



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

# **CEMENTACION CON CARBONO**

**TESIS PROFESIONAL**

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA  
(AREA MECANICA)**

**P R E S E N T A**

**ANGEL GUTIERREZ MORALES**

**DIRECTOR DE TESIS**

**ING. ARTURO BARBA PINGARRON**

**MEXICO, D. F.**

**NOVIEMBRE 1984**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

	pág.
INDICE	I
INTRODUCCION	VII
I. <u>TRATAMIENTOS TERMICOS</u>	1
1) DEFINICIONES	1
2) CLASIFICACION DE TRATAMIENTOS TERMICOS	1
II. <u>CEMENTACION</u>	12
1) INTRODUCCION	12
2) PROCESOS DE CEMENTACION	17
3) MECANISMOS DE LA CEMENTACION	22
a) <u>Defectos de la cementación, sus causas</u> <u>y formas de evitarlas.</u>	26
4) ACEROS PARA CEMENTAR	28
a) <u>Tipos de aceros para cementar</u>	31
a.1) Aceros al carbono para cementar	31
a.2) Aceros aleados para cementar	34
a.2.1) Aceros débilmente aleados	35
a.2.2) Aceros de alta aleación	38
b) <u>Selección de los aceros de cementación</u>	39
c) <u>Influencia de los elementos aleados en</u> <u>los aceros de cementación.</u>	40
5) PRINCIPALES CLASES DE ACERO DE CEMENTACION	46
6) TRATAMIENTOS TERMICOS DE LOS ACEROS ANTES DE LA CEMENTACION	50
7) TRATAMIENTOS TERMICOS DE LAS PIEZAS CEMEN- TADAS	52
a) <u>Temple directo desde la temperatura de</u> <u>cementación y revenido</u>	54

	pág.
b) <u>Temple a temperaturas inferiores a <math>Ac_3</math> y revenido</u>	55
c) <u>Temple a temperaturas superiores a <math>Ac_3</math> y revenido</u>	55
d) <u>Dos temples a temperaturas ligeramente superiores a <math>Ac_3</math> y a <math>Ac_1</math> y revenido</u>	56
e) <u>Austempering y Martempering.</u>	57
8) CEMENTACION SELECTIVA DEL ACERO	57
III. <u>CEMENTANTES SOLIDOS</u>	59
IV. <u>CEMENTANTES LIQUIDOS</u>	64
1) CEMENTACION LIQUIDA	64
2) CIANURACION	72
V. <u>CEMENTANTES GASEOSOS</u>	79
1) CEMENTACION CON GASES	79
a) <u>Materiales utilizados en la cementación gaseosa</u>	85
b) <u>Los hornos de cementación</u>	85
b.1) <u>Algunos principios constructivos</u>	86
- Hornos de mufla	86
- Hornos de tubos radiantes	86
- Las esclusas	88
- El laboratorio (cámara)	90
b.2) <u>Clasificación general</u>	93
b.2.1) <u>Los hornos de carga</u>	93
- Los hornos de carga de templado incorporado	93
- Los hornos de pozo	95
- Los hornos de retorta	96

	pág.
rotativa	
b.2.2) Los hornos continuos	97
- Los hornos de impulso	97
- Los hornos de solera giratoria	99
- Los hornos de retorta de torni llo	100
- Los hornos de sacudidas o de retorta vibrante	100
c) <u>Los generadores</u>	101
c.1) Principio (norma)	101
c.2) Descripción	101
c.3) Los generadores de gas tratado	102
c.4) Los generadores de gas recuperado	103
C.5) Algunas precisiones	103
c.6) Cementación por instilación	104
d) <u>Conclusión</u>	105
2) CEMENTACION POR INSTILACION DE LIQUIDOS	106
a) <u>Cinética de la disociación y reacciones de cementación</u>	107
b) <u>Velocidades de reacción</u>	111
c) <u>Posibilidad de control del potencial carbono</u>	113
d) <u>Datos relativos al carbono</u>	118
e) <u>Comparación de las entradas y salidas del ci- clo de cementación</u>	121
f) <u>Empleo de nitrógeno y amoniaco en el proceso por instilación</u>	127
3) EVALUACION DE LOS GASES PORTADORES DE CEMENTA- CION	127

