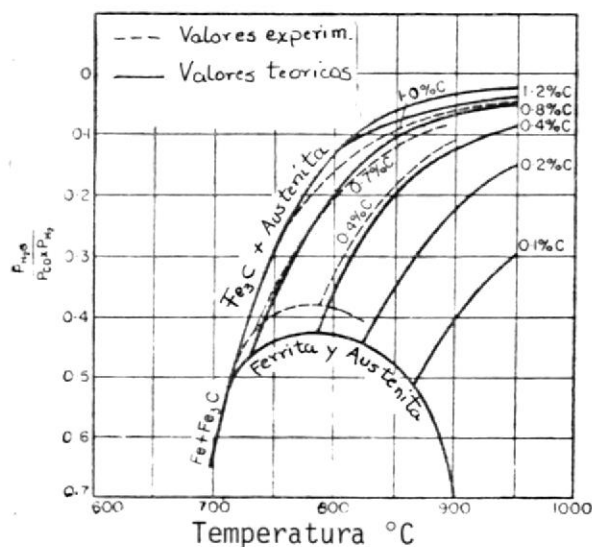
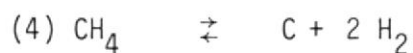
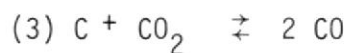
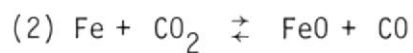


Fig .1.4.- Equilibrio para el Sistema
 $C_{Fe} + H_2O \rightleftharpoons CO + H_2$
 (Clive Davies)

t (°C)	$K_1 = \frac{PH_2}{PH_2O}$	$K_2 = \frac{PCO}{PCO_2}$	$K_3 = \frac{p^2CO}{PCO_2}$	$K_4 = \frac{p^2H_2}{PCH_4}$
400	9.12	0.74	9×10^{-5}	5.66×10^{-2}
450	6.38	0.86	7.3×10^{-4}	0.164
500	4.68	0.96	4.7×10^{-3}	0.422
550	3.53	1.03	0.023	0.977
600	2.99	1.17	0.096	2.09
650	2.65	1.35	0.343	3.92
700	2.38	1.53	1.06	7.16
750	2.17	1.72	2.96	12.3
800	2.00	1.90	7.48	20.1
850	1.84	2.07	17.46	31.8
900	1.72	2.24	37.76	48.3
950	1.61	2.41	76.70	71.0
1000	1.51	2.57	146.5	102.4
1050	1.44	2.72	264.0	141.2
1100	1.37	2.88	463.4	192.0
1150	1.31	3.03	767.4	256.0
1200	1.26	3.21	1244	335.0
1250	1.22	3.36	1945	431.5
1300	1.18	3.49	2951	547.0

Tabla 1.1.- Constantes de equilibrio para las siguientes reacciones:



(Austin y Day)

Las Figuras 1.1, 1.2, 1.3, 1.4 y 1.5 nos permiten encontrar las constantes de equilibrio para reacciones determinadas.

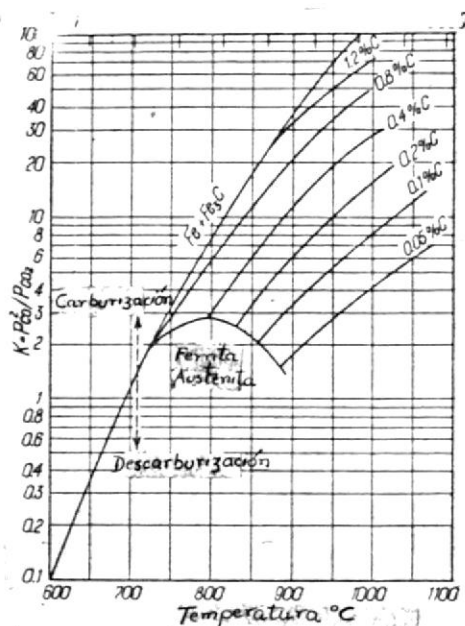


Fig. 1.5.- Constantes de equilibrio para la reacción $\text{Fe}_3\text{C} + \text{CO}_2 \rightleftharpoons 3\text{Fe} + 2\text{CO}$ como una función de la temperatura y contenido de carbono. (Austin y Day)

En aplicaciones prácticas es usualmente conveniente conocer la razón de los gases activos o su porcentaje de composición, éstos pueden ser calculado por la Tabla 1.1 o por las figuras anteriores; pero si alta seguridad no es necesaria, podemos utilizar las Figs. 1.6, 1.7 y 1.8.

Para una reacción en la cual no hay cambio de pre-

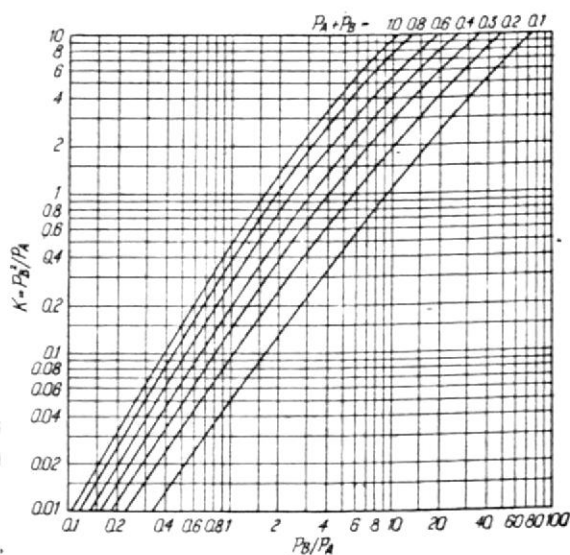


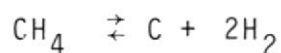
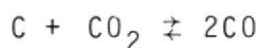
Fig. 1.6.- Relación entre P_B^2/P_A y P_B/P_A para diferentes valores de $P_A + P_B$. (Austin y Day).

sión, la razón de los gases activos es dada directamente por la constante de equilibrio, esto quiere decir que, la razón de los gases activos en una atmósfera de horno podría ser comparada directamente con la constante de equilibrio para determinar la tendencia a reaccionar de la mezcla.

Por ejemplo, si un gas a 1000°C contiene 15% de CO , 10% de CO_2 y 75% de N_2 , entonces la razón PCO/PCO_2 es 1.5; la constante K a 1000°C para

la reacción $\text{Fe} + \text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{FeO} + \text{CO}$ es 2.57, por lo tanto el gas en mención contiene menos CO que el de la mezcla de equilibrio y tenderá a oxidar el hierro.

Para reacciones en las cuales hay un cambio de volumen, no es posible comparar la razón de los gases activos directamente con K, debido a que K no es una simple razón porque contiene por lo menos una presión parcial a un exponente que no es la unidad, ejemplo de estas reacciones son las siguientes:



Como ayuda en estos casos tenemos en la Fig. 1.6 una serie de curvas que muestran la relación entre la constante de equilibrio K y la razón simple PB/PA para diferentes presiones totales de A + B.

Ocasionalmente es conveniente conocer el porcentaje de cada uno de los gases activos, en vez

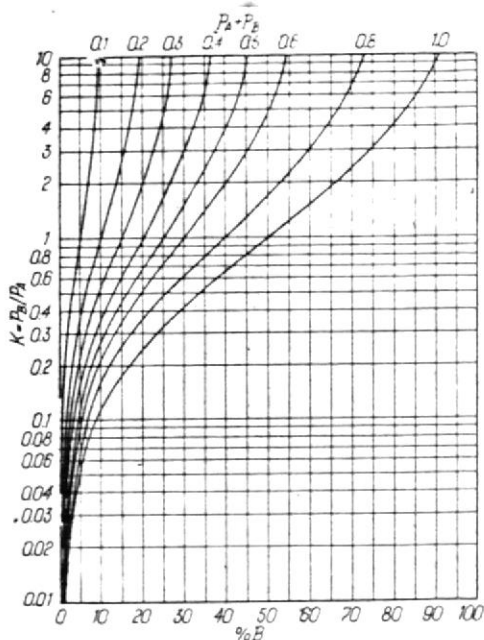


Fig. 1.7.- Relación entre el porcentaje del constituyente B en una mezcla de gases a una atmósfera de presión total y $K = P_B/P_A$ para diferentes valores de $P_A + P_B$. (Austin y Day).

que su razón, la Fig. 1.7 es para aquellas reacciones en las que no ocurre un cambio de volumen y la Fig. 1.8 es usada cuando un volumen de gas al reaccionar genera dos volúmenes de productos.

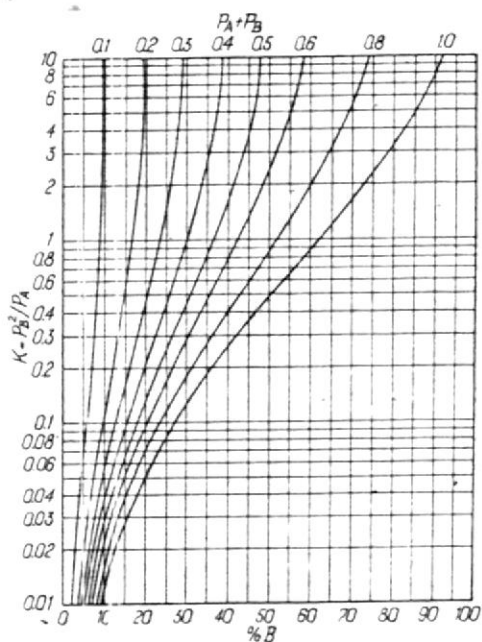


Fig. 1.8.- Relación entre el porcentaje de constituyente B en una mezcla de gases a una atmósfera de presión total y $K = P_B^2/P_A$ para diferentes valores de $P_A + P_B$. (Austin y Day).

1.2.2.- Oxidación de Metales a Altas Temperaturas

Cuando el acero se expone a una atmósfera de oxidación, debido a la presencia de vapor de agua, o de oxígeno en el horno, se forma una capa de óxido de hierro, llamada escama. Una delgada capa de escama tiene muy poco efecto en la rapidez real de enfriamiento, pero una gruesa ca-

pa de escama (0.1 mm. de profundidad) retarda la rapidez real de enfriamiento. Como la escama es más suave que el acero endurecido, resulta muy importante notar que habrá una tendencia de la escama a atascarse en la ruedad del esmeril durante las operaciones de terminado. En cualquier caso la formación de escamas generalmente se evita en los tratamientos térmicos comerciales.

La prevención de la oxidación es uno de los objetivos de la mayoría de las atmósferas controladas en hornos.

El primer requerimiento de una atmósfera protectora para prevenir o minimizar oxidación de metales ferrosos es que debe ser libre de oxígeno. Muchas atmósferas de hornos son mezclas de varios gases los cuales pueden fácilmente ser apropiadamente proporcionados para obtener resultados deseados.

Las atmósferas más comúnmente usadas son las formadas por la combustión parcial de gases hidrocarburos, tales como coke, gas natural, propano o butano.

Debido a que el vapor de agua es producido en cantidades apreciables en los productos de la combustión, no es práctico usar una fuente de calor de un combustible quemado si la oxidación de metales ferrosos debe ser evitada.

Los productos de la combustión parcial de gases hidrocarburos, forman atmósferas consistentes de mezclas de CO_2 , CO , CH_4 , N_2 , H_2O , H_2 y en algunos casos H_2S y SO_2 .

Es deseado generalmente mantener las razones de $\frac{\text{H}_2\text{O}}{\text{H}_2}$ y $\frac{\text{CO}_2}{\text{CO}}$ tan bajos como sea posible para minimizar la tendencia oxidante del vapor de agua y el dióxido de carbono; enfatizando el efecto reductor de H_2 y CO . Esta condición es favorecida operando el generador de atmósfera a la más baja razón posible aire-gas de entrada.

Una razón favorable de $\frac{\text{H}_2\text{O}}{\text{H}_2}$ producirá piezas brillantes, es decir sin oxidación superficial; una manera de mejorar esta razón de gases activos es con una remoción adicional de H_2O por medio de refrigeración o secadores por absorción.

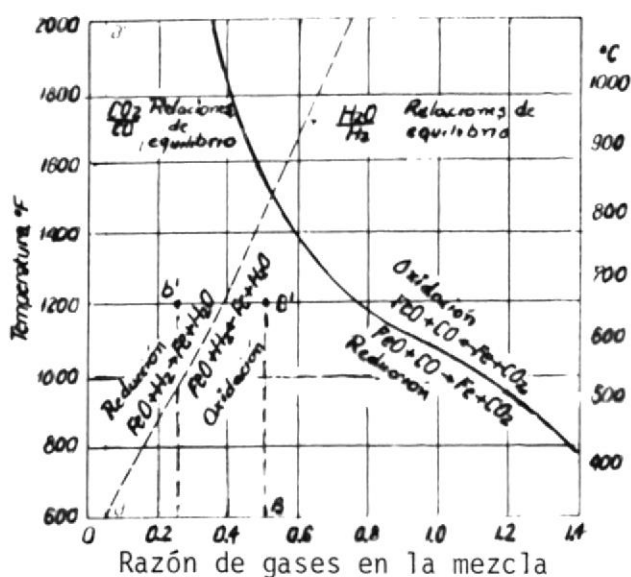


Fig. 1.9.- Relaciones de equilibrio entre Fe, H_2 y H_2O , y entre Fe, CO y CO_2 a temperatura de tratamieantos térmicos (Clive Davies).

La Fig. 1.9 representa la curva de equilibrio entre hierro, hidrógeno y vapor de agua y entre hierro, monóxido y dióxido de carbono.

La razón $\frac{\text{CO}_2}{\text{CO}}$ es casi siempre favorable para obtener piezas brillantes en mezclas gaseosas comúnmente usadas para el recocido brillante de aceros.

El amoniaco disociado es usado para prevenir la oxidación del acero, este gas es formado por la descomposición del amoniaco a altas temperaturas en presencia de un catalizador; la mezcla resul-

tante consiste de 75% de hidrógeno y 25% de nitrógeno y extremadamente pequeñas cantidades de vapor de agua.

Debido a su muy favorable razón de $\frac{H_2O}{H_2}$, éste es un excelente gas para el recocido brillante, ya que al enfriar las piezas a recocer en el horno nunca entrarán en el lado de la curva donde se produce oxidación, según la Fig. 1.9. Además el amoniaco disociado está libre de CO y CO₂, por lo tanto nos permite olvidarnos de esta razón de gases activos.

El amoniaco disociado es usado en todos los tratamientos térmicos que implican la permanencia en el horno de las piezas a ser tratadas, incluso es usado para recocer aleaciones al cromo-níquel.

La oxidación puede ser dividida a groso modo en dos clases: la producida a bajas temperaturas o en el rango por debajo de los 480°C y la producida a altas temperaturas.

En el rango de baja temperatura oxígeno o vapor

de agua pueden producir oxidación o discoloración, discoloración generalmente indica que la oxidación ha tomado lugar durante el ciclo de enfriamiento, un análisis de gases y mediación del punto de rocío ayudarán a determinar cuál impureza está causando el problema.

A altas temperaturas la oxidación generalmente va más allá de la etapa de discoloración y produce escamas. El oxígeno tiende a producir un color en la superficie del acero que va desde el gris claro a negro, con una apariencia desagradable. Un método para determinar la causa de la oxidación es colocar una pieza o probeta de prueba de cobre brillante (sin óxido) dentro del horno y junto con el acero; este cobre es oxidado por el oxígeno pero no por el vapor de agua, de esta manera, su comportamiento comparado con el del acero es una buena pista para detectar la causa de la oxidación.

Una discoloración en el acero debido al azufre podría también ser mal interpretada como oxidación, afortunadamente estos dos tipos de discoloración pueden ser identificados, porque el

óxido es fácilmente separado por dilución en ácido sulfúrico, mientras que la discoloración debido al azufre no lo es.

Es posible que el acero se oxide después del tratamiento térmico, aunque éste haya sido realizado en una atmósfera protectora, al salir del horno brillante y seco; como no tiene una capa protectora que puede ser de aceite, el acero es vulnerable a ser atacado por el vapor de agua, el oxígeno e impurezas que puede tener el aire; por esto es recomendable que inmediatamente después del tratamiento térmico y antes que el acero entre en la próxima etapa de producción las piezas sean protegidas con una capa protectora del aceite.

Cuando el metal ha sido procesado anterior al tratamiento térmico, es posible que posea una capa de lubricante, el cual se descompone a altas temperaturas provocando en la superficie del metal una descoloración que podría ser confundida con una oxidación, entonces es mejor limpiar el metal antes de introducirlo al horno, para esto existen lavados cáusticos y tratamientos

La difusión en los cristales, tal como se la definió, se manifiesta debido al movimiento de los átomos individuales con respecto al cristal o red cristalina, en lo que se denomina proceso unitario.

Todos los átomos tienen un continuo movimiento alrededor de sus posiciones medias y el proceso unitario o salto es el suceso en que cambia la posición media del átomo, solo puede producirse si el átomo tiene una energía suficientemente elevada y si existe una posición libre que pueda ocupar.

ENERGIA DE ACTIVACION.- Para que los átomos cambien de lugar, es necesario que su energía sea mayor a la mostrada en la Fig. 1.11.

La energía requerida para sobrepasar el defecto se llama energía de activación de la difusión. En la Fig. 1.11 (a) se requiere energía para empujar el átomo fuera de sus actuales vecinos.

Para la difusión intersticial se requiere

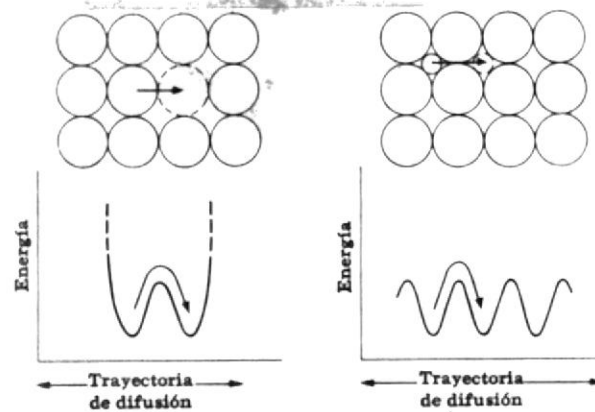


Fig. 1.11.- Energía de Activación para Difusión (Van Vlack).

forzar al átomo hacia un contacto mayor con los átomos vecinos según se mueve entre ellos, por lo tanto, los elementos intersticiales requieren de mayor energía de activación que los elementos para difusión a través de vacancias. [Fig. 1.11 (b)].

GRADIENTE DE CONCENTRACION.- El proceso de homogenización mostrado en la Fig. 1.12.

Aunque hay igual probabilidad para un átomo individual de moverse en cualquier dirección, el gradiente de concentración favorece un movimiento neto de los átomos hacia la derecha. En la Fig. 1.12 (b) hay más átomos en B que los que había inicialmente. Así, incluso los átomos marcados en A, tendrán un diferencial de movimiento hacia

la derecha y aumentarán la uniformidad en la estructura.

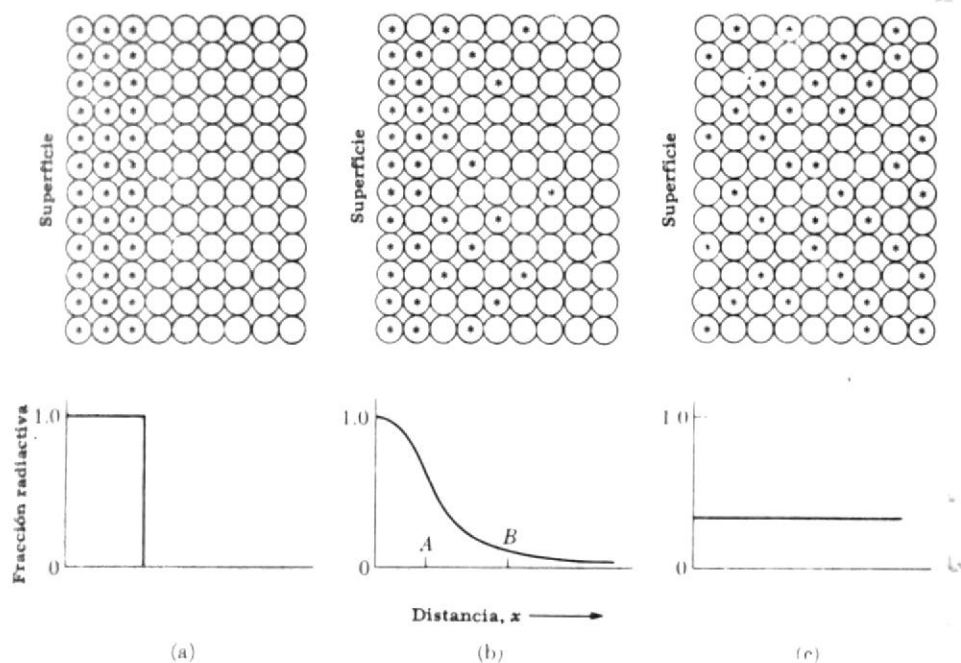


Fig. 1.12.- Esquemización del Gradiente de Concentración y autodifusión:

- a) $t = t_0$
- b) $t_0 < t < t_\infty$
- c) $t = t_\infty$

(Van Vlack).

DIFUSION EN LAS DISLOCACIONES.- Se ha comprobado que es necesario menor energía de activación cuando se produce la difusión a lo largo de las dislocaciones de cuña.

En la Fig. 1.13 se puede analizar con más detenimiento el movimiento de los átomos; desde la posición A este átomo se moverá a su correspon -

diente en el plano próximo, por lo tanto la energía de activación será baja ya que se tiene un espacio disponible relativamente grande para el movimiento del átomo.

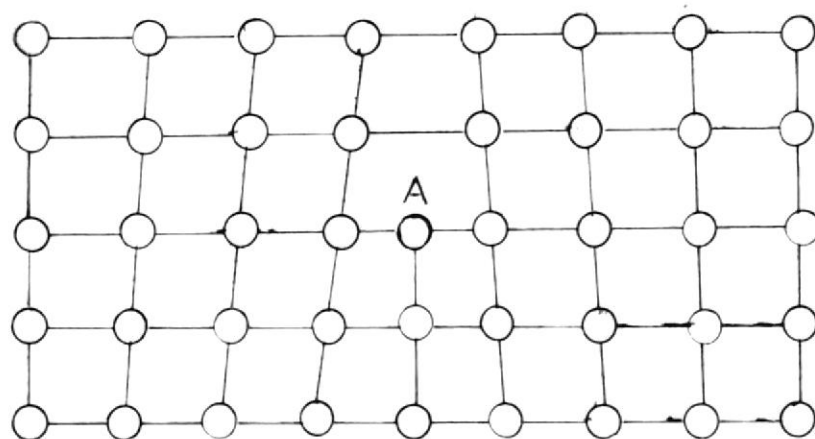


Fig. 1.13.- Difusión a lo largo de una dislocación de cuña. (Van Vlack).

EL COEFICIENTE DE DIFUSION.- El coeficiente de difusión o difusividad D , es definido por la primera Ley de Ficks para difusión en una sola dimensión:

$$dm = -D \frac{\partial C}{\partial X} dt \quad (\text{Ec. 1})$$

donde:

dm = el número de gramos de carbono que atraviesa 1 cm^2 en el tiempo dt segundos.

D = El coeficiente de difusión en cm^2/seg .

C = La concentración de carbono expresada en gr/cm^3 .

X = La distancia en centímetros, en donde se asume que las dimensiones de la matriz permanecen constantes.

Cuando carbono se difunde en hierro, se puede asumir que el proceso principal que ocurre, es el movimiento de átomos de carbono de un intersticio a otro. Esto es, los átomos de hierro forman una armazón relativamente inmóvil dentro de la cual los átomos de carbono se mueven, la inmovilidad de los átomos de hierro elimina las complicaciones asociadas con el usual "efecto Kirkendall".

La segunda ecuación de Fick describe la variación de la concentración de la sustancia que difunde en el espacio y en el tiempo. Esta ecuación se deduce directamente del balance de masa durante la difusión y de la expresión para el flujo.

Esta Ley expresa que la cantidad de sustancia en

difusión no cambia, solo se redistribuye.

Examinemos un flujo unidimensional (la concentración depende solo de X). Calculemos los flujos a través de dos planos X y $x + dx$, situados a una distancia dx el uno del otro. El flujo a través del plano X de acuerdo con la Ec. (1) es:

$$- DS \left(\frac{\partial C}{\partial X} \right)_x \quad \text{y a través del plano } (x + dx) \text{ es:}$$

$$- DS \left(\frac{\partial C}{\partial X} \right)_{x + dx}$$

Como resultado, durante el tiempo dt en el volumen Sdx se perderá la cantidad de sustancia:

$$dq = -DS \left(\frac{\partial C}{\partial X} \right)_x dt + DS \left(\frac{\partial C}{\partial X} \right)_{x + dx} dt$$

teniendo en cuenta que:

$$\left(\frac{\partial C}{\partial X} \right)_{x + dx} - \left(\frac{\partial C}{\partial X} \right)_x = \left(\frac{\partial^2 C}{\partial X^2} \right) dx$$

obtendremos:

$$dq = DS \left(\frac{\partial^2 C}{\partial X^2} \right) dx dt$$

Si el coeficiente de difusión no depende de las

coordenadas, ésto llevará al aumento de la concentración con el tiempo:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{dq}{S dx dt}$$

Examinando el equilibrio llegamos a la ecuación:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial X^2} \quad (\text{Ec. 2})$$

Esta ecuación es llamada la segunda ecuación de Fick.

La segunda ecuación de difusión representa una ecuación diferencial en derivadas parciales y para resolverla hay que formular las condiciones iniciales y de frontera que debe satisfacer la concentración de la sustancia que difunde.

La distribución inicial de la concentración $C(x, 0)$ puede ser arbitraria, pero con mayor frecuencia, esa función es constante o igual a cero dependiendo del sentido y de la fuente de difusión.

En lo que se refiere a las condiciones de frontera (condiciones en la superficie), por lo común, en los problemas de difusión se dan o bien la concentración en la superficie $C(o,t)$ o bien el flujo $(\partial C/\partial X)_{o,t}$; en casos particulares estas magnitudes pueden ser constantes o iguales a cero.

COEFICIENTE DE DIFUSION CONTRA TEMPERATURA.- La dependencia del coeficiente de difusión D con respecto a la temperatura se expresa por la Ecuación de Arrhenus:

$$D = D_o e^{-E/RT} \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde D_o , es el factor de frecuencia en $\text{cm}^2/\text{seg.}$, el cual es una constante que incluye varios factores tales como distancia de brinco y la frecuencia de vibración del átomo.

E , la energía de activación

e , la base de los logaritmos naturales

R , la constante de los gases (1.987 cal/mol °K)

T , la temperatura absoluta en °K.

Elemento	Intervalo de temperaturas del experimento °C	D/cm ² /seg)		D ₀ (cm ² /seg)	E (cal/gr)
		T ₁	T ₂		
Al(0.55)	700 - 860	10 ⁻¹²	10 ⁻¹¹	0.17	52000
Al(0.55)	1100 - 1250	10 ⁻¹²	10 ⁻¹⁰	4.27	75000
Au (0)	800 - 900	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹⁰	31	62.400
Be (0)	700 - 850 (Fe _α)	10 ⁻¹³	10 ⁻¹¹	4.2 · 10 ⁻²	67700
Be (0)	950 - 1100 (Fe _γ)	10 ⁻¹²	10 ⁻¹¹	6.45	71800
C (0.1)	0 - 200 (Fe _α)	10 ⁻¹⁸	10 ⁻¹²	10	20100
C (0.1)	500 - 750 (Fe _α)	10 ⁻⁸	10 ⁻⁶	0.2	24600
C (2.4)	800 - 1400 (Fe _γ)	10 ⁻⁸	10 ⁻⁵	0.15	32000
Co (0)	700 - 900 (Fe _α)	10 ⁻¹³	10 ⁻¹¹	16.5	63000
Co (0)	1100 - 1250 (Fe _γ)	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹⁰	2.5	72500
Cu (0)	800 - 1200	10 ⁻¹²	10 ⁻⁹	3	61000
H (0)	25 - 200 (Fe _α)	10 ⁻⁷	10 ⁻⁵	0.12	7820
H (0)	400 - 900 (Fe _α)	10 ⁻⁴	10 ⁻³	2.2 · 10 ⁻³	2900
H (0)	900 - 1200 (Fe _γ)	10 ⁻⁴	10 ⁻⁴	10	9950
N (0)	1165 - 1320	10 ⁻¹⁰	10 ⁻⁹	0.15	18600
Ni (0)	930 - 1050	10 ⁻¹³	10 ⁻¹¹	0.77	67000
P (0)	700 - 900	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹⁰	7.1 · 10 ⁻³	40000
S (0)	700 - 900 (Fe _α)	10 ⁻¹¹	10 ⁻⁹	1.68	48900
S (0)	1200 - 1350 (Fe _γ)	10 ⁻⁸	10 ⁻⁷	2.42	53400

Tabla 1.2.- Parámetros de difusión de algunas impurezas en el hierro (Bokshtein).

Ambas magnitudes (D_0 , E) no dependen de la temperatura; la exactitud en la determinación llega a ser cerca del 10% para E , la de D_0 es mucho peor, del 50 al 100%. Esto es consecuencia de la extrapolación alejada. Es que para determinar E y D_0 , primero se halla la función $D(T)$ y después se construye la dependencia en D de T^{-1} . La tangente del ángulo de inclinación de esta línea recta da E/R y D_0 se obtiene de la extrapolación sobre $T^{-1} \rightarrow 0$.

Los parámetros de difusión de las impurezas en el hierro aparecen en la Tabla 1.2. La energía de activación de difusión del carbono es 32000 cal/gr at en el hierro γ y 24600 cal/gr at en hierro α . Las magnitudes de los coeficientes de difusión del carbono alcanzan a $10^{-6} \text{ am}^2/\text{seg}$ en el $\text{Fe } \alpha$ y 10^{-5} en $\text{Fe } \gamma$.

Casi todos los coeficientes de difusión de la Tabla 1.2 se obtuvieron con los métodos de isótopos radiactivos; la elección de las temperaturas se determina por la comodidad del experimento, y ante todo por la exigencia, que el coeficiente de difusión no sea tan pequeño, en con -

cordancia con la sensibilidad de los métodos radiactivos.

La Tabla 1.3 nos da valores de D_0 y E para difusión de carbono en hierro que están en un margen tolerable de diferencia con los de la Tabla 1.2.

EL FACTOR DE FRECUENCIA.- Debido a la forma exponencial de la Ec. (3): $D = D_0 e^{-E/RT}$, un modesto error en el valor de E , puede llevar a un gran error en D_0 ; es por ésto que Zener³ desarrolló la primera teoría satisfactoria del factor de frecuencia D_0 .

Tratando la difusión como un simple proceso estocástico, Zener encontró que:

$$D = \frac{\alpha a^2}{\tau} \quad (\text{Ec. 4})$$

en donde: a , es el parámetro de la red

α , es un factor geométrico relacionado a la ubicación de los espacios, a los cuales un átomo podría saltar.

τ , es el tiempo entre saltos, que puede ser evaluado por medio de la

Soluto	Solvente	D_0 (cm^2/seg)	E (cal/gr)
Carbono	ccc hierro	0.21	33800
Carbono	bcc hierro	0.0079	18100
Hierro	ccc hierro	0.58	67900
Hierro	bcc hierro	5.8	59700
Níquel	bcc hierro	0.5	66000
Manganeso	bcc hierro	0.35	67500
Cinc	Cobre	0.033	38000
Cobre	Aluminio	2.0	33900
Cobre	Cobre	11.0	57200
Plata	Plata Cristal	0.72	45000
Plata	Plata	0.14	21500
Titanio	Titanio	2.24	41690

Tabla 1.3.- Constantes de Difusión
(Van Vlack).

ecuación teórica de la velocidad de difusión.

La ecuación de la velocidad teórica de Eyring es la siguiente:

$$\frac{1}{\tau} = q \frac{KT}{h} \frac{P^*}{P} \quad (\text{Ec. 5})$$

donde q , es el número de difusión equivalente

K , es la constante de Boltzmann

h , es la constante de Planck

P^* , es la función partición para el complejo activado, omitiendo un grado vibracional de libertad.

P , es la función partición completa para el átomo en el arreglo o configuración.

τ , es el coeficiente de transmisión, el cual es usualmente igual a la unidad.

Wert y Zener observaron que P^* y P no contienen el mismo número de grados de libertad, entonces no era posible tomar su razón como la unidad para una exponencial conteniendo una energía libre como usualmente se lo hace.

Ellos escribieron que $P = P_v P_1$, donde P es la función partición de un oscilador lineal de frecuencia de vibraciones a lo largo de la dirección en que la difusión se lleva a cabo.

$$\text{A altas temperaturas: } P = \frac{K T}{h \nu} \quad (\text{Ec. 6})$$

Cuando la Ec. (6) es introducida en la Ec. (5) la razón $\frac{P^*}{P_1}$ puede ser relacionada al trabajo isotérmico requerido para que el átomo se difunda o dé un salto desde su posición de mínima energía. Este es un método para obtener la energía libre, AF , de activación.

Si $\Delta F = \Delta H - T\Delta S$ y sustituyendo para $\frac{P^*}{P_1}$ en la Ec. (4)

$$D = q \alpha a^2 \nu \exp (AS/R - AH/RT) \quad (\text{Ec. 7})$$

de donde $\Delta H = E$ (energía de activación) en Ec.(3), entonces $D_0 = q \alpha a^2 \nu \exp (AS/R)$ (Ec. 8)

1.2.4 Determinación del Grado de Descarburización en Aceros

Cuando piezas fabricadas de acero son calentadas

en una atmósfera consistente en una mezcla de gases provenientes de la combustión de un hidrocarburo, o en una atmósfera oxidante, es necesario evaluar el efecto de la atmósfera sobre la superficie del metal. Esta evaluación es importante porque controlando el contenido de carbón en la superficie y a una profundidad significativa bajo la superficie, podemos ajustar la composición de la atmósfera del horno, y, si se logra obtener una atmósfera óptima para dicho acero se eliminarán limpiezas y maquinados posteriores después del tratamiento térmico, pudiendo las piezas ser utilizadas inmediatamente.

Los métodos para determinar el grado de descarbonización en el acero son los siguientes:

- a) Ensayo de Dureza
- b) Examinación Microscópica
- c) Análisis químico de cortes consecutivos
- d) Variación en peso

ENSAYOS DE DUREZA.- El ensayo de dureza es el método más comúnmente usado para detectar descarbonización o carburización, debido a que se suele

asociar descarburización con suavidad y carburización con dureza, y porque es un ensayo rápido y fácil de realizar.

Sin embargo, el ensayo de dureza es el menos científico y el menos seguro de los métodos enumerados, en primer lugar porque no nos dará datos cuantitativos para comparar una atmósfera con otra, y en segundo lugar porque existen otros factores que influyen en el número de dureza del acero, tales como velocidad de enfriamiento y temperatura.

Es posible obtener datos que nos lleven a conclusiones erróneas en el ensayo de dureza de un acero de alto porcentaje de carbono, cuando la velocidad de difusión de carbono desde el interior a la superficie del metal durante el tratamiento térmico es menor a la velocidad de descarburización, o pérdida de carbón, desde la superficie del acero a la atmósfera; en este caso la superficie no será totalmente descarburizada y aunque una apreciable cantidad de carbono ha sido perdida en la superficie, hay suficiente todavía para dar una alta lectura en el número de

dureza. Un ejemplo práctico, es el temple de un acero para herramientas con 1.2% de carbono, el cual podría ser descarburizado hasta 0.8% de carbono en su superficie y todavía obtener una lectura de dureza equivalente al máximo valor del acero con 1.2% de carbono.

Este método tiene la ventaja de ser fácil y además puede ser aplicado directamente a piezas sin que se destruyan; pero es necesario que este método esté acompañado de otros, para que sea posible evaluar el grado de descarburización de un acero.

Sería más conveniente realizar un ensayo de microdureza, porque éste nos permitirá obtener la variación de la dureza desde la superficie hacia el interior del metal.

EXAMINACION MICROSCOPICA.- La examinación microscópica es un método que determina las variaciones en el contenido de carbono superficial mediante la variación en la microestructura del acero, por lo tanto nos permitirá tomar acciones correctivas en la composición de la atmósfera.

El contenido de carbón de un acero tiene efecto sobre su microestructura, pero también el tratamiento térmico tiene influencia sobre la microestructura, dependiendo si el acero es recocido, templado o normalizado.

La examinación microscópica podría mostrarnos cualquiera de las siguientes microestructuras:

Ferrita: Una capa de ferrita sobre la superficie indica una descarburización total, usualmente bajo esta capa existe una descarburización parcial.

Carburos: Un decrecimiento en la cantidad de carburos (cementita) indicará descarburización. Un recocido total de la pieza nos presentará la mejor estructura para determinar la profundidad de la descarburización mediante la observación de la variación de carburos.

Perlita: Cuando el acero es recocido, perlita en la microestructura indicará conte-

nido de carbono eutectoide en el acero.

Aústenita: La examinación microscópica podría distinguir excesiva austenita retenida debido a la descarburización.

Martensita: Cuando un acero es templado la microestructura resultante será martensita; es difícil predecir mediante la observación superficial de un acero templado la profundidad de la descarburización porque su estructura no nos dará un cuadro verdadero. Es por ésto que se debe realizar un recocido posterior al temple, en una atmósfera inerte, de tal manera que la descarburización observada mediante la disminución de carburos en la superficie sea representativa de la descarburización producida durante el calentamiento de la pieza para temple.

ANALISIS QUIMICOS DE CORTES CONSECUTIVOS.- El método de análisis de cortes consecutivos se lo

realiza para tener un control del contenido de carbono en la superficie.

Este tipo de evaluación usualmente es realizado sobre probetas cilíndricas, tratadas paralela - mente a las piezas en producción, donde poste - riormente se le harán cortes consecutivos de 0.03 mm. para realizar análisis químico de laboratorio.

VARIACION EN PESO.- Este método es el más seguro de los 4 enumerados, cuando es aplicado en atmósferas no oxidantes. El método de variación en peso es generalmente adoptado debido a su utilidad en la evaluación de las atmósferas protectoras.

Para realizar el método se pesan las probetas antes del tratamiento térmico, el peso debe ser en gramos hasta el cuarto decimal (hasta 0.1 mgrs.), utilizando una balanza química. Después del tratamiento térmico en la atmósfera a ser analizada, las probetas se vuelven a pesar.

Una pérdida en peso representa descarburización,

mientras que una ganancia en peso representará carburización.

La variación de peso en gramos es dividida para el área total de la pieza en cm^2 ; ésto nos dará la variación en peso por cm^2 de superficie debido a la acción de la atmósfera que se está analizando.

La desventaja principal de este método es que no nos muestra la profundidad de la descarburización.

Los 4 métodos enumerados se complementan entre sí para poder evaluar el grado de descarburización de un acero en cierta atmósfera, ninguno de ellos nos permitirá por si solo evaluar perfectamente una atmósfera.

1.3 ATMOSFERAS PROTECTORAS USADAS EN TRATAMIENTOS TERMICOS

Las atmósferas protectoras comercialmente importantes han sido clasificadas por la American Association en 6 grupos, los cuales son designados de la siguiente manera:

Clase 100	Atmósferas exotérmicas
Clase 200	Atmósferas de Nitrógeno preparado
Clase 300	Atmósferas endotérmicas
Clase 400	Atmósferas de carbono
Clase 500	Atmósferas exotérmicas-endotérmicas
Clase 600	Atmósferas Atmósferas de Amoniac

Las atmósferas exotérmicas son formadas por la combustión parcial o completa de una mezcla aire-gas, contienen gran cantidad de nitrógeno (67 a 87%), además de monóxido de carbono (1.5 a 20%), dióxido de carbono (5 a 11%) e hidrógeno (1 a 13%). El gas que se combustiona es un hidrocarburo como kerosene, gas natural, propano o butano. Tienen la ventaja de ser las más económicas, requieren un mínimo de mantenimiento en su generador y son adaptables para un amplio rango de aplicaciones, pero su fuerte potencial descarburizante es frecuentemente una desventaja de esta atmósfera y además tienden a depositar hollín sobre las paredes del horno a partir de los 600°C. Es usada en procesos o tratamientos donde la descarburización no es un factor importante, sino solo la oxidación, tal es el caso de los recocidos brillantes.

Las atmósferas de Nitrógeno preparado son atmósferas

exotérmicas, de la cual dióxido de carbono y vapor de agua son removidos. La principal ventaja de esta atmósfera es su aplicabilidad a una gran variedad de tratamientos térmicos para aceros a bajo, medio y alto carbono. Debido a su bajo punto de rocío y la virtual ausencia de CO_2 , estas atmósferas no exhiben oxidación, ni los efectos de descarburización asociados con las atmósferas exotérmicas.