	pág.
a) <u>Introducción</u>	128
b) <u>Reacciones de carburación y de descarburación</u>	129
c) <u>Relación entre la atmósfera entrante en el horno y la atmósfera dentro del horno</u>	132
d) <u>Propiedades requeridas por un gas portador de cementación</u>	135
e) <u>Gases portadores exotérmicos</u>	138
f) <u>Conclusiones</u>	148
<b>VI. <u>CAPA CEMENTADA</u></b>	<b>151</b>
1) ESTUDIO DEL EFECTO DE ALGUNAS VARIABLES EN EL PROCESO DE CARBURACION	151
2) RELACION ENTRE LAS PROPIEDADES DE EMPLEO Y ESTRUC- TURA DE LAS PIEZAS CEMENTADAS	152
3) OBTENCION DE LA ESTRUCTURA	156
a) <u>Control del espesor</u>	157
b) <u>Control de la resistencia en el núcleo</u>	158
c) <u>Control de la oxidación interna</u>	158
d) <u>Control de carburos</u>	159
e) <u>Control de la austenita residual</u>	160
e.1) Influencia del contenido en carbono	161
e.2) Influencia en el tiempo de cementación	165
e.3) Influencia de la temperatura de inte- rrupción del temple	167
e.4) Influencia del matíz del acero	170
e.5) Influencia de la velocidad de enfria- miento	170
e.6) Influencia de la temperatura de temple	172
f) <u>Relación entre la estructura y tensiones re-</u>	173

	<u>siduales en las capas cementadas</u>	
g)	<u>Conclusión</u>	175
4)	PREVISION DE LOS PERFILES DE CARBONO A PARTIR DE LAS LEYES DE LA DIFUSION	177
a)	<u>Caso general</u>	177
b)	<u>Aproximaciones simplificadas de la solución</u>	179
b.1)	Tratamiento en una solo paso	180
-	La concentración de carbono en super- ficie es constante	180
-	Tomar en cuenta la resistencia en el paso del flujo de carbono a la super ficie	181
b.2)	Solución del caso de tratamientos en dos etapas	182
-	La temperatura no varía	182
-	El potencial de carbono y la tempera- tura varían simultáneamente	183
5)	INVESTIGACION DE UNA SOLUCION EMPIRICA SIMPLE Y GENERAL	184
a)	<u>Solución para un sólo paso de tratamiento</u>	184
b)	<u>Observaciones sobre la solución propuesta</u>	189
c)	<u>Solución para un tratamiento de 2 etapas</u>	190
c.1)	El potencial carbono de la atmósfera varía sólo	190
c.2)	El potencial carbono y la temperatura varían simultáneamente	191
d)	<u>Utilización práctica de la expresión</u>	193
e)	<u>Comparación de cálculo con otras pruebas</u>	196

	pág.
e.1) Tratamiento en un sólo paso	196
e.2) Tratamiento de dos etapas	197
f) <u>Balance de los resultados</u>	200
6) CONCLUSION	202
7) CARACTERISTICAS MECANICAS DE LA CAPA CEMENTADA	203
8) MEDIDAS DEL ESPESOR DE LA CAPA CEMENTADA Y DE LA CAPA DURA	205
VII. <u>INVESTIGACION EMPIRICA DE LA CEMENTACION</u>	209
1) DESCRIPCION DEL PROCESO	209
2) COMENTARIOS Y CONCLUSIONES	211
3) TABLA DE RESULTADOS	212
ANEXO 1	214
ANEXO 2	217
ANEXO 3	218
ANEXO 4	219
BIBLIOGRAFIA GENERAL	223
BIBLIOGRAFIA ESPECIFICA	224



## INTRODUCCION.

El hierro a partir de su obtención y utilización ha cambiado de una manera importante a la humanidad, marcándoles formas de vida, acentuando un claro dominio de aquellos que de su uso hicieron una espada, un cañón, una armadura.

La transformación del hierro creó una industria que determinaría el desarrollo económico de los diferentes países que contemplaron entre su economía a la aceración.

Al acero se le fueron dando diferentes tipos de tratamientos, sin saber qué realmente pasaba, sólo se sabía que calentándolo se tornaba dúctil y enfriándolo bruscamente, tomaba cierta dureza. El empleo de acero cada vez fué mayor, pero cada vez se le exigía una mayor calidad y cualidades, control de calidad; por lo que ya no era suficiente saber macroscópicamente lo que pasaba al acero, con tal o cual tratamiento, sino lo que pasaba internamente, por lo que las investigaciones fueron cada vez más profundas y meticulosas dando resultados sorprendentes, con lo que la variedad de características en los aceros, casi se adecuó a las diferentes demandas de los consumidores. Por tal motivo se fueron diferenciando los tratamientos, ya sea por el procedimiento empleado, por la adición de otros metales, las diferentes temperaturas, etc.