Las atmósferas endotérmicas son preparadas por reacción de mezclas relativamente ricas de aire y gas hidrocarburo en una cámara calentada anteriormente y en presencia de un catalizador de níquel. Este tipo de atmósfera está siendo casi universalmente aceptable para la protección de la mayoría de los aceros comerciales de la oxidación y descarburización, son relativamente fáciles de producir y el costo de mantenimiento del generador es bajo. Desventajas de esta atmósfera son su facilidad para reaccionar con cromo, su explosividad en contacto con aire (debido a la alta concentración de Hidrógeno y CO), y su tendencia a precipitar hollín. Su facilidad para formar carburos de cromo prohíben su uso en el tratamiento térmico de aceros inoxidable.

Las atmósferas de base carbono están convirtiéndose en obsoletas con el transcurrir del tiempo y son usadas en la actualidad en plantas de pequeña escala. Consisten en pasar aire a través de carbono caliente para formar de la combustión una mezcla de nitrógeno, dióxido de carbono y vapor de agua, luego el carbono incandescente convertirá el CO_2 en CO y el vapor de agua en H_2 . Estas atmósferas pueden ser usadas para endurecimiento, recocido y normalizado de aceros de alto carbono sin formación de escama o descarburización. La principal desventaja es su alto costo de operación.

Las atmósferas exotérmicas-endotérmicas son formadas por la combustión completa de una mezcla de gas combustible y aire, removiendo el vapor de agua y transformando el dióxido a monóxido de carbono por medio de una reacción con el gas combustible en una cámara catalizadora externamente calentada. Su costo de operación es un poco alto, lo cual le resta campo de aplicación.

Las atmósferas de amoníaco son de tres tipos y consistentes de nitrógeno e hidrógeno, éstas son:

Clase 601 (25% N_2 - 75% H_2)

Clase 621 (99% N₂ - 1% H₂)

Clase 622 (80% N₂ - 20% H₂)

La atmósfera utilizada en el presente trabajo para valorar la eficiencia de una atmósfera protectora corresponde a la clase 601, de base amoniaco y con 25% de nitrógeno y 75% H₂.

En el siguiente punto se hablará más detenidamente de esta atmósfera.

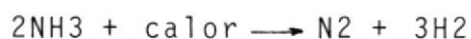
1.4 PROTECCION MEDIANTE ATMOSFERA DE NH₃ DISOCIADO

Amoniaco disociado es una atmósfera protectora de costo medio, su composición típica es 75% de hidrógeno y 25% de nitrógeno. El nitrógeno actúa como un gas completamente inerte durante el ciclo de calentamiento del acero, mientras que el hidrógeno se comporta como una fuente de gasreductor; por lo tanto la atmósfera generada será seca y libre de óxidos de carbono. Su punto de rocío es de -60°F, lo cual garantiza la ausencia completa de vapor de agua.

La atmósfera de amoniaco disociado se prepara calentando amoniaco en presencia de un catalizador de ní-

quel o hierro. La descomposición del amoniaco empieza a los 600°F, ésto quiere decir que a partir de esta temperatura se empezará a formar hidrógeno y nitrógeno.

La reacción que provoca la disociación del amoniaco es la siguiente:



es decir, que dos volúmenes de amoniaco generan 4 volúmenes de amoniaco disociado.

1.4.1 Acero Utilizado

La atmósfera de amoniaco disociado es ideal para cualquier porcentaje de carbono y contenido de elementos aleantes que pueda tener el acero, por lo tanto también puede ser usada en cualquier tratamiento térmico, sea éste temple, recocido o normalizado, etc.

Para el presente estudio se han realizado pruebas con acero AISI 01, el cual es un acero aleado con alto porcentaje de carbono, que presenta problemas de oxidación y descarburización seve-

ra en atmósferas comunes.

La composición química del acero AISI 01 es la siguiente:

Carbono	0.9%
Manganeso	1.20 %
Cromo	0.50%
Wolframio	0.50%
Vanadio	0.10%

1.4.2 Aplicaciones

La atmósfera protectora de amoníaco disociado se usa extensamente en el tratamiento térmico de piezas que estarán sometidas a una gran exigencia mecánica, por lo tanto deben estar libres en su superficie de posible oxidación y descarbonización que afecten sus propiedades mecánicas. Entre las aplicaciones más comunes tenemos: la fabricación de tornillos, herramientas en general, cuchillas, camisas de cilindros, moldes para la fabricación en la industria del plástico, etc.

Inclusive, este tipo de atmósfera se la utiliza para el tratamiento térmico de aceros inoxidable, donde la formación de carburos de cromo debe evitarse.

1.4.3 Ventajas y Desventajas

La atmósfera protectora de amoníaco disociado tiene las siguientes ventajas sobre los otros tipos de atmósferas protectoras:

- a) Son de alta calidad y pureza
- b) Hidrógeno y Nitrógeno son fácilmente producidos de la disociación del amoníaco, sin necesidad de un quemado o refinamiento.
- c) Son neutrales para todos los porcentajes de carbono del acero.
- d) Amoníaco viene en botellas fáciles de manejar y debido a su alta compresibilidad, es posible embotellarlo en mayores cantidades que otros gases.

Las desventajas de esta atmósfera son las siguientes:

- a) Su costo es alto, en comparación con atmósferas producidas de gas natural.
- b) Son explosivas en contacto con aire.
- c) Podrían causar nitruración no intencional.
- d) En caso de escapes, puede dar lugar a intoxicaciones.

1.5 ANALISIS DE LA COMPOSICION DE LA ATMOSFERA EN TRATAMIENTOS TERMICOS.

Mediante un correcto conocimiento de las leyes de equilibrio y de las actividades químicas relativas de los gases que conforman una atmósfera determinada, es posible pronosticar el grado de oxidación y descarburización que sufrirá un acero de alto contenido de carbono calentado en dicha atmósfera.

Es casi seguro afirmar que, la presencia de oxígeno en la atmósfera llevará en cuestión de minutos a la formación de escamas en la superficie del metal, además de una descarburización apreciable; una atmósfera con dióxido de carbono será fuertemente descarburizante hasta el grado de dejar la superficie metálica carente totalmente de carbono. Excesivo vapor de agua en la atmósfera también incrementará el efecto oxidante y

descarburizante de la atmósfera.

Todo ésto hace importante conocer la composición de los gases que entran a la cámara del horno; para realizar este análisis existen diversos aparatos, el más conocido es el Analizador de Orsat, el cual nos permite conocer el porcentaje de CO_2 , O_2 y CO presentes en la atmósfera, para ésto es necesario extraer una muestra de gases de la cámara del horno.

Si fuese importante conocer el porcentaje de vapor de agua presente en la atmósfera se utiliza un analizador del punto de rocío; y para atmósfera que tienen además gases tales como H_2 , CH_4 , N_2 , etc., és necesario utilizar un analizador más sofisticado como el cromatógrafo de gases.

Es posible estimar el grado de descarburización de un acero en una atmósfera que contenga gases descarburizantes, mediante la utilización de la primera Ley de Fick.

El diagrama de la Fig. 1.14 representa la condición de un acero después que la descarburización ha tomado lugar durante un tiempo t . La concentración de carbono

en la superficie ha sido reducida a cero. C_1 representa la concentración original de carbono, y C_2 la máxima solubilidad sólida de carbono en solución.

Se asume que los carburos disuelven instantáneamente para mantener C_2 en E (punto eutectoide), y que la constante de difusión es constante con el tiempo.

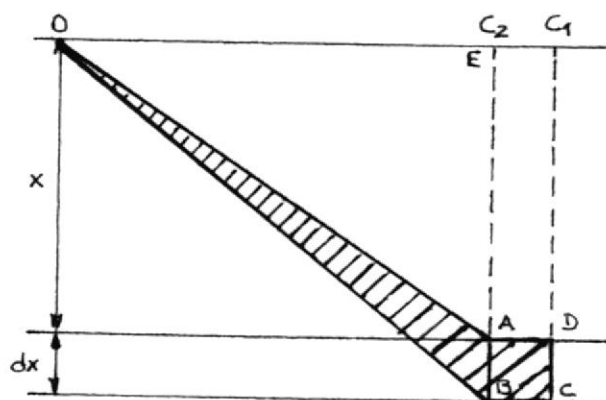


Fig. 1.14.- Condición de un acero descarburizado

En un tiempo dt , el carbono transferido de E a 0 está dado por la primera Ley de Fick:

$$dm = D \frac{C_2}{X} dt$$

En la Fig. 1.14, el carbono transferido está dado por la suma de las áreas AOB y ABCD.

$$dm = \frac{1}{2} C_2 dx + (C_1 - C_2) dx$$

$$D \frac{C_2}{X} dt = \frac{1}{2} C_2 dx + (C_1 - C_2) dx$$

$$D \frac{C_2}{X} dt = (C_1 - \frac{1}{2} C_2) X dx$$

$$D C_2 t = (C_1 - \frac{1}{2} C_2) \frac{X^2}{2}$$

$$\underline{\underline{X^2 = \frac{4 D C_2 t}{2 C_1 - C_2}}} \quad (\text{Ec. 9})$$

Si ΔW es la pérdida de peso por unidad de área superficial, entonces:

$$\underline{\underline{W = X (C_1 - \frac{1}{2} C_2)}} \quad (\text{Ec. 10})$$

Cálculo de la descarburización de un acero AISI 01.-

$$C_1 = 0.9 \text{ gr/cm}^3$$

$$C_2 = 0.8 \text{ gr/cm}^3$$

$$R = 1.987 \text{ cal/gr}^\circ\text{K}$$

$$T = 1123^\circ\text{K}$$

Según la Tabla 1.3 tenemos que para difusión de carbono en hierro gamma:

$$D_0 = 0.21 \text{ cm}^2/\text{seg}$$
$$E = 33800 \text{ cal/gr.}$$

entonces aplicando la fórmula (3) tenemos que:

$$D = 5.543 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{seg}$$

Según la tabla 1.2 tenemos que:

$$D_0 = 0.15 \text{ cm}^2/\text{seg}$$
$$E = 32000 \text{ cal/gr}$$

por lo tanto, la constante de difusión es:

$$D = 8.87 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{seg}$$

Si el valor de D varía entre un mínimo y un máximo, entonces los valores de la profundidad de la capa des-carburizada X y la pérdida de peso ΔW calculados variarán dentro de un rango. La Tabla 1.4 nos muestra estos valores en función del tiempo.

t (min)	X (mm)		W (gr/cm ²)	
	(mínima)	(máxima)	(mínima)	(máxima)
20	0.145	0.184	0.00725	0.00920
40	0.206	0.260	0.01030	0.01300
60	0.252	0.310	0.01260	0.01595
80	0.291	0.368	0.01455	0.01840
100	0.325	0.412	0.01625	0.02060
120	0.357	0.451	0.01785	0.02255
140	0.385	0.488	0.01925	0.02440
160	0.412	0.522	0.02060	0.02610
180	0.437	0.553	0.02185	0.02765

Tabla 1.4.- Cálculo Teórico de la Descarburización del Acero AISI 01 a una temperatura de de 850°C.

C A P I T U L O I I

TRABAJO EXPERIMENTAL

Los experimentos para estudiar los efectos de la oxidación y descarburización, y la eficiencia de una atmósfera protectora, han sido llevados de acuerdo con la secuencia de operaciones que describe la técnica operativa.

2.1 TECNICA OPERATIVA

El procedimiento que se sigue para los ensayos sin atmósfera protectora es el siguiente:

1. Calentar el horno de mufla hasta una temperatura de 850°C.
2. Si la atmósfera a ensayar es dióxido de carbono (CO_2), introducir al horno un flujo constante de 0.57 metros cúbicos por hora (m^3/h) de este gas.
3. Ingresar las probetas previamente pesadas en una balanza química, al horno de mufla.

4. Retirar las probetas cada 20 minutos de austenizado y enfriarlas en agua.
5. Secar las probetas en una cámara deshumectante, y volverlas a pesar.
6. Realizar ensayos metalográficos.
7. Medir dureza y espesor de zona descarburizada.

El procedimiento que se sigue para poner en marcha el equipo generador de atmósfera protectora es el siguiente:

1. Calentar el horno de mufla hasta una temperatura de 850°C.
2. Encender el generador de atmósfera hasta una temperatura de 850°C.
3. Regular el control de flujo de gas amoníaco (NH_3) en 0.57 metros cúbicos por hora (m^3/h).
4. Limpieza e introducción de las probetas en una cámara deshumectante para su pesaje previo al trata -

miento.

5. Realizar el barrido de la cámara del horno antes de colocar las probetas.
6. Ingresar las probetas al horno de acuerdo al programa de experimentación.
7. Retirar las probetas cada 20 minutos de austenizado y enfriarlas en agua.
8. Secar las probetas en la cámara deshumectante y volverlas a pesar.
9. Realizar ensayos metalográficos.
10. Medir dureza y espesor de zona descarburizada.

Instrumentos y equipos utilizados en el trabajo experimental.

- a) Horno de mufla, marca LINDBERG, modelo TRET-ALL, cuyo rango de temperatura va desde 0°C hasta 1100°C.
- b) Horno generador de atmósfera marca LINDBERG, modelo

Atmo-Gen LAM-100

c) Microdurómetro marca RIEHLE-KENTRON, modelo Ak-8.

Material usado

El acero utilizado en la práctica es el acero AISI 01, que se encuentra en el mercado en condiciones de recocido.

Su composición química es la siguiente:

Carbono	0.90 %
Cromo	0.50 %
Manganeso	1.20 %
Wolframio	0.50 %
Vanadio	0.10 %

Tabla 2.1.- Composición Química del
Acero Recocido AISI 01.

2.1.1 Horno de Tratamiento

El tipo de horno usado, es un horno de mufla mar-

ca TREET-ALL, con rango de temperatura 0-1100°C, el mismo que se muestra en la Fig. 2.1.

Dicho horno posee un control automático de temperatura, gracias a un pirómetro marca HONEYWELL (Fig. 2.2). Además posee tres entradas por la parte posterior, que comunican al interior de la cámara, uno de ellos está conectado a la tubería que viene desde el generador de atmósfera, otro está conectado a la termocupla, y el último permite la circulación de los gases o la entrada de CO₂.

2.1.2 Generador de Atmósfera

El equipo generador de atmósfera es el que realiza la disociación del amoniaco en sus constituyentes gaseosos, los mismos que son utilizados para proteger la superficie del acero.

El generador de atmósfera utilizado es de marca LINDBERG, ATMO-GEN, modelo LAM 100 (Fig. 2.3), el cual viene ensamblado de acuerdo al Diagrama (Anexo A).

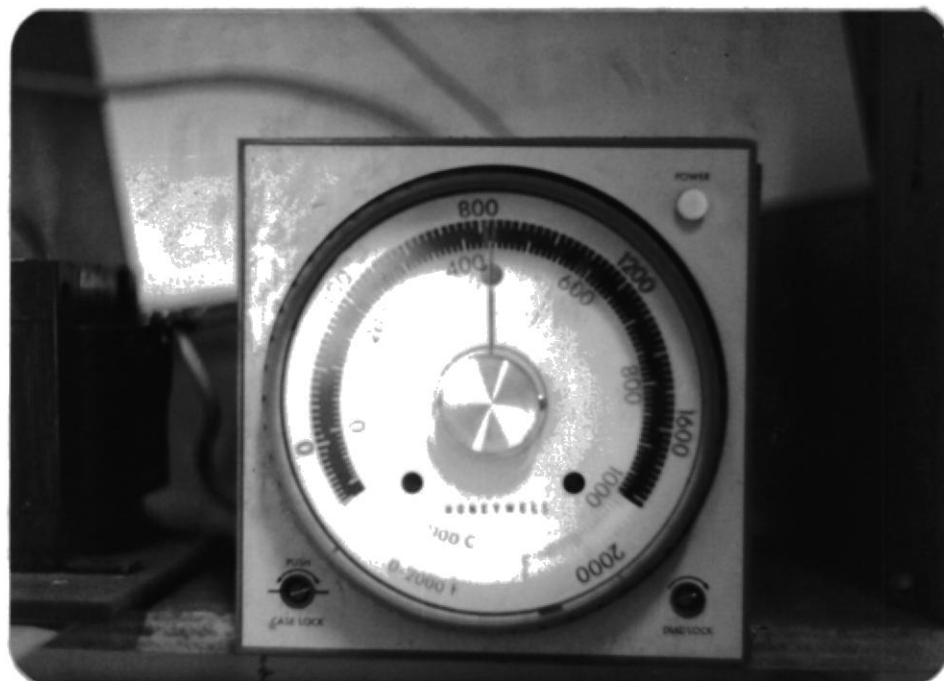


Fig. 2.2.- Control Automático de Temperaturas
Marca HONEYWELL.



Fig. 2.3.- Generador de Atmósfera ATMO GEN,
Modelo LAM 100, marca LINDBERG

A temperatura y presión atmosférica una libra de amoníaco ocupa aproximadamente 0.6 metros cúbicos, una vez disociado el volumen se duplica, o sea 1.2 metros cúbicos, estos datos permiten calcular el flujo necesario para el proceso.

El sistema debe operar a una presión aproximada de 0.003 Kg/mm^2 , por lo cual el sistema tiene incorporado un regulador de presión para reducir la presión de salida desde la botella de amoníaco, que es de 0.0621 Kg/mm^2 .

Operación.- Con las válvulas del sistema abiertas el amoníaco empieza a fluir, y en el generador de atmósfera a 850°C sufre la separación del nitrógeno e hidrógeno, los cuales fluyen hacia la cámara de tratamiento con un flujo controlado de 0.57 metros cúbicos por hora.

No es conveniente abrir la cámara del horno mientras estén circulando los gases del amoníaco disociado, debido a la violenta explosión que se produce en contacto con el aire.

La instalación del sistema está representada en

el Diagrama del Anexo A.

2.1.3 Puesta en marcha del Equipo

La puesta en marcha del equipo es un punto de gran importancia, porque permitirá operar el equipo generador de atmósfera y realizar el tratamiento con una mayor eficiencia y seguridad.

A continuación está detallada la secuencia a seguir:

- a) Encendido del horno de mufla hasta la temperatura necesitada por el tratamiento, en este caso 850°C.
- b) Encender el horno generador de atmósfera hasta 850°C, manteniendo las válvulas cerradas para prevenir el flujo antes de tiempo.
- c) Luego de alcanzar la temperatura requerida en el generador, se abren las válvulas permitiendo el ingreso de amoniaco disociado a la cámara de tratamiento, con un flujo de 0.57 m³/h aproximadamente.

- d) La primera inyección se la realiza con la cámara de tratamiento abierta, para barrer con los gases existentes en su interior, de esta manera se previene la oxidación o la formación de mezclas explosivas del hidrógeno con el aire.

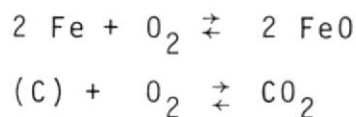
- e) Después del barrido del aire de la cámara, se colocan las piezas en el horno y se retiran después del tiempo programado para el tratamiento.

- f) Para apagar el sistema, se cierra el suministro desde la botella de amoníaco, cuando el flujómetro haya descendido hasta cero, cerrar las válvulas, para finalmente apagar el horno generador de atmósfera.

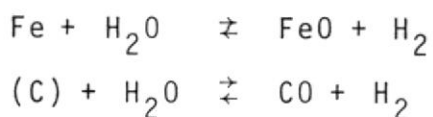
2.2 CONTROL DE ATMOSFERA

Los efectos del aire normal para provocar la oxidación durante los tratamientos térmicos del acero son atribuidas al alto contenido de oxígeno que posee, el cual también ejerce una acción descarburizante por combinación con el carbono disuelto en austenita para formar

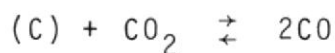
dióxido de carbono.



Sin embargo, debemos considerar que el aire además de oxígeno y nitrógeno contiene pequeñas cantidades de vapor de agua y dióxido de carbono, gases muy activos a altas temperaturas. El vapor de agua se encuentra en el medio ambiente en función de su grado de humedad, su acción para con la superficie del acero es básicamente oxidante, aunque también descarburizante.



El dióxido de carbono es el gas más descarburizante para el acero, por la gran facilidad que tiene para combinarse con el carbono disuelto en austenita a altas temperaturas y formar monóxido de carbono.



Cuando la superficie metálica queda completamente ca-

rente de carbono, entonces el dióxido de carbono se convertirá en un gas oxidante.



Para expulsar todos estos gases que resultan perjudiciales para el acero es necesario efectuar el barrido de la cámara del horno, antes de introducir las piezas para el tratamiento con atmósfera protectora.

2.2.1 Porcentaje de Disociación

Como parte importante en el control de atmósfera, debe estar incluido el control del porcentaje de disociación que sufre el amoniaco a una temperatura dada, lamentablemente el equipo generador de atmósfera no está equipado con algún instrumento que pueda realizar esta medición. Es por esta razón que nos basamos en la recomendación del fabricante, de que el grado de disociación óptima para obtener una atmósfera protectora es del orden del 30% a una temperatura de 850°C.

2.2.2 Control de Temperatura

Este es uno de los parámetros más importantes sobre los resultados finales, por esta razón es que se utilizan controles muy sofisticados de pirometría.

La pirometría se ocupa de la medición de altas temperaturas, generalmente superiores a los 500°C, los instrumentos utilizados para este propósito se conocen como pirómetros.

La termometría se ocupa de la medición de temperaturas inferiores a los 500°C y los instrumentos utilizados para este propósito se los llama termómetros.

Los hornos utilizados para el tratamiento térmico con atmósfera protectora, poseen controles de temperaturas similares, de marca HONEYWELL, con un rango de medición de temperatura de 0 - 100°C voltaje de funcionamiento 240 v con un grado de precisión de $\pm 2^\circ\text{C}$. Dicho control se lo puede observar en la Fig. 2.2

Antiguamente, el control de temperatura necesario en los procesos de tratamientos térmicos, sólo lo podían realizar artesanos experimentados, los cuales se basaban solamente en la estimación visual. El tratamiento térmico actual demanda un control estricto sobre la temperatura para obtener el éxito esperado en la microestructura y propiedades resultantes. La gama de temperaturas en que puede ser templada una pieza de acero, es bastante pequeña, por lo tanto la adopción de un sistema de control pirométrico es determinante.

En el caso de aceros para herramientas, el calentamiento a una temperatura inferior a la óptima para temple, debido a un pésimo sistema de control de temperatura, producirá piezas con durezas muy por debajo de la dureza máxima para este material.

2.2.3 Control de Presión

El control de presión es de vital importancia para el tratamiento térmico con atmósfera protectora de amoníaco disociado, ya que el amoníaco no puede entrar al generador de atmósfera a

una presión superior a 0.005 Kg/mm^2 , es por esta razón que el sistema viene con un reductor de presión de 0.0625 Kg/mm^2 , que es la presión que entrega el tanque de amoniaco y que tiene en la línea de alta el sistema a 0.003 Kg/mm^2 que debe ser la presión de entrada al Atmo-Gen.

Estas presiones están controladas por dos manómetros, uno para la línea de alta y el otro para la línea de baja presión. El regulador de presión es del rango de reducción de 0.125 Kg/mm^2 a 0.003 Kg/mm^2 , el sistema cuenta además con dos válvulas de seguridad, las cuales sirven de alivio en caso de que los límites de presión sean superados, tanto en la línea de baja, como en la de alta presión.

El generador de atmósfera cuenta además con un medidor de flujo por medio del cual sabemos la cantidad de amoniaco que entra al Atmo-Gen, es importante señalar que el volumen de gas disociado es el doble del que entra al generador. El sistema de control de presión se lo observa en la Fig.-2.4.



Fig. 2.4.- Controles de Presión del Sistema.

2.3 EXPERIENCIAS EN ACERO AISI 01 CON DIFERENTES ATMOSFERAS

Para poder analizar el efecto que tienen los gases activos sobre el acero, y aplicar los métodos conocidos para determinar el grado de descarbonización de la superficie, se han realizado experiencias en una atmósfera que contiene oxígeno, como es el aire; en otra que contenga dióxido de carbono, con la finalidad de poder evaluar mediante comparación de resultados la efectividad de una atmósfera protectora.

Las experiencias realizadas son las siguientes:

- a) Temple en agua con una atmósfera de aire normal.
- b) Temple en agua con una atmósfera generada por un flujo constante de $0.57 \text{ m}^3/\text{h}$ de dióxido de carbono.
- c) Temple en agua con una atmósfera de amoníaco disociado.

Se escogió el tratamiento térmico de temple, por su gran aplicación en aceros de alto contenido de carbono y para asegurarnos que la descarbonización producida sea solo debido al ciclo de calentamiento del metal

en la atmósfera analizada.

2.4 ENSAYOS DE CONTROL

Posterior a las experiencias con diferentes atmósferas para el acero AISI 01, se procedió a realizar los ensayos de laboratorio, a fin de estudiar los parámetros involucrados en la determinación del grado de descarburización del acero, son éstos: dureza superficial, espesor d capa descarburizada, pérdida de peso y tiempo de austenizado de las piezas en el horno.

2.4.1 Dureza Vs Tiempo de Austenización a temperatura constante.

Para poder tomar medidas del número de dureza de las probetas tratadas, se realiza un adecuamiento de las probetas, que consiste en un corte transversal, pulido de desbaste y ataque químico con nital al 2%, todo ésto es debido al uso obligado de un microdurómetro, porque la zona descarburizada es muy pequeña, y un durómetro nos daría lecturas promedio de la superficie.

Con el microdurómetro se toman lecturas desde la

superficie hacia el interior de la probeta cada 50 micras, y luego mediante tablas se realiza la conversión de dureza Knoop a Rockwell.

En las siguientes tablas se dan los valores correspondientes a las mediciones, cuyos valores están graficados para diferentes atmósferas.

2.4.2 Profundidad de la Descarburización Vs Tiempo de Austenización a Temperatura Constante

La microestructura de un acero templado no es apta para observar descarburización en la superficie, y la pequeña zona de ferrita libre que se observa no es un cuadro verdadero de la descarburización producida.

Para poder apreciar y medir con nitidez el espesor de la capa descarburizada, es necesario realizar un recocido total en una atmósfera de nitrógeno puro, un gas completamente inerte para el acero, con la nueva microestructura conseguida es fácil distinguir el espesor descarburizado mediante la observación de la variación de carburos.

2.4.3 Variación de peso Vs tiempo de austenización a Temperatura constante

Los ensayos de variación en peso nos permiten comparar el grado descarburizante de las atmósferas. Este ensayo consiste en pesar las probetas antes de introducirlas al horno, para ésto las probetas deberán estar limpias y completamente secas.

Posterior al tratamiento se realiza otra vez el pesaje de las probetas, y la pérdida de peso producida se divide para el área superficial, con el fin de obtener variaciones de peso por unidad en área.

Para el secado de las probetas, se introducen en una cámara hermética con silica gel, el cual absorbe la humedad de las probetas.

2.4.4 Metalografía

Para efectuar este ensayo, se cortaron seccionalmente las probetas, luego fueron preparadas metalográficamente para su observación, a fin de determinar la microestructura del tratamiento.

D U R E Z A R_c

t (min)	Distancia desde la superficie, en mm.									
	0.050	0.100	0.150	0.200	0.250	0.300	0.350	0.400		
20	58.5	58.5	62.5	66.0	66.0	66.0	66.0	66.0	66.0	66.0
40	57.1	58.5	61.9	66.0	66.0	66.0	66.0	66.0	66.0	66.0
60	56.2	58.5	61.0	64.0	65.8	66.0	66.0	66.0	66.0	66.0
80	54.5	57.2	59.5	61.3	62.6	64.6	66.0	66.0	66.0	66.0
100	52.0	54.5	56.5	58.5	61.4	64.0	66.0	66.0	66.0	66.0
120	51.4	52.0	53.5	57.0	61.0	64.0	66.0	66.0	66.0	66.0
140	50.0	50.5	51.0	52.2	58.5	61.9	65.2	65.5	65.5	65.5
160	48.0	48.5	49.2	49.7	53.5	59.5	64.3	65.5	65.5	65.5
180	46.5	46.5	48.0	48.1	50.7	56.0	62.6	65.2	65.2	65.2

Tabla 2.2.- Mediciones de durezas en un acero AISI 01, tratado en una atmósfera de aire normal, a una temperatura de 850°C.

D U R E Z A R_c

t (min)	Distancia desde la superficie en mm.									
	0.050	0.100	0.150	0.200	0.250	0.300	0.350	0.400		
20	54.5	57.6	61.5	66.0	66.0	66.0	66.0	66.0	66.0	66.0
40	52.4	56.0	61.5	65.0	66.0	66.0	66.0	66.0	66.0	66.0
60	50.0	51.4	58.5	62.6	65.7	65.5	66.0	66.0	66.0	66.0
80	48.5	50.5	56.0	58.2	62.7	64.5	66.0	66.0	66.0	66.0
100	44.4	48.7	51.7	53.5	58.5	63.4	66.0	66.0	66.0	66.0
120	43.2	45.0	48.5	50.4	54.4	61.5	64.5	65.2	65.0	65.0
140	42.5	43.5	45.6	46.6	49.5	57.5	62.3	65.0	64.1	64.1
160	41.0	41.5	43.7	46.0	48.5	55.0	60.0	64.1	63.3	63.3
180	39.0	40.4	42.4	43.0	45.2	52.0	58.8	63.3	63.3	63.3

Tabla 2.3.- Mediciones de durezas en un acero AISI 01, tratado en una atmósfera de CO₂, a una temperatura de 850°C.

D U R E Z A R_c

t (min)	Distancia desde la Superficie en mm.							
	0.050	0.100	0.150	0.200	0.250	0.300	0.350	0.400
20	66.0	66.0	66.0	66.0	66.0	66.0	66.0	66.0
40	65.5	65.7	66.0	66.0	66.0	66.0	66.0	66.0
60	65.5	65.5	66.0	66.0	66.0	66.0	66.0	66.0
80	65.5	65.5	65.5	66.0	66.0	66.0	66.0	66.0
100	65.5	65.5	65.5	66.0	66.0	66.0	66.0	66.0
120	65.1	65.5	65.5	66.0	66.0	66.0	66.0	66.0
140	64.2	65.2	65.5	66.0	66.0	66.0	66.0	66.0
160	64.0	64.5	65.3	66.0	66.0	66.0	66.0	66.0
180	63.0	64.5	65.1	66.0	66.0	66.0	66.0	66.0

Tabla 2.4.- Mediciones de durezas en un acero AISI 01, tratado en una atmósfera de NH₃ DISOCIADO a una temperatura de 850°C.

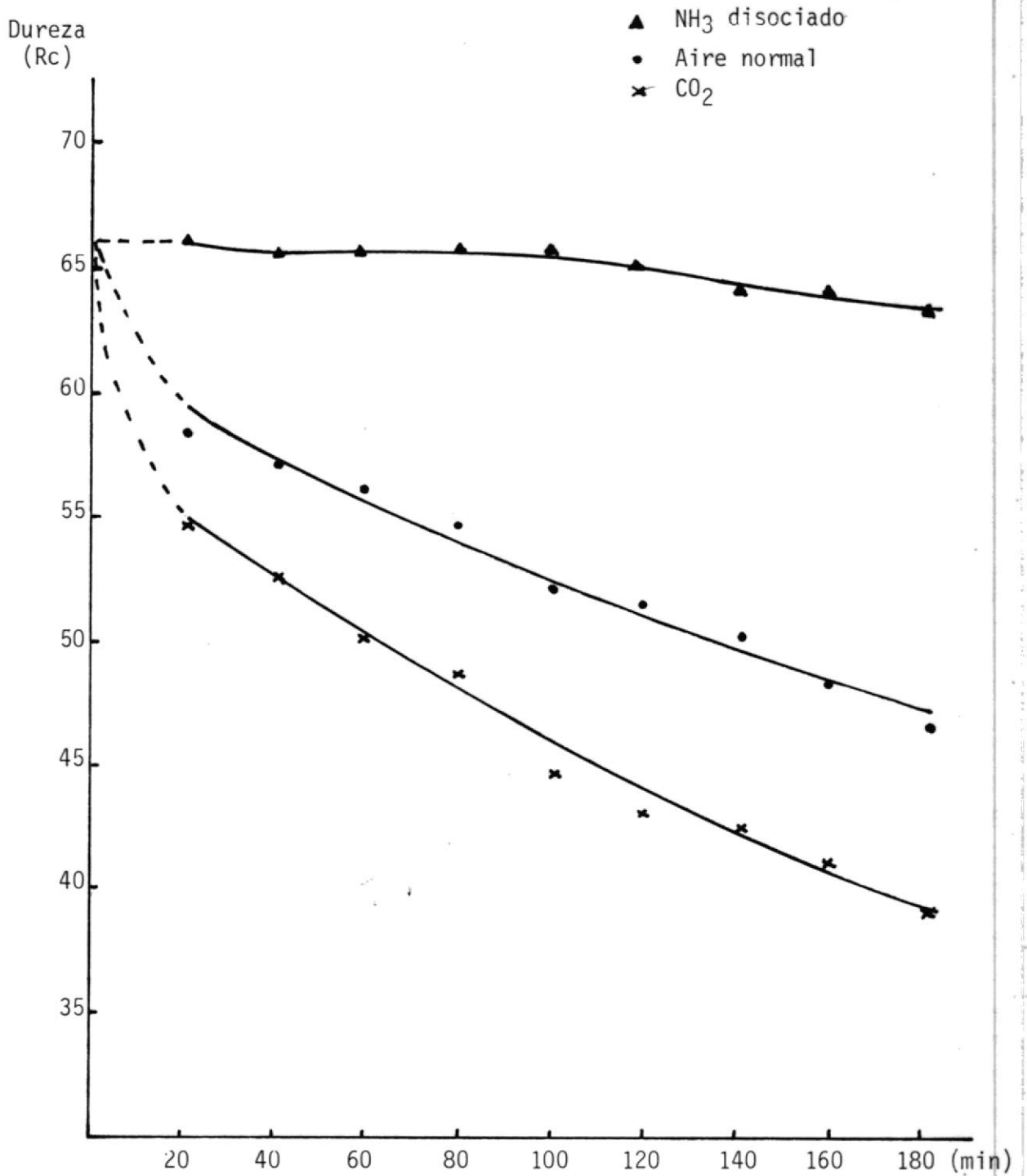


Fig. 2.5.- Dureza a una distancia de 0.050 mm. de la superficie Vs Tiempo de austenización en diferentes atmósferas. Material Acero AISI 01. Temperatura de Tratamiento 850°C.

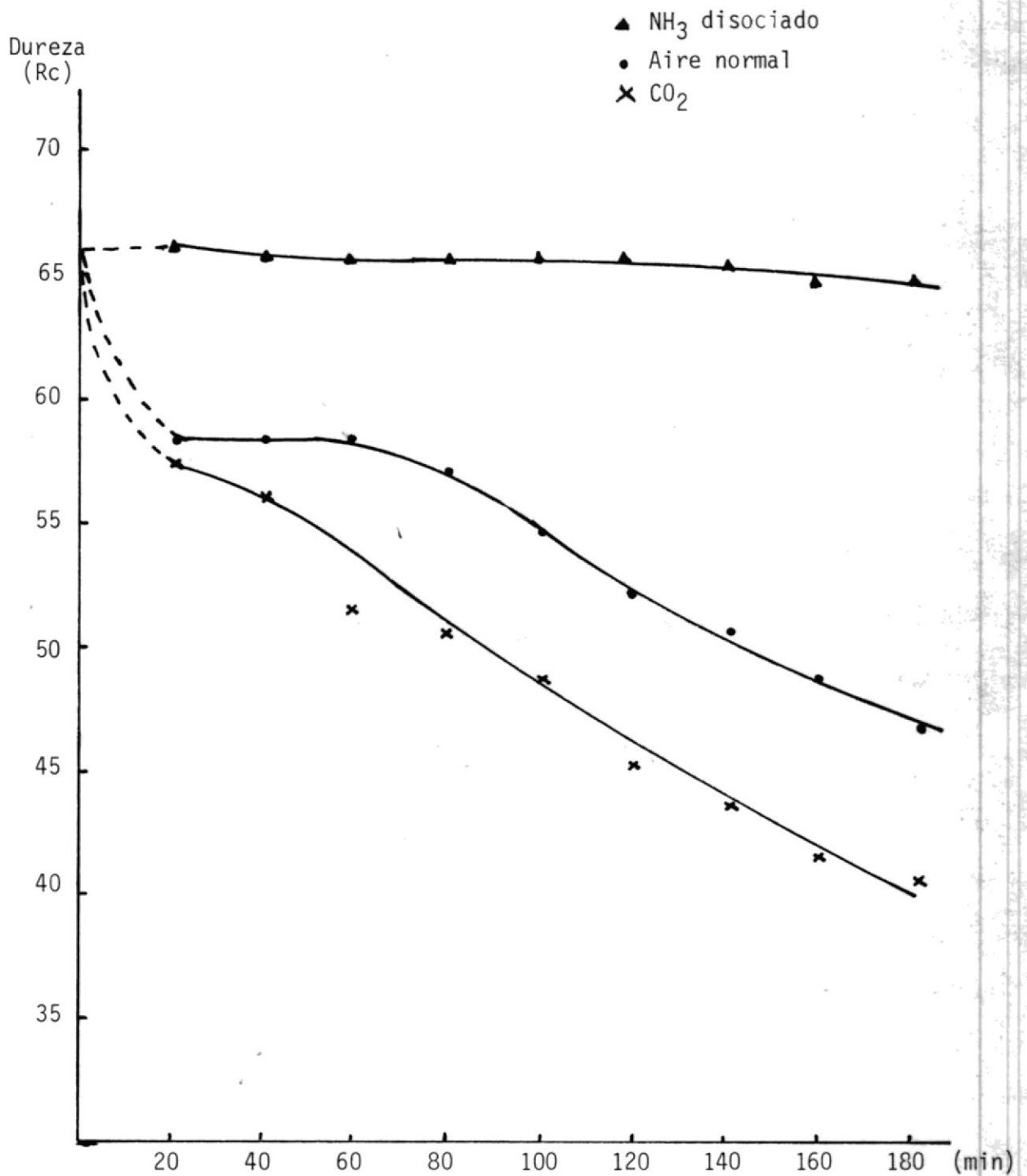


Fig. 2.6.- Dureza a una distancia de 0.100 mm. de la superficie Vs tiempo de austenización en diferentes atmósferas. Material Acero AISI 01. Temperatura de Tratamiento 850°C.

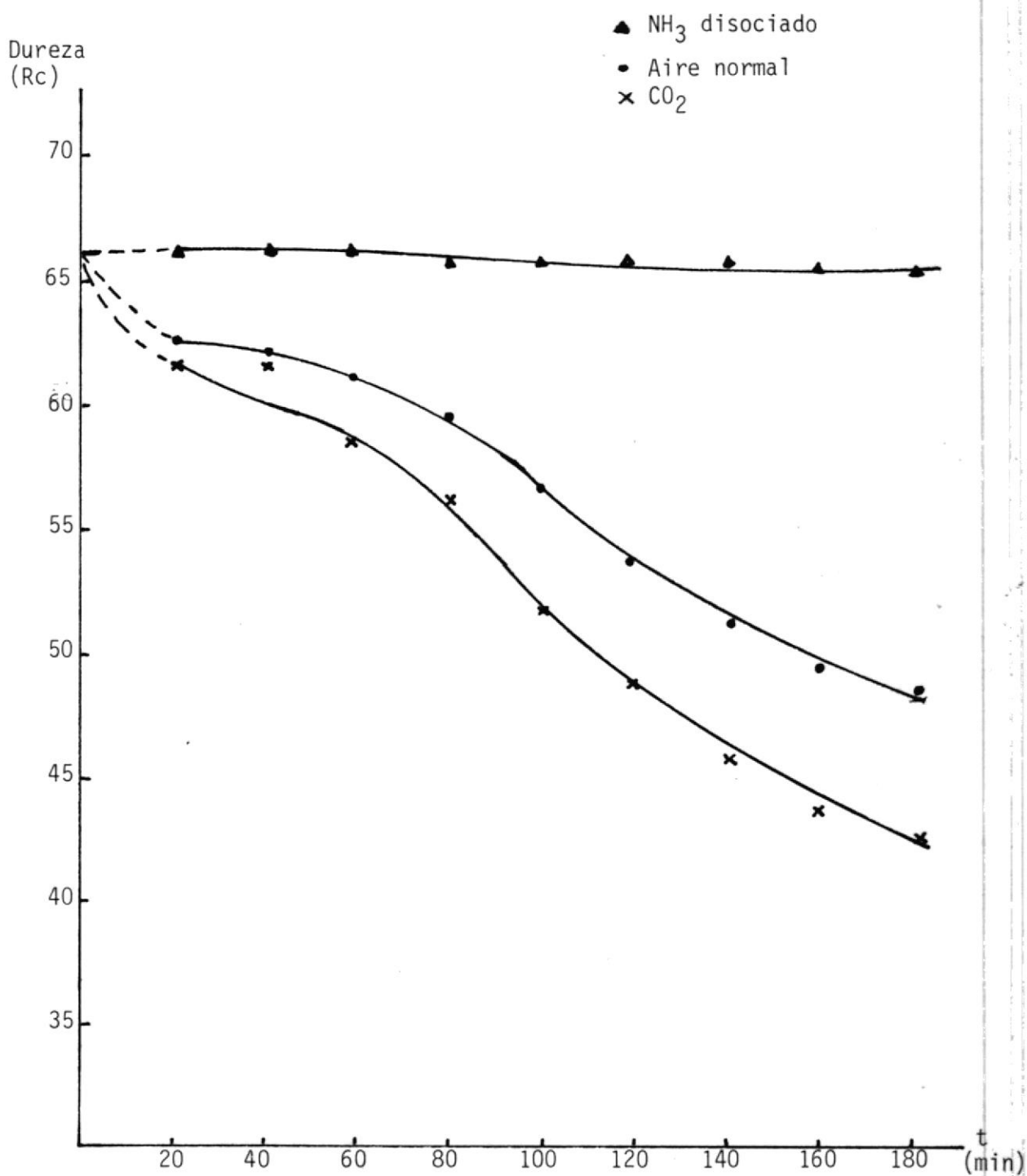


Fig. 2. 7.- Dureza a una distancia de 0.150 mm. de la Superficie Vs tiempo de austenización en diferentes atmósferas. Material Acero AISI 01, Temp. de Tratamiento 850°C.