Con todo esto se puede saber los resultados que obtendremos, conociendo las combinaciones químicas y podemos ver las diferentes estructuras microscópicas de las muestras.

En la presente tesis se tratará como definiciones a todos los

tratamientos en forma general, enfocándonos a los tratamientos termoquímicos y sólo una parte de éstos que es la cementación. A grandes rasgos podemos decir que la cementación es el endurecimiento superficial del acero. Este se logra por la difusión del carbono en la superficie del acero, por medio de altas temperaturas, tiempo de permanencia y un cementante. Este último puede ser de tres tipos: sólido líquido y gaseoso. Como se verá, la cementación ha avanzado no sólo en eficiencia y seguridad, sino también en rapidez con que se obtienen los resultados. Aquí en México ya es de empleo generalizado.

Nuestra investigación se hizo con un cementante sólido, ya que fué el más accesible y que se cuenta con las instalaciones. Los resultados obtenidos fueron concretos y positivos, ya que se pudo comprobar que la cementación se realiza.

Por medio del Nital al 2% se hicieron pruebas químicas para la observación microscópica de la estructura del acero y las características que van presentando los granos, como penetra el carbón. También se hicieron pruebas de microdureza y se notó que varía de una manera determinante con respecto al tiempo y a la temperatura de permanencia.

No recomiendo esta forma de cementar, ya que se tienen problemas con la hermeticidad de las cajas, lo sucio del mezclado de los componentes, la falta de garantía en la homogeneidad de la capa cementada, las altas temperaturas por tiempos muy prolongados, etc., lo único a favor es que el cementante es fácil de obtener y barato, además de las instalaciones relativamente accesibles.

Con este trabajo pretendo presentar un panorama generalizado de esta rama de la Metalurgia que no pretende sino aportar observaciones concretas del comportamiento del acero, con determinados Tratamientos Térmicos y de acuerdo a las técnicas probadas en países altamente industrializados y considerar la utilidad de este trabajo como una modesta aportación a mi escuela, a mis compañeros, a mis semejantes y, porqué no, para el progreso de mi patria.

## I. TRATAMIENTOS TERMICOS

### 1) DEFINICIONES

Los primeros tratamientos utilizados fueron los térmicos y se definían como procesos térmicos a que podían someterse los metales y aleaciones para modificar su estructura y constitución, pero no su "composición química".

El fin de estos tratamientos térmicos era mejorar las propiedades mecánicas de los metales obteniendo mayor dureza y resistencia mecánica o también mayor plasticidad para facilitar su conformación. Posteriormente también se modificó la composición química de la capa superficial, conociéndose como tratamientos termoquímicos.

Difieren mucho de los anteriores los "tratamientos mecánicos" con los que se obtiene la mejora de los metales por deformación mecánica de éstos con o sin ayuda de calor y por fin los tratamientos superficiales como la metalización y el cromado duro que mejoran la superficie de los metales pero no su composición química másica. (en el núcleo).

Modernamente los tratamientos son los procesos a que pueden someterse los metales una vez elaborados con el objeto de mejorar sus propiedades mecánicas.

### 2) CLASIFICACION DE LOS TRATAMIENTOS TERMICOS.

Tratamientos  
térmicos.

Recocido

Temple

Revenido

Tratamientos Termoquímicos	}	Cementación
		Nitruración
		Cianuración
		Carbonituration
		Sulfinuzación

Tratamientos Mecánicos	}	En caliente: forja
		En frío { Deformación profunda Deformación superficial