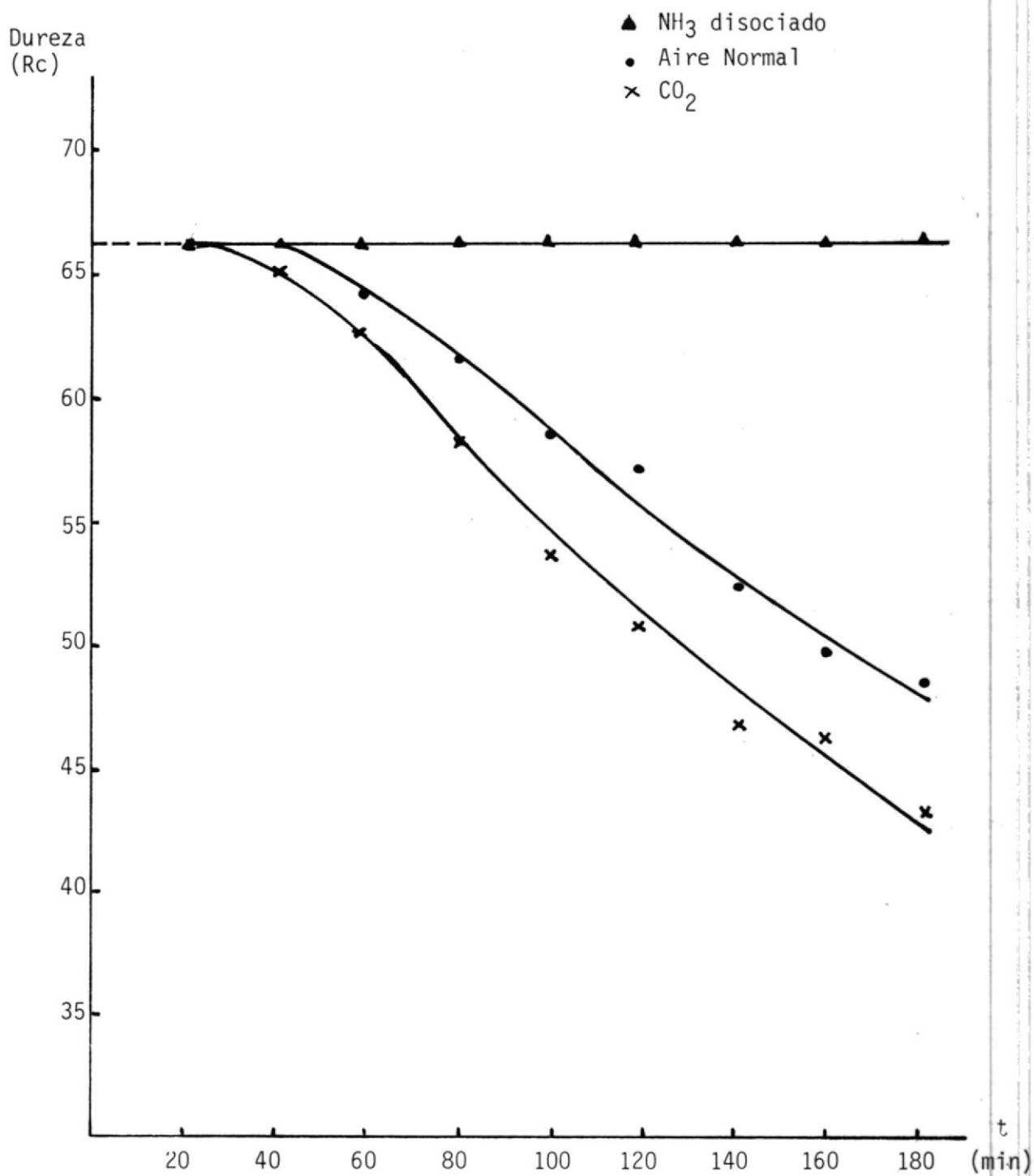


Fig. 2.8 .- Dureza a una distancia de 0.200 mm. de la Superficie Vs tiempo de austenización en diferentes atmósferas. Material Acero AISI 01, Temp. de Tratamiento 850°C.

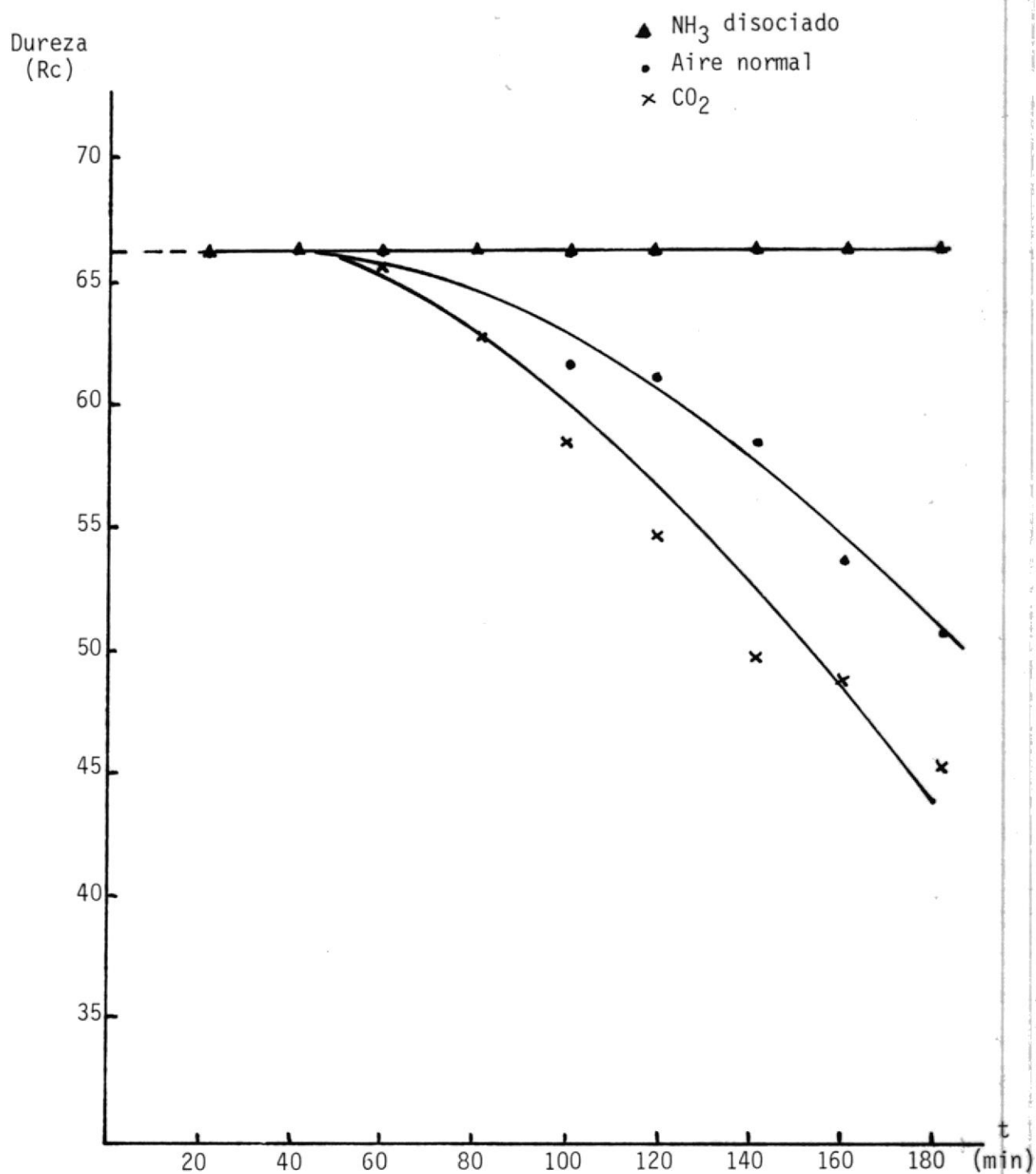


Fig. 2.9 .- Dureza a una distancia de 0.250 mm. de la superficie Vs. Tiempo de austenización en diferentes atmósferas. Material Acero AISI 01. Temp. de Tratamiento 850°C.

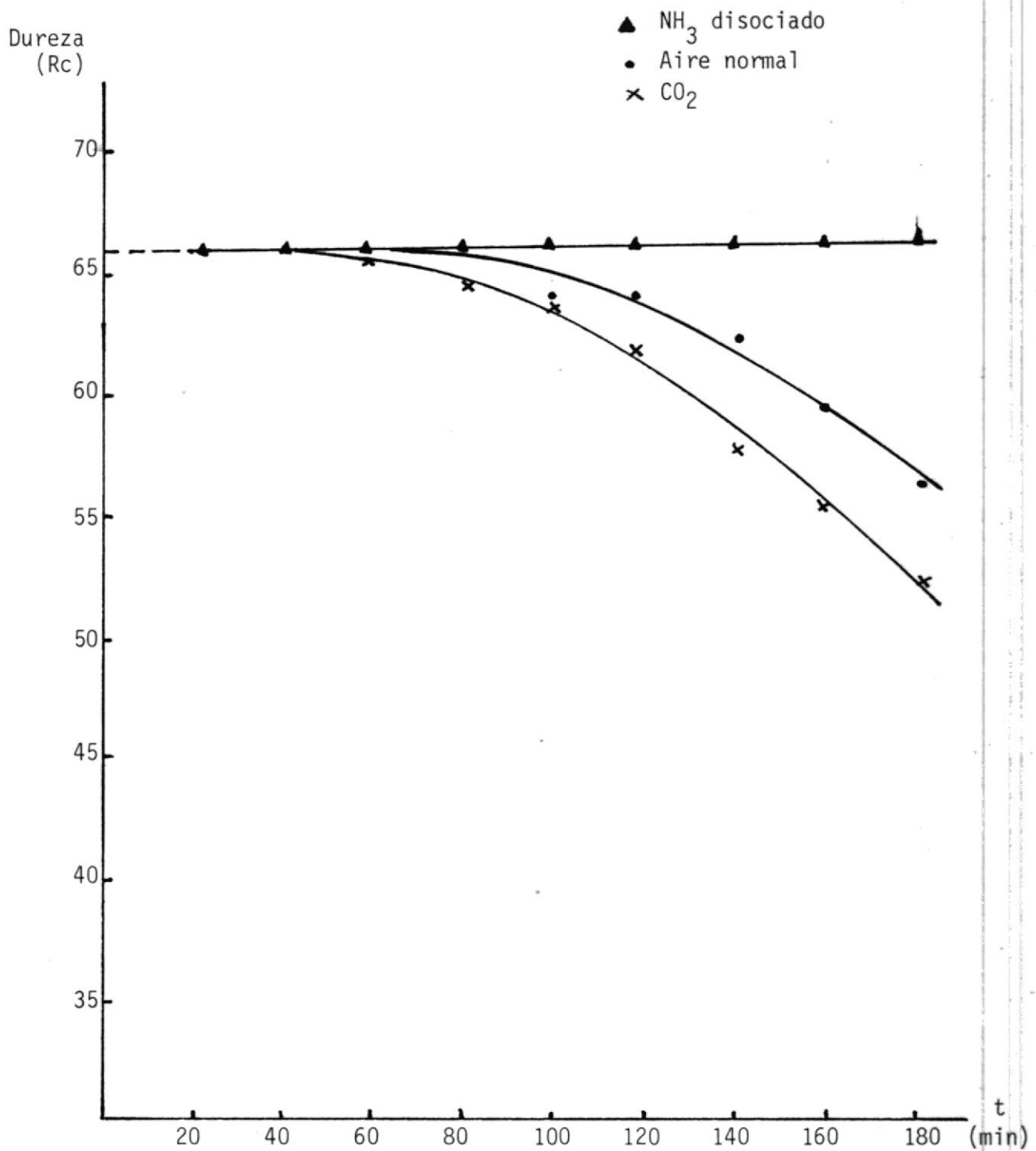


Fig. 2.10.- Dureza a una distancia de 0.300 mm. de la superficie Vs tiempo de austenización en diferentes atmósferas. Material Acero AISI 01. Temp. de Tratamiento 850°C.

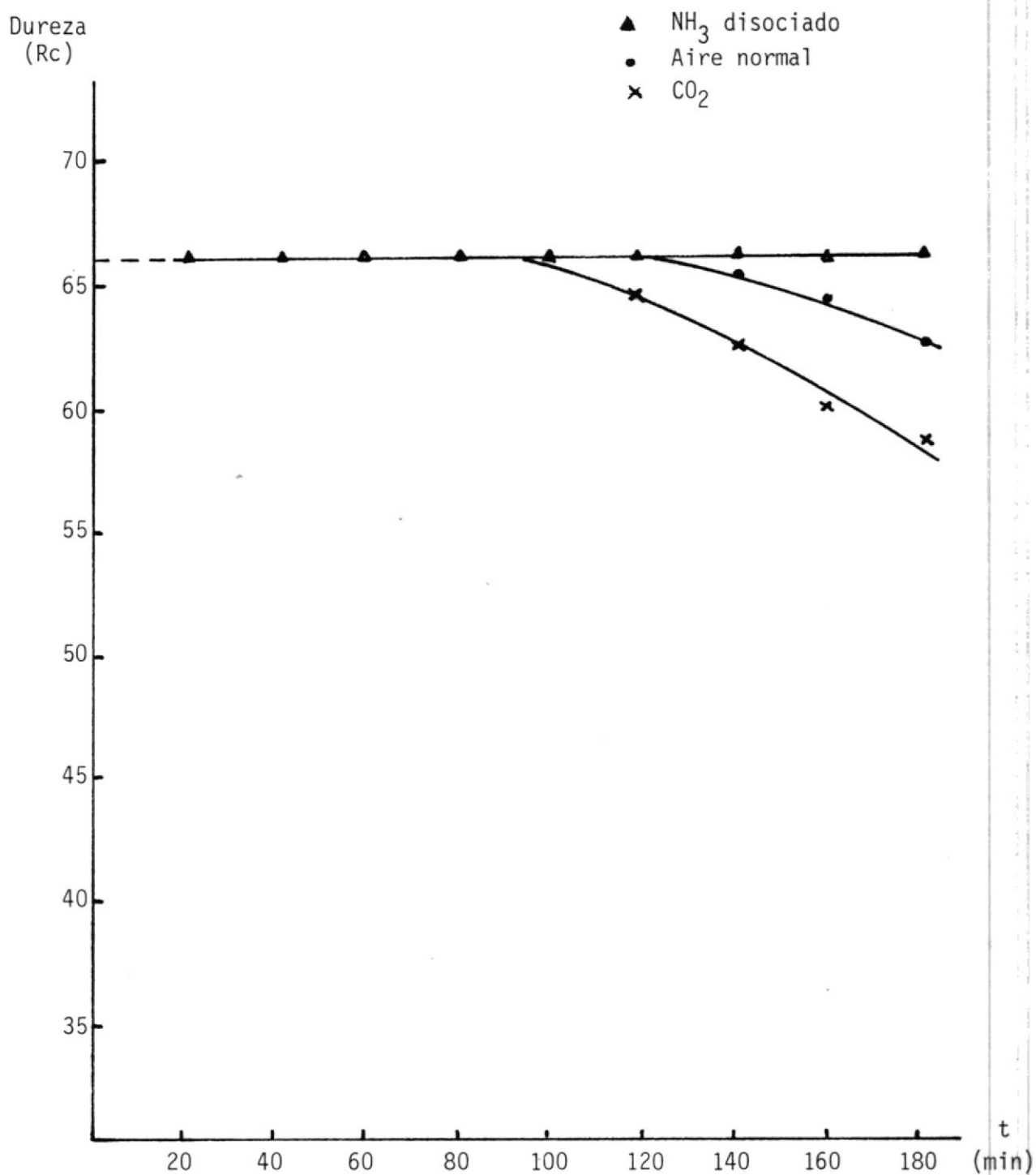


Fig. 2.11.- Dureza a una distancia de 0.350 mm. de la Superficie Vs tiempo de austenización en diferentes atmósferas. Material Acero AISI 01. Temp. de tratamiento 850°C.

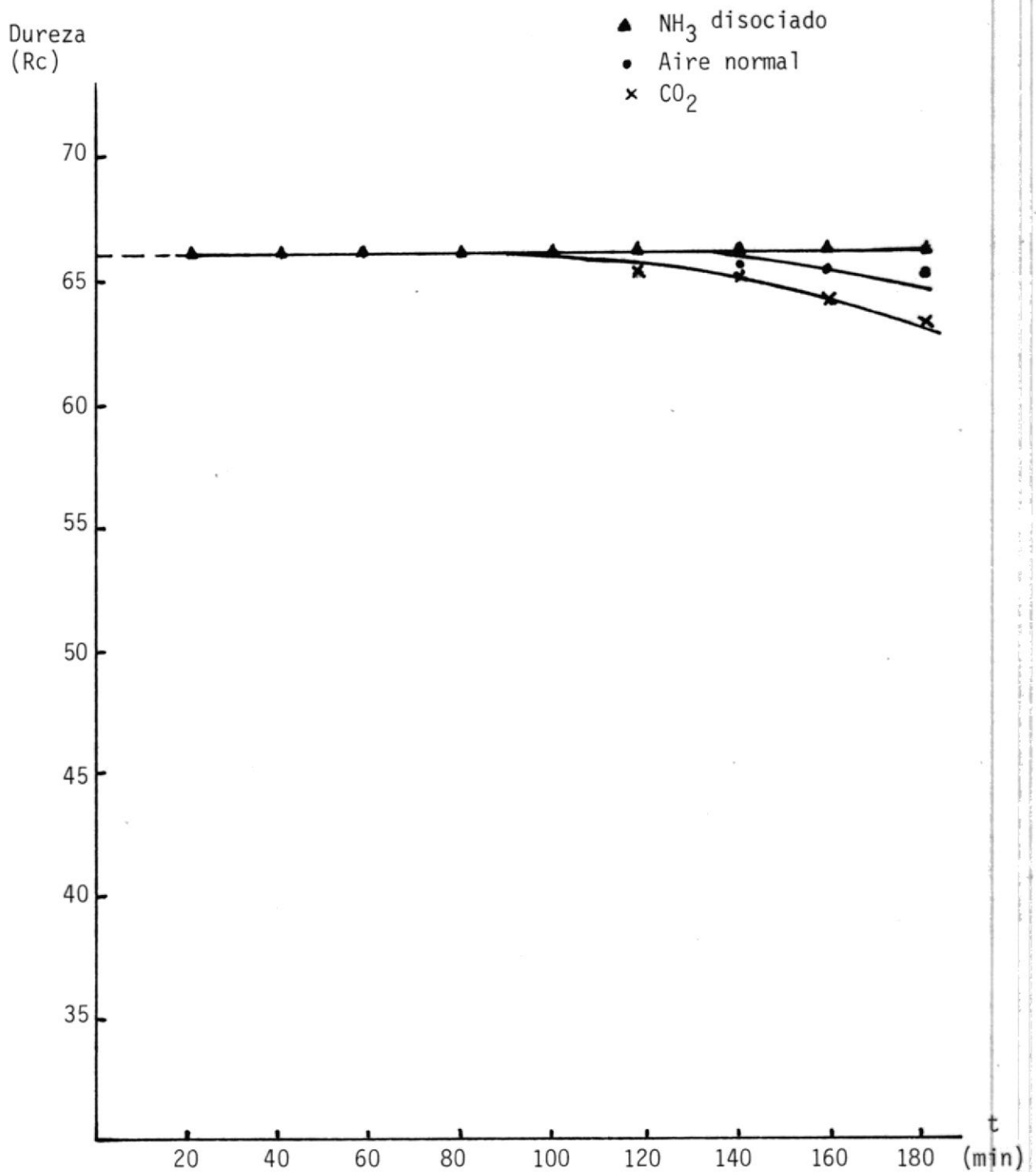


Fig. 2.12.- Dureza a una distancia de 0.400 mm. de la superficie Vs. Tiempo de austenización en diferentes atmósferas. Material Acero AISI 01. Temp. de Tratamiento 850°C.

t (min)	Profundidad de la Descarburización (mm)		
	A I R E	CO ₂	NH ₃ disociado
20	0.120	0.150	---
40	0.160	0.220	---
60	0.210	0.260	0.010
80	0.250	0.290	0.035
100	0.280	0.350	0.055
120	0.310	0.390	0.070
140	0.350	0.440	0.090
160	0.380	0.470	0.105
180	0.410	0.500	0.115

Tabla 2.5.- Profundidad de la descarburización del acero
ACERO AISI 01 tratado en diferentes atmósferas,
a una temperatura de 850°C.

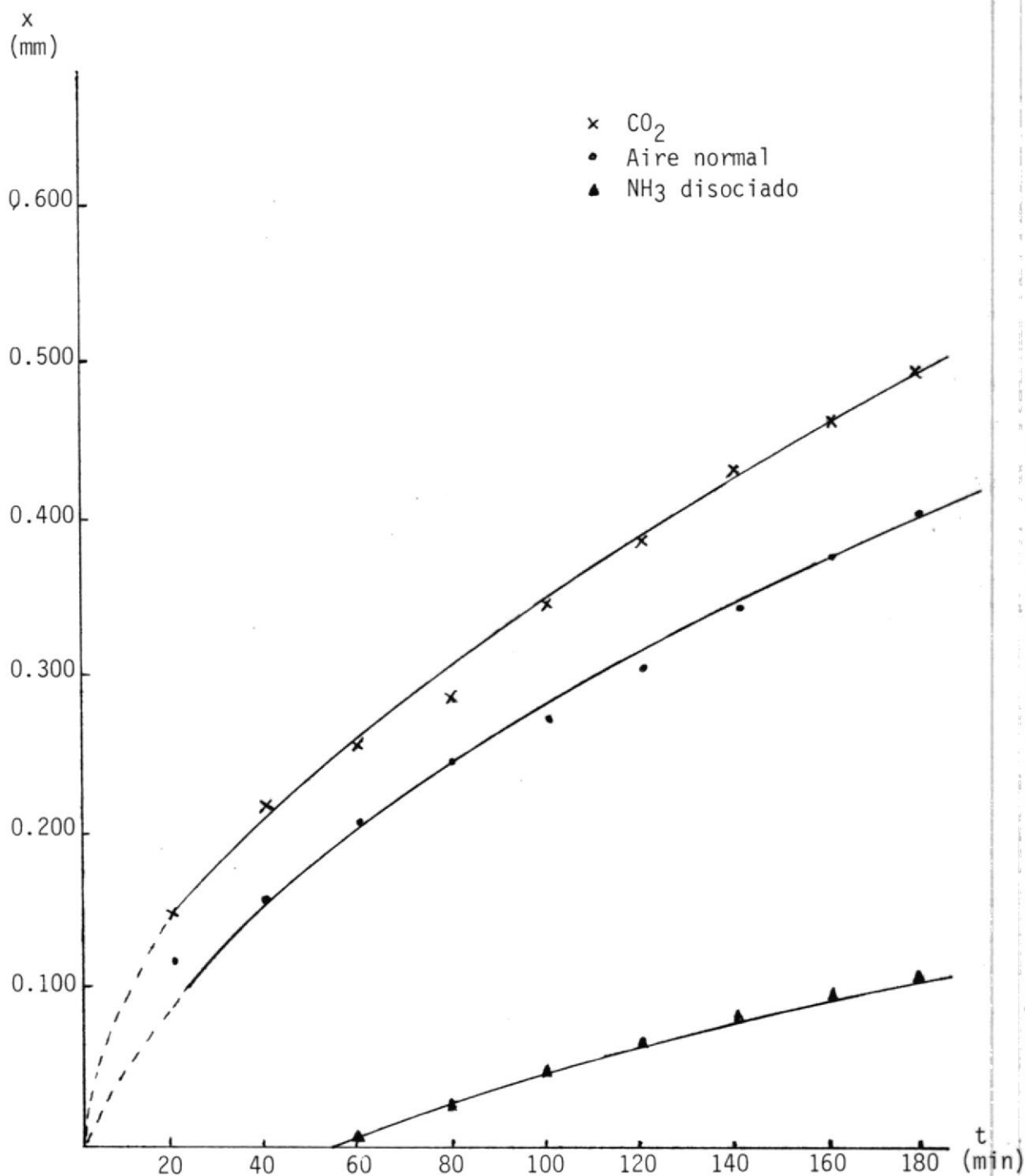


Fig. 2.13.- Profundidad de la decarburización Vs Tiempo de austenización en diferentes atmósferas. Material Acero AISI 01. Temperatura 850°C.

t (min)	Peso inicial (grs.)	Peso final (grs.)	Área (cm ²)	Variación de Peso (grs/cm ²)
20	19.6416	19.5500	13.77	- 0.00665
40	13.2979	13.1866	12.48	- 0.00892
60	15.1778	15.0429	12.87	- 0.01048
80	21.1044	20.9378	14.06	- 0.01185
100	19.6783	19.4823	13.78	- 0.01422
120	18.4716	18.2442	13.53	- 0.01681
140	18.4962	18.2395	13.54	- 0.01896
160	17.4023	17.1151	13.32	- 0.02156
180	20.5544	20.2142	13.95	- 0.02439

Tabla 2.6.- Variación de peso del acero AISI 01, tratado en una atmósfera de AIRE NORMAL, a una temperatura de 850°C.

t (min)	Peso inicial (grs.)	Peso final (grs.)	Area (cm ²)	Variación de Peso (grs/cm ²)
20	17.2118	17.1101	13.28	- 0.00766
40	20.8160	20.6427	14.00	- 0.01237
60	19.1053	18.8779	13.66	- 0.01665
80	19.6924	19.3941	13.78	- 0.02164
100	24.0764	23.7120	14.67	- 0.02483
120	23.6064	23.2026	14.57	- 0.02771
140	13.8986	13.4972	12.61	- 0.03183
160	18.2333	17.7593	13.48	- 0.03516
180	19.6024	19.0537	13.76	- 0.03988

Tabla 2.7.- Variación de peso del Acero AISI 01 tratado en una atmósfera de CO₂, a una temperatura de 850°C.

t (min)	Peso inicial (grs)	Peso final (grs)	Area (cm ²)	Variación de Peso (grs/cm ²)
20	20.6500	20.6473	13.96	- 0.00019
40	23.4863	23.4812	14.54	- 0.00035
60	17.0830	17.0766	13.25	- 0.00048
80	22.7969	22.7872	14.41	- 0.00067
100	23.7100	23.6982	14.59	- 0.00081
120	22.9354	22.9211	14.43	- 0.00099
140	19.8630	19.8468	13.81	- 0.00117
160	18.0657	18.0474	13.45	- 0.00136
180	23.7567	23.7342	14.60	- 0.00154

Tabla 2.8.- Variación de peso del acero AISI 01, tratado en una atmósfera de NH_3 , disociado, a una temperatura de 850°C .

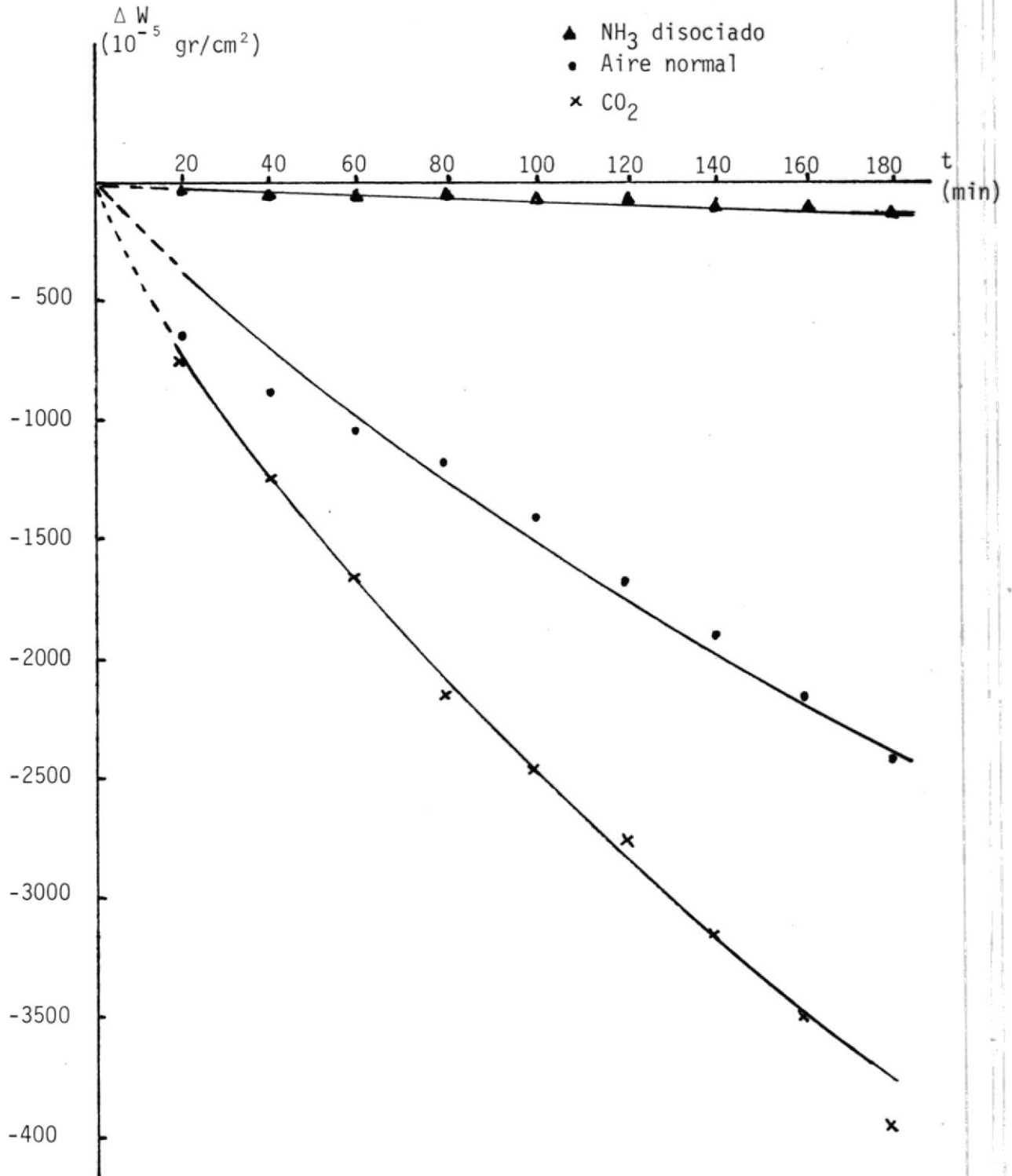


Fig. 2.14.- Variación de Peso Vs Tiempo de austenización en diferentes atmósferas. Material Acero AISI 01, Temperatura 850°C.

t (min)	ZONA DESCARBURIZADA TEORICA (mm)		ZONA DESCARBURIZADA EXPERIMENTAL (mm)	
	Mínima	Máxima	Aire	CO ₂
20	0.145	0.184	0.120	0.150
40	0.206	0.260	0.160	0.220
60	0.252	0.319	0.210	0.260
80	0.291	0.368	0.250	0.290
100	0.325	0.412	0.280	0.350
120	0.357	0.451	0.310	0.390
140	0.385	0.488	0.350	0.440
160	0.412	0.522	0.380	0.470
180	0.437	0.553	0.410	0.500

Tabla 2.9.- Tabla Comparativa entre los resultados teóricos y experimentales de la profundidad de la descarbonización en el acero AISI 01 tratado en atmósferas descarbonizantes a una temperatura de 850°C.

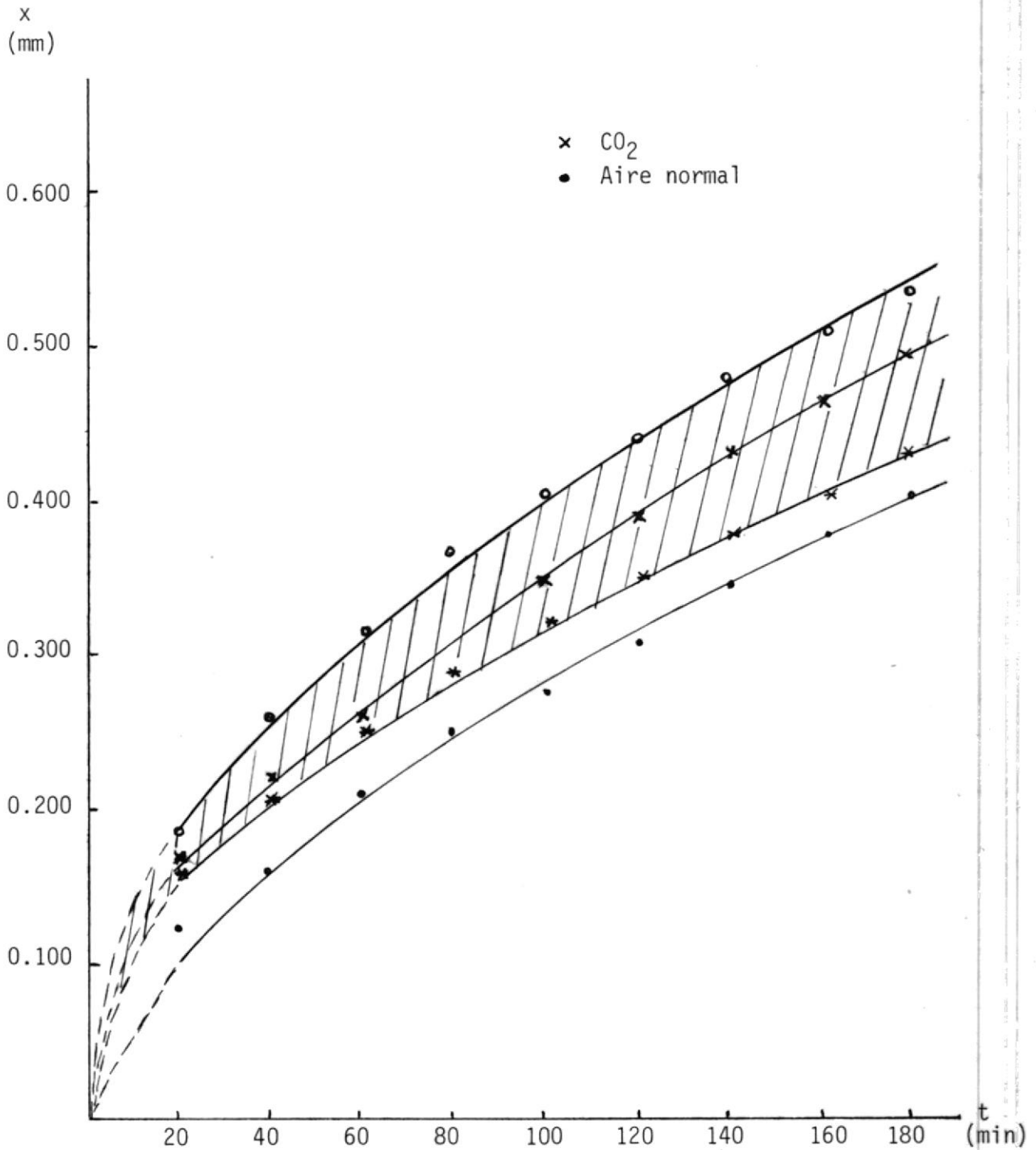


Fig. 2.15.- Gráfica Comparativa entre la profundidad de la descarbonización teórica y experimental en atmósferas descarbonizantes del acero AISI 01. Temperatura de tratamiento 850°C.

t (min)	VARIACION DE PESO TEORICA (gr/cm ²)		VARIACION DE PESO EXPERIMENTAL (gr/cm ²)	
	Mínima	Máxima	Aire	CO ₂
20	- 0.00725	- 0.00920	- 0.00665	- 0.00766
40	- 0.01030	- 0.01300	- 0.00892	- 0.01237
60	- 0.01260	- 0.01595	- 0.01048	- 0.01665
80	- 0.01455	- 0.01840	- 0.01185	- 0.02164
100	- 0.01625	- 0.02060	- 0.01422	- 0.02483
120	- 0.01785	- 0.02255	- 0.01681	- 0.02771
140	- 0.01925	- 0.02440	- 0.01896	- 0.03183
160	- 0.02060	- 0.02610	- 0.02156	- 0.03516
180	- 0.02185	- 0.02765	- 0.02439	- 0.03988

Tabla 2.10.- Tabla comparativa entre los resultados Teóricos y Experimentales de la variación de peso en el acero AISI 01 tratado en atmósferas descarburizantes, a una temperatura de 850°C.