Tratamientos  
Termomecánicos

Tratamientos Superficiales	}	Metalización
		Cromado duro

### TRATAMIENTOS TERMICOS

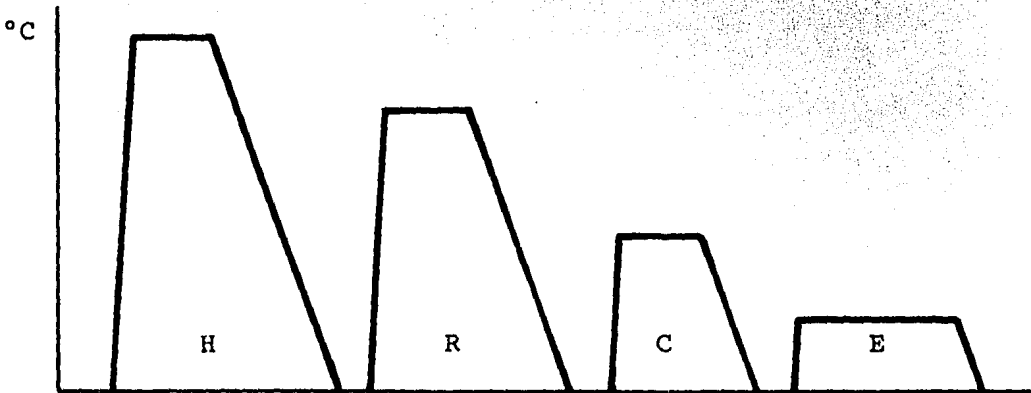
Son operaciones de calentamiento y de enfriamiento de los metales, logrando cambios en su estructura cristalina y micrográfica (grano), y de su constitución.

#### Recocido.

Consiste en el calentamiento a temperaturas adecuadas y de duración determinada, seguido del enfriamiento lento de la pieza tratada. El objeto del recocido es ablandar los metales y

aleaciones para poder trabajarlos mejor.

Hay 4 clases de recocidos, según la clase de anomalía que se trata de corregir: de homogeneización, de regeneración, contra acritud, y de estabilización.



Esquemas de los procesos de los diversos tipos de recocidos: H, de homogeneización; R, de regeneración; C, contra acritud, y E, de estabilización

El recocido de homogeneización. Se realiza a temperaturas relativamente elevadas, cercanas a la de fusión y se aplica generalmente a las aleaciones de metales no ferrosos, teniendo por objeto este recocido el destruir la heterogeneidad química de la masa de un metal o aleación, producida por una solidificación defectuosa.

El recocido de regeneración. Destruye la dureza anormal producida en una aleación por un enfriamiento rápido involuntario (temple). Se realiza a temperaturas inferiores al recocido de homogeneización, aplicable únicamente a las aleaciones templeables (a las que endurecen con enfriamientos rápidos).

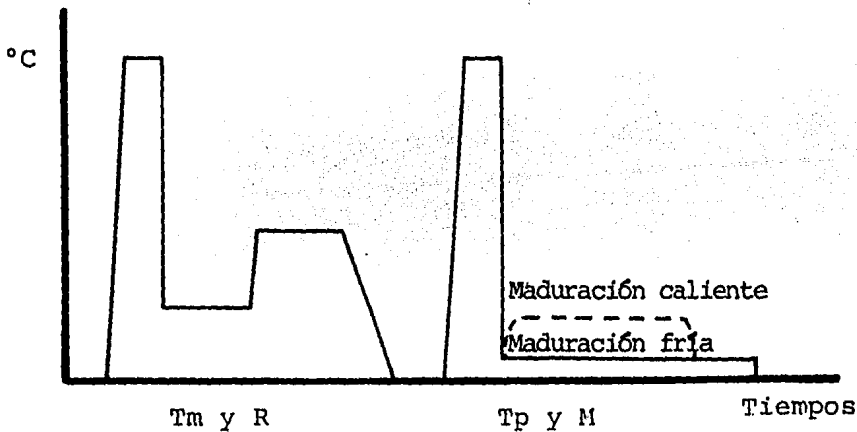
Recocido contra acritud. Elimina el endurecimiento producido por la deformación en frío de los metales, acritud. Se realiza a temperaturas muy poco superiores a la de recristalización y se aplica a todos los metales y aleaciones que se endurecen por deformación en frío.

El recocido de estabilización. Destruye las tensiones internas producidas en la masa del metal por su mecanización o por los moldeos complicados.

Se realiza a temperaturas comprendidas entre 100 y 200°, durante tiempos muy prolongados, que superan frecuentemente las 100 horas. Se aplica a toda clase de aceros y aleaciones. Este tratamiento es en realidad, un envejecimiento artificial, pues con él se consigue acelerar las transformaciones que se producirían en el transcurso del tiempo espontáneamente, evitando así las variaciones de cotas de las piezas una vez terminadas.