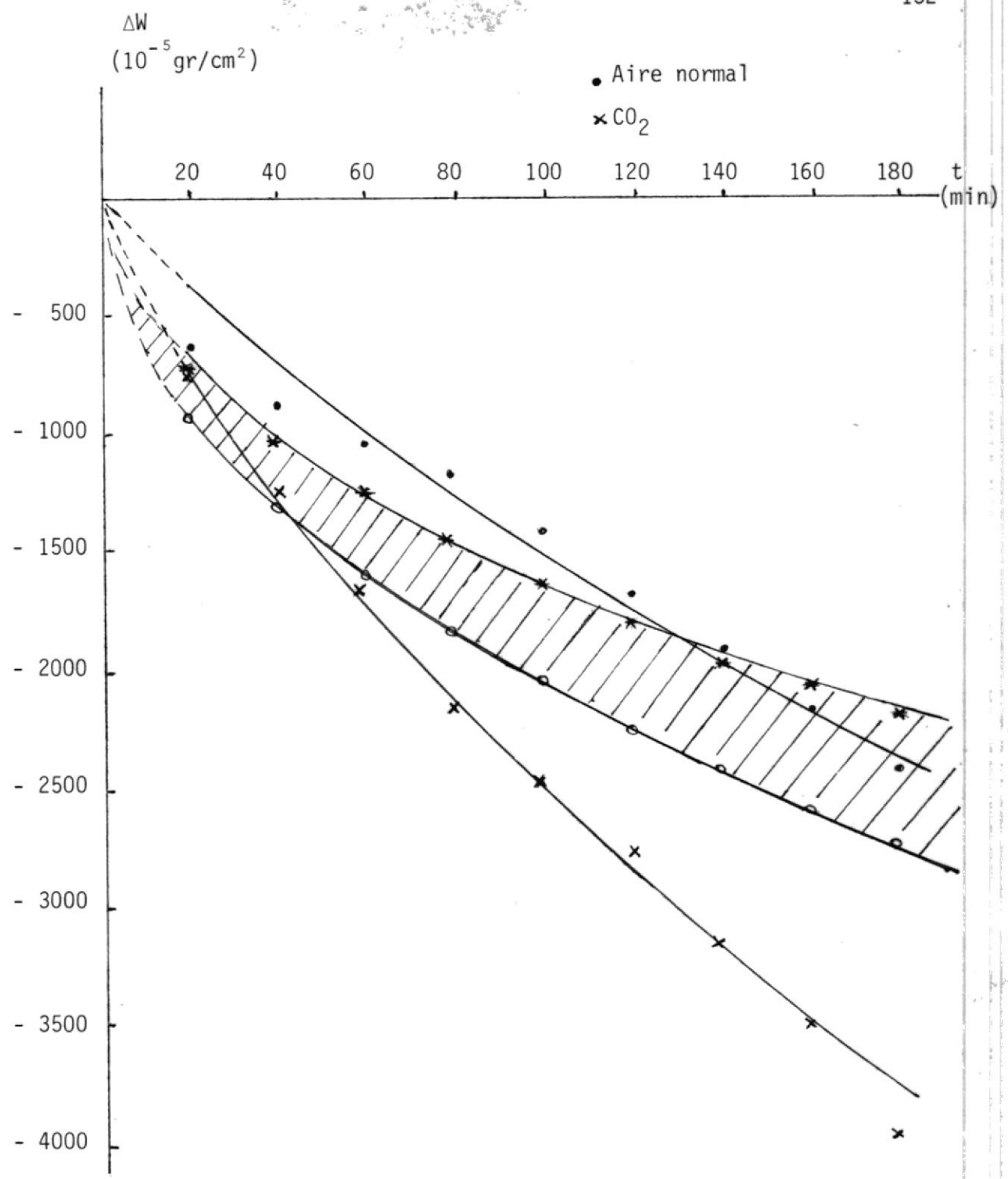
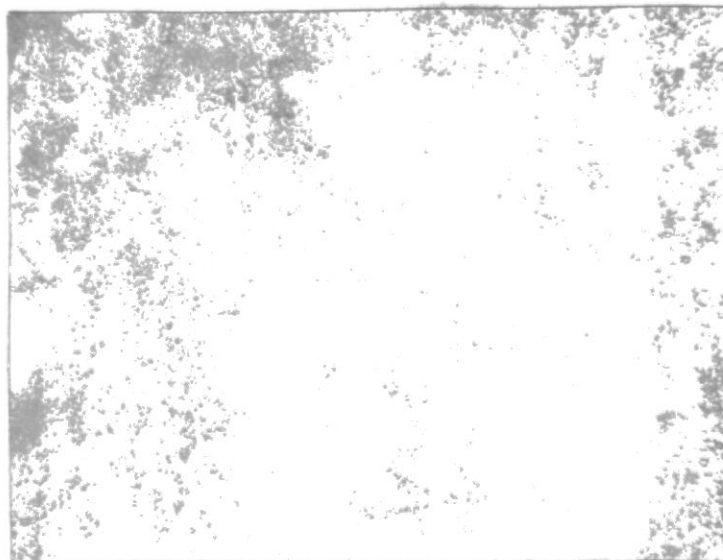


Fig. 2.16.- Gráfica comparativa entre la variación de peso teórica y experimental en atmósferas descarburizantes del acero AISI 01. Temperatura de tratamiento 850°C.

TIPO DE ATMOSFERA	COMPOSICION DE LA ATMOSFERA				
		CO ₂	CO	O ₂	N ₂
Aire Normal	Entrada	-	-	21%	79%
	Salida	0.6%	0.2%	18.6%	79%
CO ₂	Entrada	0.57 m ³ /h	-	-	-
	Salida	18.6 %	1.5%	15.5%	≈63%

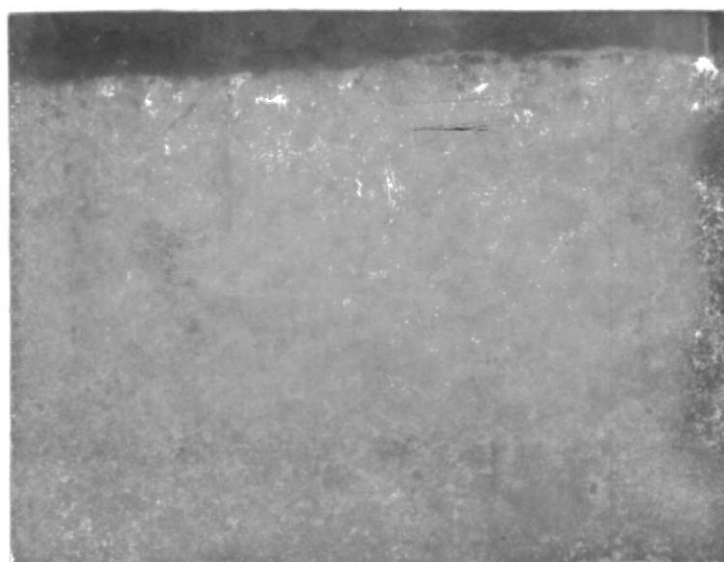
Tabla 2.11.- Análisis de Orsat de la Atmósfera de Salida del Horno, en las experiencias con Acero AISI 01.



100 x

Nital 2%

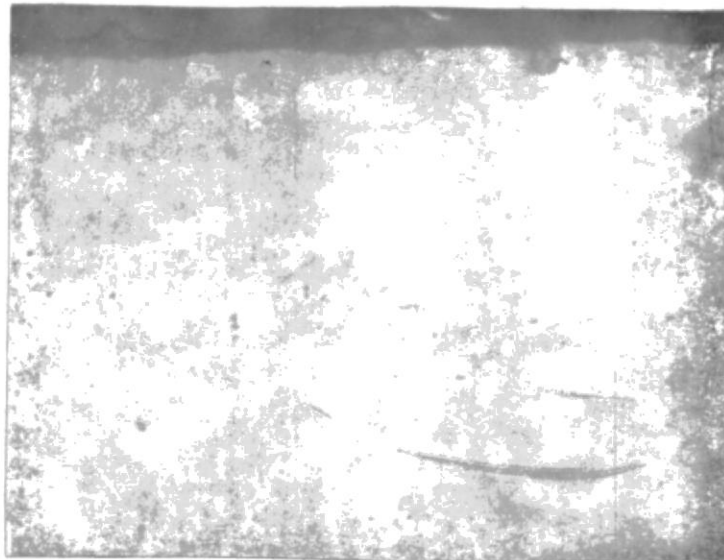
Fig. 2.17.- Probeta correspondiente a un acero recocido AISI 01, sin tratamiento.



100 x

Nital 2%

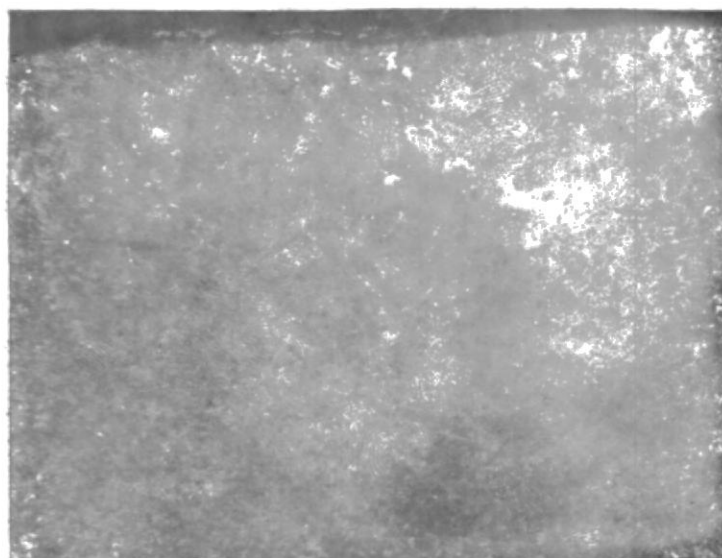
Fig. 2.18.- Zona exterior de un acero AISI 01, tratada a 850°C en una atmósfera de aire normal. Tiempo de austenización 20 min.



100 x

Nital 2%

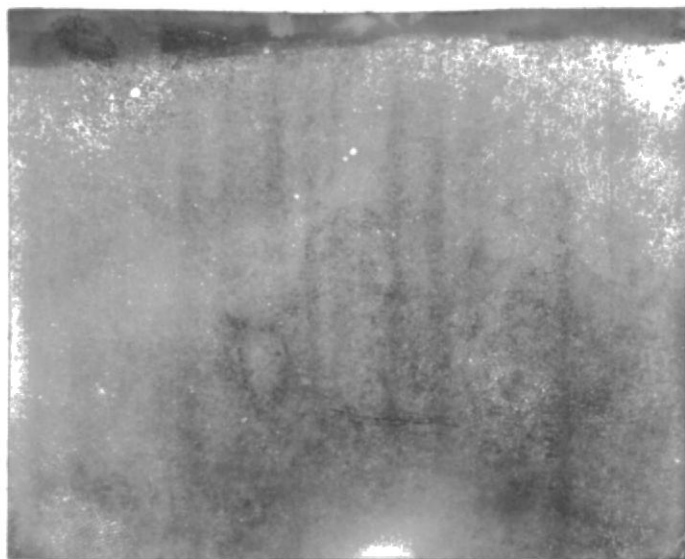
Fig. 2.19.- Zona exterior de un acero AISI 01, tratado a 850°C en una atmósfera de aire normal. Tiempo de austenización 100 min.



100 x

Nital 2%

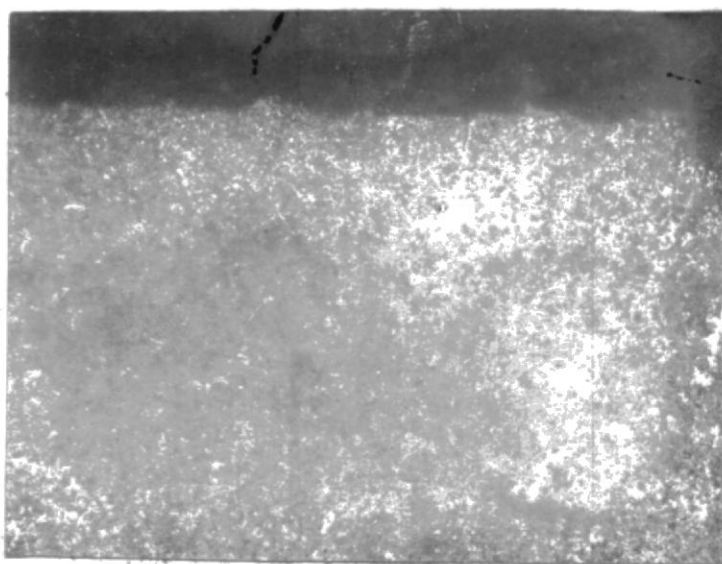
Fig. 2.20.- Zona exterior de un acero AISI 01, tratado a 850°C en una atmósfera de aire normal. Tiempo de austenización 180 min.



100 x

Nital 2%

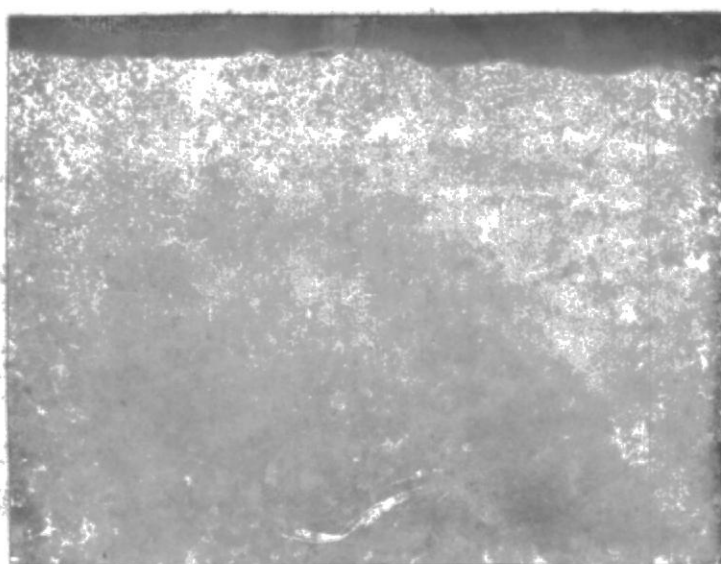
Fig. 2.21.- Zona exterior de un acero AISI 01, tratado a 850°C en una atmósfera de CO₂. Tiempo de austenización 20 min.



100 x

Nital 2%

Fig. 2.22.- Zona exterior de un Acero AISI 01, tratado a 850°C en una atmósfera de CO₂. Tiempo de austenización 100 min.



100 x

Nital 2%

Fig. 2.23.- Zona exterior de un acero AISI 01, tratado a 850°C en una atmósfera de CO₂. Tiempo de austenización 180 min.



100 x

Nital 2%

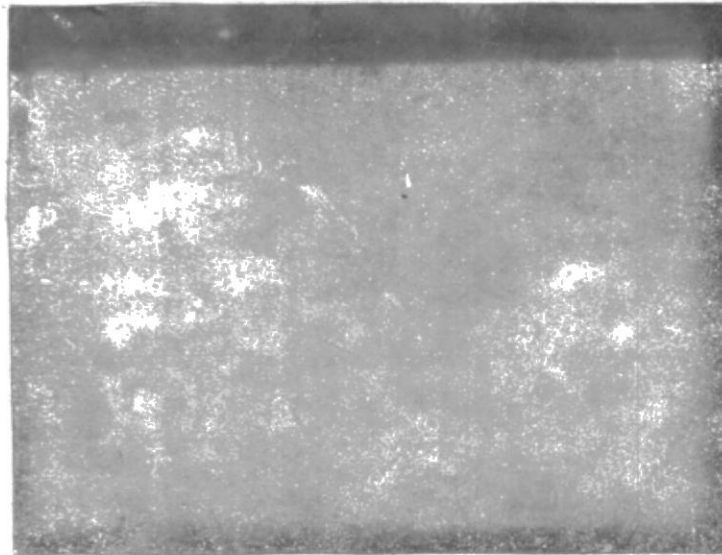
Fig. 2.24.- Zona exterior de un acero AISI 01, tratado a 850°C en una atmósfera de NH_3 disociado. Tiempo de austenización 20 min.



100 x

Nital 2%

Fig. 2.25.- Zona exterior de un acero AISI 01, tratado a 850°C en una atmósfera de NH_3 disociado. Tiempo de austenización 100 min.



100 x

Nital 2%

Fig. 2.26.- Zona exterior de un acero AISI 01, tratado a 850°C en una atmósfera de NH_3 disociado. Tiempo de austenización 180 min.

CAPITULO III

DISCUSION DE RESULTADOS

El objetivo principal del presente trabajo es realizar una transferencia de tecnología hacia aquellas personas que requieren conocer los efectos que ejercen los gases activos sobre la superficie del acero durante el ciclo de calentamiento en tratamientos térmicos.

Para poder cumplir con este objetivo propuesto, se realizaron experiencias en atmósferas comunes, donde se presentan problemas de oxidación y descarburización superficial, utilizando acero AISI 01, además se dieron a conocer los métodos de protección superficial que deben usarse para lograr éxito en procesos de tratamientos térmicos, y como demostración práctica se experimentó con una atmósfera protectora de amoníaco disociado, lográndose magníficos resultados en lo referente a dureza y microestructura de la superficie.

La oxidación y la descarburización casi siempre van acompañadas en todos los procesos de tratamientos térmicos; la oxidación se presenta en aceros con cualquier contenido de

carbono o de elementos aleantes, mientras que la descarburización es un problema que se presenta principalmente en los aceros de alto contenido de carbono, estos aceros son utilizados para trabajos donde se requiere alta dureza en la superficie, la cual si se encuentra carente de carbono, no se transformará microestructuralmente a martensita con un endurecimiento por temple, quedando en el acero una cubierta suave. Para muchas aplicaciones con herramientas, los esfuerzos a los que se somete la pieza en servicio son máximos en la superficie, de manera que la descarburización resulta peligrosa.

En esta parte se va a realizar la discusión de los resultados correspondientes al trabajo experimental y su comparación con los resultados que utilizando conceptos inherentes al proceso se pronosticaron para el Acero AISI 01.

En primer lugar, uno de los parámetros que influyen en el proceso de descarburización es la composición de la atmósfera de la cámara del horno, esto depende básicamente del tipo de horno. Si tenemos un horno de mufla, en donde la fuente de calor son resistencias eléctricas, el gas que provoca la descarburización es el oxígeno del aire para formar con el carbono del acero óxidos de carbono, preferentemente dióxido de carbono; y si el horno utiliza que -

madores para combustionar un hidrocarburo, el elemento descarburizante de la atmósfera producida es el dióxido de carbono, es por esta razón que se realizaron las pruebas, suministrando a la cámara del horno un flujo constante de este gas con la finalidad de simular este tipo de atmósfera, en la cual el CO_2 se combina con el carbono del acero para formar monóxido de carbono. Estas reacciones son verificadas con los análisis de Orsat correspondiente, presentados en la Tabla 2.11.

Otro parámetro de gran importancia en el proceso, es el contenido de elementos aleantes, porque algunos de ellos, como por ejemplo el cromo, forman óxidos en la superficie del metal, los cuales actúan como una barrera para el paso de átomos de carbono desde el metal, frenando la reacción; por lo tanto, aquellos aceros con un porcentaje de cromo elevado de cromo, tal es el caso del acero AISI D6, poseen un medio de autoprotección contra la descarburización.

Además, los elementos aleantes del acero, le permiten mantener durezas relativamente altas en la superficie, aún estando descarburizado. Es así como el acero AISI 01, estando severamente descarburizado, posee una dureza superficial de 39 Rc, que no fuera posible obtener en el caso de un acero al carbono con el mismo grado de descarburiza-

ción.

Los métodos ensayados en el Capítulo II, para determinar el grado de descarburización de un acero, nos permiten comparar diferentes atmósferas y las velocidades de reacción de los gases activos de cada atmósfera con el metal.

Los resultados encontrados demuestran la importancia que tiene el conocimiento de los gases presentes en la atmósfera del horno, porque tanto el O_2 como el CO_2 , gases comunes de encontrar en un horno, afectan marcadamente al número de dureza del material en la superficie. Ver Tablas 2.2; 2.3 y las figuras 2.5; 2.6; 2.7; 2.8; 2.9; 2.10; 2.11; y 2.12.

El oxígeno, no es posible contrarrestarlo con otro gas activo de efecto contrario, por lo tanto la acción oxidante y descarburizante de este gas es inevitable, es por esta razón que un requerimiento básico que debe cumplir una atmósfera protectora, es que debe ser libre de oxígeno.

Si el gas que provoca la descarburización es dióxido de carbono, el problema puede ser perfectamente controlable, porque mediante un conocimiento certero de las leyes que rigen el equilibrio de los gases, como ya se explicó en

el punto 1.2.1 podemos forzar a que la reacción química que estimula la descarburización actúen en sentido contrario, mediante el suministro de un adecuado porcentaje de CO, entonces lograríamos que la reacción sea $2\text{CO} \rightarrow \text{C} + \text{CO}_2$, y en vez de perder carbono obtendríamos un correcto equilibrio en la superficie o una pequeña ganancia de carbono. Esto en la práctica se logra mediante una relación aire/combustible baja que provoque una combustión parcial del hidrocarburo en los quemadores del horno.

No es posible predecir la dureza en la superficie de un acero templado, cuando ha sido calentado en una atmósfera descarburizante, debido a factores extras que influyen, tales como la velocidad de enfriamiento, contenido de carbono y elementos aleantes del material, medio de temple, etc.

Las figuras 2.13 y 2.14 nos muestran que el espesor de la zona descarburizada y la pérdida de peso, respectivamente, son mayores en una atmósfera que contiene CO_2 , disminuyen un poco en una atmósfera con O_2 , y son despreciables en una atmósfera de NH_3 disociado; debido a que los gases activos de cada una de las atmósferas en mención, tienen velocidades de reacción diferentes, por lo tanto las velocidades de descarburización también serán diferentes para cada tipo de atmósfera.

La Fig. 2.15 ilustra la precisa predicción que se realizó científicamente sobre el espesor de la zona descarburizada para el acero AISI 01, porque los espesores logrados experimentalmente para las dos atmósferas consideradas descarburizantes, están bastante cercanos al rango teórico, y aún más, la profundidad o espesor de la zona descarburizada en una atmósfera de CO_2 está dentro del rango calculado.

En la Fig. 2.16 se observa que la curva de pérdida de peso en piezas calentadas en una atmósfera de CO_2 , se sale del rango teórico, ésto se explica en que además de la difusión de átomos de carbono desde la superficie del metal, también se produce oxidación debido a filtraciones de aire a través de las entradas del horno o de la holgura de la puerta corrediza, entonces, la fina película de escama (FeO) que se forma en la superficie del metal, como no es muy compacta, originará un desprendimiento de partículas después que las piezas han salido del horno, provocando una mayor pérdida de peso.

Los resultados obtenidos a través de los ensayos realizados para determinar el grado de descarburización del acero AISI 01 en diferentes atmósferas, nos demuestran que la descarburización es función del tiempo, temperatura, composición de la atmósfera, porcentaje de carbono y conteni-

do de elementos aleantes del acero.

Finalmente, es importante resaltar que utilizando una atmósfera protectora se obtienen piezas completamente limpias, ésto es, sin la menor traza de oxidación, y con despreciables indicios de descarburización que no afectan a la dureza de la superficie, ni alteran la microestructura superficial, como se observa en las Figs. 2.24, 2.25 y 2.26.

CAPITULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En los Capítulos anteriores se ha detallado el presente trabajo, los experimentos realizados, resultados, controles y ensayos practicados, estos últimos con la finalidad de determinar los efectos del proceso de descarburización del acero y la importancia de realizar un control de atmósfera. De lo cual podemos sacar las siguientes conclusiones:

- a) El CO_2 es el gas más activo para reaccionar con el acero, reaccionando inicialmente con el carbono del acero, y posteriormente cuando el acero está descarburizado, reacciona con el hierro para formar óxidos.
- b) El proceso termoquímico de la descarburización se presenta en todo tipo exterior de piezas.
- c) Las piezas más afectadas por la descarburización son las de mayor tamaño, porque necesitan de un tiempo mayor para austenizarse completamente.

- d) Las piezas descarburizadas poseen bajas durezas superficiales y subsuperficiales, además de espesores de capa relativamente gruesas.

- e) La atmósfera de amoníaco disociado es excelente para usarla como protección de piezas porque mantiene las propiedades mecánicas y la microestructura homogénea en la superficie.

RECOMENDACIONES

- a) Seleccionar aceros que posean un alto porcentaje de elementos aleantes, tales como cromo especialmente que evitan la difusión de carbono en el metal.

- b) Si no se cuenta con un medio de protección superficial, entonces lo menos que podemos hacer para disminuir la oxidación y descarburización superficial es someter a la pieza al más corto tiempo posible de tratamiento y la temperatura más baja posible.

- c) Utilizar un medio de protección de acuerdo a la cantidad de piezas a ser tratadas, para grandes producciones el método de atmósfera protectora, es irremplazable.

- d) Dada la peligrosidad del amoniaco, es conveniente tener una excelente ventilación en el lugar de trabajo, para prevenir cualquier fuga de gas que hubiere en el sistema.

- e) Se puede disminuir los costos de operación de la atmósfera de amoniaco disociado haciendo recircular los gases que salen de la cámara del horno.

- f) Adicionar al sistema otro tanque de amoniaco evitando de esta forma la suspensión del proceso por falta de gas.

A P E N D I C E S

D I A G R A M A S

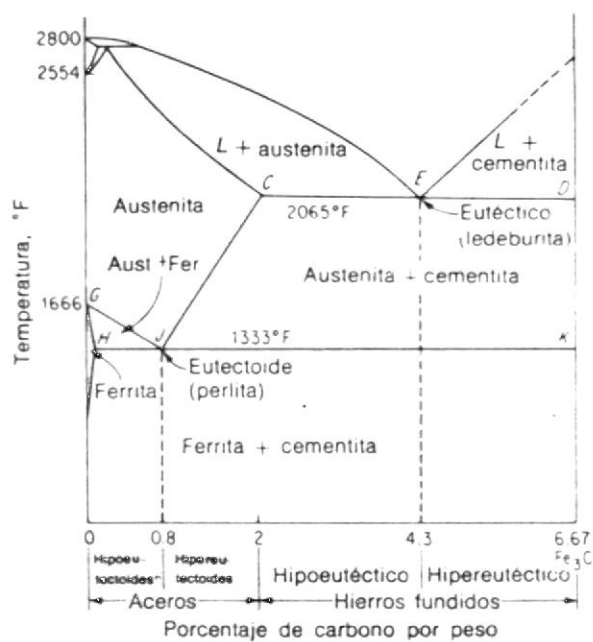


Diagrama de Equilibrio
Hierro-Carbono (Avner)

Temperatura de temple: 810°C

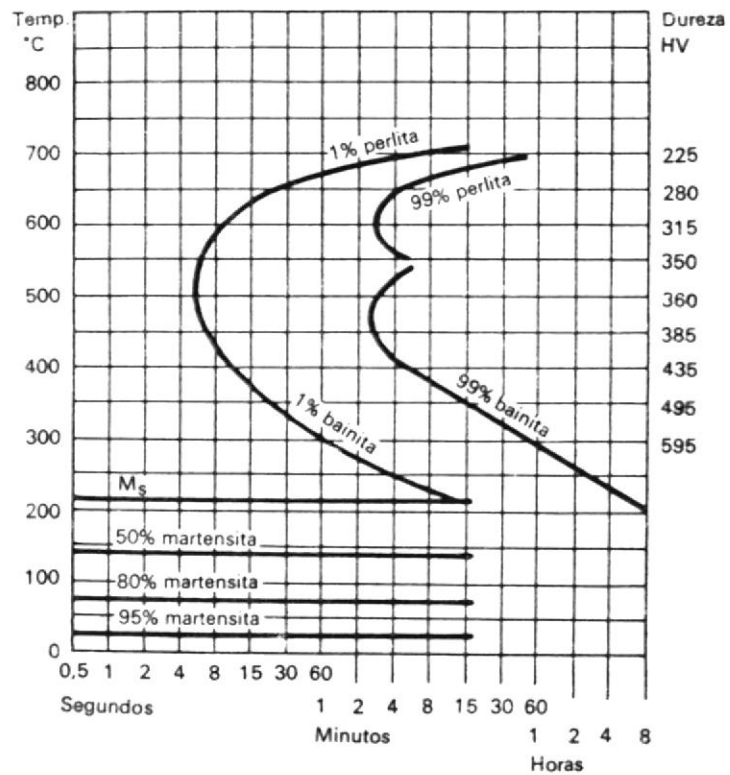


Diagrama TTT para el Acero AISI 01.

Valores aproximados. Probeta de \varnothing 35 mm. Enfriado en aceite.
Tiempo de mantenimiento 1 hora.

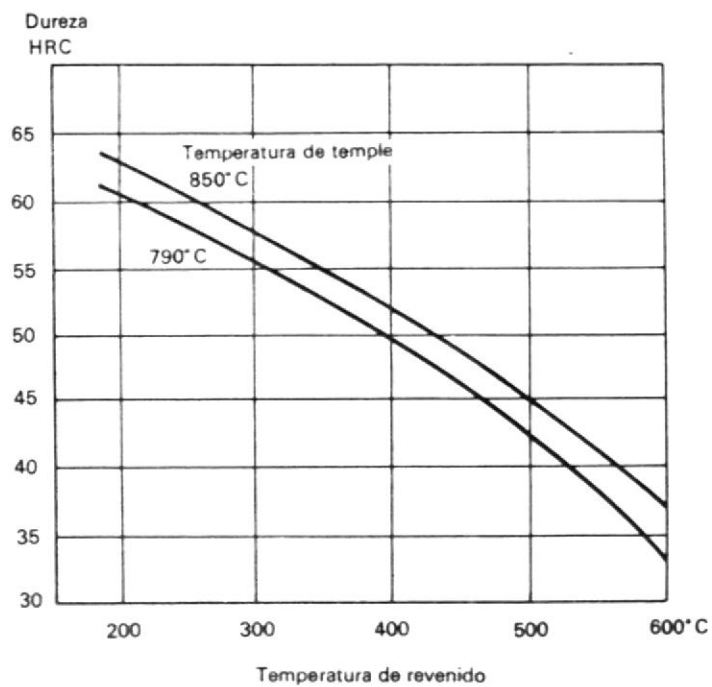


Diagrama de Revenido para el Acero AISI 01

T A B L A S

Relaciones aproximadas de mediciones
de Dureza para Aceros.

Diámetro, mm	Brinell, 3 000 Kg		Vickers, marcador piramidal de diamante	Rockwell, usando marcador o penetrador de diamante de forma cónica				Escleroscopio	Mohs	Resistencia tensil, 1 000 lb/pulg'
	Bola estándar	Bola de carburo de tungsteno		C 150 KG	D 100 KG	A 60 KG	Superficial 30 N			
2.35	...	682	737	61.7	72.0	82.2	79.0	84	...	...
2.40	...	653	697	60.0	70.7	81.2	77.5	81	...	...
2.45	...	627	667	58.7	69.7	80.5	76.3	79	8.0	323
2.50	...	601	640	57.3	68.7	79.8	75.1	77	...	309
2.55	...	578	615	56.0	67.7	79.1	73.9	75	...	297
2.60	...	555	591	54.7	66.7	78.4	72.7	73	7.5	285
2.65	...	534	569	53.5	65.8	77.8	71.6	71	...	274
2.70	...	514	547	52.1	64.7	76.9	70.3	70	...	263
2.75	495	...	539	51.6	64.3	76.7	69.9	...	...	259
		495	528	51.0	63.8	76.3	69.4	68	...	253
2.80	477	...	516	50.3	63.2	75.9	68.7	...	...	247
		477	508	49.6	62.7	75.6	68.2	66	...	243
2.85	461	...	495	48.8	61.9	75.1	67.4	...	...	237
		461	491	48.5	61.7	74.9	67.2	65	...	235
2.90	444	...	474	47.2	61.0	74.3	66.0	...	7.0	226
		444	472	47.1	60.8	74.2	65.8	63	...	225
2.95	429	429	455	45.7	59.7	73.4	64.6	61	...	217
3.00	415	415	440	44.5	58.8	72.8	63.5	59	...	210
3.05	401	401	425	43.1	57.8	72.0	62.3	58	...	202
3.10	388	388	410	41.8	56.8	71.4	61.1	56	...	195
3.15	375	375	396	40.4	55.7	70.6	59.9	54	6.5	188
3.20	363	363	383	39.1	54.6	70.0	58.7	52	...	182
3.25	352	352	372	37.9	53.8	69.3	57.6	51	...	176
3.30	341	341	360	36.6	52.8	68.7	56.4	50	...	170
3.35	331	331	350	35.5	51.9	68.1	55.4	48	...	166
3.40	321	321	339	34.3	51.0	67.5	54.3	47	...	160
3.45	311	311	328	33.1	50.0	66.9	53.3	46	...	155
3.50	302	302	319	32.1	49.3	66.3	52.2	45	6.0	150
3.55	293	293	309	30.9	48.3	65.7	51.2	43	...	145
3.60	285	285	301	29.9	47.6	65.3	50.3	42	...	141
3.65	277	277	292	28.8	46.7	64.6	49.3	41	...	137
3.70	269	269	284	27.6	45.9	64.1	48.3	40	...	133
3.75	262	262	276	26.6	45.0	63.6	47.3	39	...	129
3.80	255	255	269	25.4	44.2	63.0	46.2	38	...	126
3.85	248	248	261	24.2	43.2	62.5	45.1	37	5.5	122
3.90	241	241	253	22.8	42.0	61.8	43.9	36	...	118
3.95	235	235	247	21.7	41.4	61.4	42.9	35	...	115
4.00	229	229	241	20.5	40.5	60.8	41.9	34	...	111

Relaciones aproximadas de Mediciones de Dureza
para Aceros.

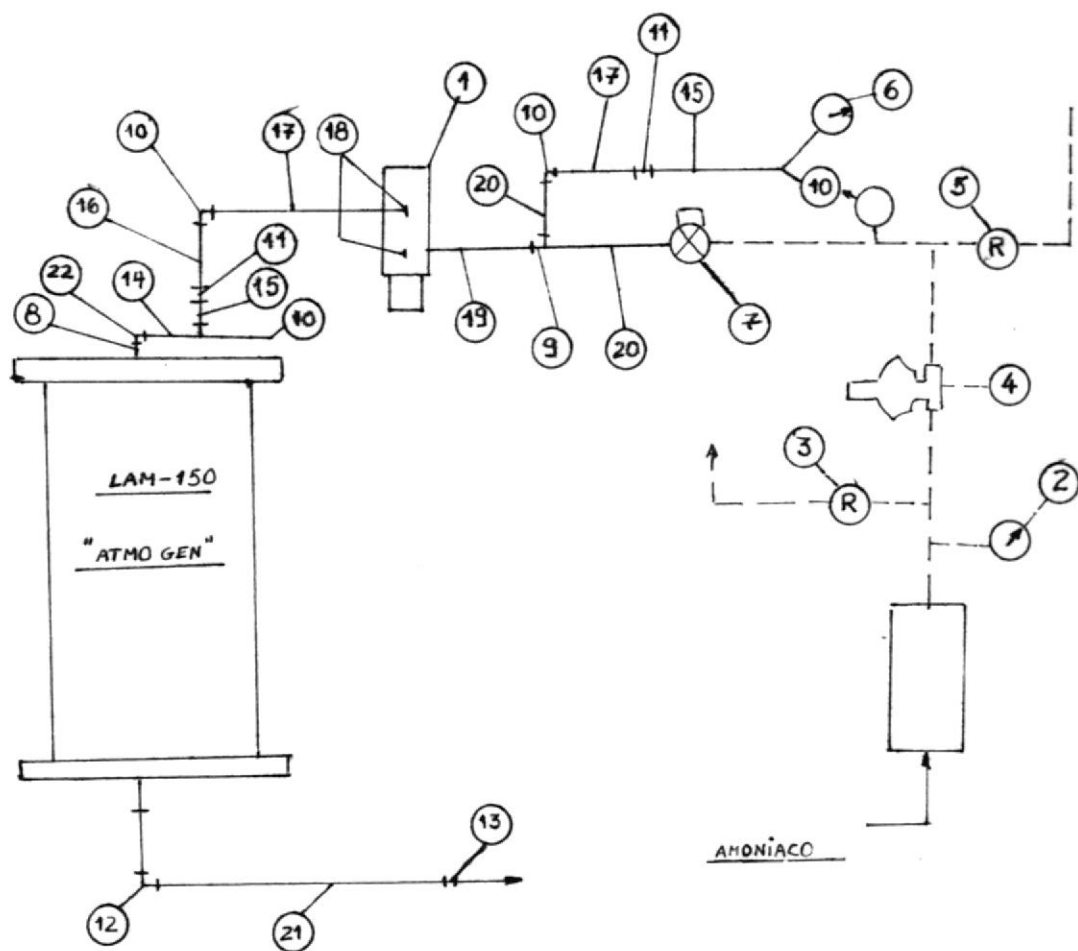
Brinell, 3 000 Kg		Rockwell, usando marcador o penetrador de diamante de forma cónica						Escleroscopio	Mohs	Resistencia a la tensión, 1 000 lb/pulg ²
Diámetro, mm	Bola estándar	Marcador de diamante cónico		B 100 Kg Bola de 1/16 de pulg	E 100 Kg Bola de 1/8 de pulg	Superficial				
		D 100 KG	A 60 KG			30 N Marcador de diamante cónico	30 T Bola de 1/16 de pulg			
4.05	223	40	60	97	...	41	80.5	33	...	108
4.10	217	39	60	96	...	40	80.0	32	...	105
4.15	212	38	59	95	...	39	79.0	31	...	102
4.20	207	37	59	94	...	38	78.5	31	...	100
4.25	202	37	58	93	110	37	78.0	30	...	98
4.30	197	36	58	92	110	36	77.5	29	...	96
4.35	192	35	57	91	109	35	77.0	28	5.0	94
4.40	187	34	57	90	109	34	76.0	28	...	92
4.45	183	34	56	89	109	33	75.5	27	...	90
4.50	179	33	56	88	108	32	75.0	27	...	88
4.55	174	33	55	87	108	31	74.5	26	...	86
4.60	170	32	55	86	107	30	74.0	26	...	84
4.65	166	32	54	85	107	30	73.5	25	...	82
4.70	163	31	53	84	106	29	73.0	25	...	81
4.75	159	31	53	83	106	28	72.8	24	...	79
4.80	156	30	52	82	105	27	71.5	24	...	77
4.85	153	...	...	81	105	...	71.0	23	...	76
4.90	149	...	...	80	104	...	70.0	23	4.5	75
4.95	146	...	...	79	104	...	69.5	22	...	74
5.00	143	...	...	78	103	...	69.0	22	...	72
5.05	140	...	...	76	103	...	68.0	21	...	71
5.10	137	...	...	75	102	...	67.0	21	...	70
5.15	134	...	...	74	102	...	66.0	21	...	68
5.20	131	...	...	73	101	...	65.0	20	...	66
5.25	128	...	...	71	100	...	64.0	...	...	65
5.30	126	...	...	70	100	...	63.5	...	...	64
5.35	124	...	...	69	99	...	62.5	...	...	63
5.40	121	...	...	68	98	...	62	...	...	62
5.45	118	...	...	67	97	...	61	...	...	61
5.50	116	...	...	65	96	...	60	...	...	60
5.55	114	...	...	64	95	...	59	...	...	59
5.60	112	...	...	63	95	...	58	...	...	58
5.65	109	...	...	62	94	...	58	...	...	56
5.70	107	...	...	60	93	...	57	...	...	55
5.75	105	...	...	58	92	...	55	...	...	54
5.80	103	...	...	57	91	...	54	...	...	53

Cambios dimensionales en el temple
del Acero AISI 01.

Dimensión 100×100×25 mm

	Cambio	Anchura %	Longitud %	Grueso %
Temple al aceite desde 830°C	Mín.	+0.03	+0.04	+0.02
	Máx.	+0.10	+0.10	
Temple escalonado desde 830°C	Mín.	+0.04	+0.06	+0.02
	Máx.	+0.12	+0.12	

A N E X O



ANEXO A

Instalación del Sistema de Inyección del Amoniaco

Lista de los componentes del diagrama de instalación del equipo ATMO-GEN usado en procesos de tratamientos térmicos con atmósfera protectora.

1. Medidor de Flujo 0-100 CFH
2. Manómetro de Alta
3. Válvula de seguridad en la línea de alta
4. Reductor de Presión
5. Válvula de seguridad en la línea de baja
6. Manómetro de baja
7. Válvula solenoide
8. T de reducción de 18 x 18 x 6 mm.
9. T de 6 mm. de lado
10. Codo de 90°, 6 mm.
11. Unión de 6 mm.
12. Codo 90° de 6 mm.
13. Acople de 9 mm.
14. Niplo de 6 x 38 mm.
15. Niplo de 6 x 100 mm.
16. Niplo de 6 x 75 mm.
17. Niplo de 6 x 112 mm.
18. Bushing reductor de 18 a 6 mm.
19. Niplo de 6 x 150 mm.
20. Niplo de 6 x 150 mm.
21. Niplo de 9 x 100 mm.

22. Tubería de 9 mm.

23. Válvula Selenoide

BIBLIOGRAFIA

1. AVNER S., Introducción a la Metalurgia Física, Mc Graw Hill, México, 1975.
2. AMERICAN SOCIETY FOR METALS, Symposium on "Controlled Atmospheres", Philadelphia 1941.
3. ALONSO A., Atmósferas Protectoras usadas en los Tratamientos Térmicos de los Aceros, Españas, 1963.
4. BULLENS D., Controlled Atmospheres, Steel and its Heat Treatment, pp. 109-162, Vol.2
5. BOKSHTEIN, Difusión en Metales.
6. DAVIES C., Calculations in Furnace Technology, London, 1966.
7. JOURNAL OF THE IRON AND STEEL INSTITUTE, High Temperature Oxidation of Iron and Steel, vol. 206, 1968.
8. BIRCHENALL C. E., The Mechanism of Diffusion in the Solid

- State, Metallurgical Reviews, Vol 3, 1958.
9. DUKHNOV K.I., Production of Safe Controlled Atmosphere from Dissociated Ammonia, Stal, 1953.
 10. GUY A.G., Interstitial Diffusion, Transactions of Society for Metals, Vol. 44, 1952.
 11. HARRIS F., Atmospheres for the Heat Treatment of Steel, Metal Progress, Vol. 54, 1948.
 12. DWYER J., Furnace Atmospheres, Metal Working, Vol. 109, 1965.
 13. METALS HANDBOOK, Furnces Atmospheres, Vol. 2, Ninth Edition.
 14. GROSSMAN Y BAIN, Principios de Tratamientos Térmicos, Editorial Blume, 1972.
 15. VAN VLACK, Materiales para Ingeniería, CEGSA, Mc Graw Hill, México, 1975.