#### TEMPLE

Es el calentamiento de algunas aleaciones, principalmente el acero, seguido de un enfriamiento muy rápido, para impedir la transformación normal del constituyente obtenido en el calentamiento. Con esto se consigue obtener un constituyente "anormal" con su estructura cristalina deformada y cuya tensión de deformación aumenta su dureza. El objetivo es aumentar la dureza y resistencia mecánica.



Esquema del temple martensítico y revenido (Tm y R) y del temple de precipitación y maduración natural (fría) y artificial (caliente) (Tp y M).

El endurecimiento conseguido en el temple puede compararse al obtenido con la deformación en frío. En este proceso el aumento de dureza se debe a la tensión en que quedan los granos al deformarse (deformación estructura micrográfica) y en el temple el aumento de dureza se debe a la tensión en que quedan los cristales por la deformación de la estructura cristalina. Hay dos tipos de temple:

Estructural o martensítico. Se aplica generalmente a aceros. Debe su nombre a la martensita que es el constituyente duro obtenido en el temple; que es como veremos hierro alfa sobresaturado de carbono. Esta sobresaturación distorsiona los cristales de hierro alfa y los pone en tensión, con lo que, los endurece.

En las aleaciones de metales no férreos se forma un constituyente diferente a la martensita pero con las mismas características.

Temple de precipitación. El endurecimiento es debido a la precipitación de un compuesto químico que pone en tensión a



los cristales y los endurece. Se aplica a algunas aleaciones de aluminio, magnesio y cobre. En este proceso el endurecimiento se realiza después del enfriamiento del metal por la precipitación progresiva del compuesto químico.

En el temple de precipitación, el constituyente anormal obtenido al final del enfriamiento es el mismo que se había obtenido en el calentamiento, al que no se ha dado tiempo a transformarse por la rapidéz del enfriamiento y por tanto, a precipitar el compuesto químico; y es precisamente después del enfriamiento cuando va endureciendo el metal por la precipitación progresiva del compuesto químico.

En cambio en el temple martensítico, el constituyente anormal obtenido en el temple al final del enfriamiento rápido es la martensita, produciéndose el endurecimiento en el acto.

#### REVENIDO

Es un tratamiento complementario del temple aplicándose únicamente a metales templados.

Hay dos clases de revenidos:

Revenido normal. (Revenido). Se aplica a las aleaciones tratadas con temple martensítico; consiguiendo mayor y mejor tenacidad a costa de su dureza.

La temperatura del calentamiento obviamente es inferior a la del temple, y cuanto más se aproxima a ésta y su permanencia es mayor disminuye la dureza y mejora la tenacidad.

( mayor es la intensidad del revenido).

La velocidad del enfriamiento no tiene influencia en el resultado del tratamiento.

Revenido de endurecimiento o maduración artificial. Esta última forma es como generalmente se conoce y se aplica a las aleaciones tratadas con temple de precipitación; el objetivo es acelerar la precipitación del compuesto químico, endureciendo el metal por lo que produce un efecto contrario al revenido. Las temperaturas dependen de la aleación a tratar, lo mismo que su permanencia en las mismas. No importa la velocidad de endurecimiento.

#### TRATAMIENTOS TERMOQUIMICOS.

Es la aportación de otros elementos a la superficie de la pieza por medio de calentamientos y enfriamientos.

Existen varios tipos de estos tratamientos, entre ellos:

Cementación. Consiste en agregar carbono a la superficie del acero, a una temperatura determinada.

Después del temple se obtiene gran dureza superficial y buena tenacidad en el núcleo, (piezas de bajo contenido de carbono).

Nitruración. Es el endurecimiento del acero por la absorción de nitrógeno a una temperatura determinada. Proporciona a la pieza una gran dureza superficial y resistencia a la corrosión.

Una gran ventaja es que se realiza a temperaturas relativamente bajas con lo que casi no hay deformaciones (cigüeñales,

piezas de maquinaria, brocas, etc).

Cianuración. Es un tratamiento intermedio entre la cementación y la nitruración ya que el endurecimiento se realiza con la acción combinada del carbono y del nitrógeno, a una temperatura determinada.

Carbonitruración. Es lo mismo que la cianuración, la diferencia es la forma de aplicación. También se le conoce como "cianuración gaseosa".

Sulfínuzación. Tiene por objeto aumentar la resistencia al desgaste de las piezas tratadas, se logra por el calentamiento en un baño de sales a temperaturas de 565° C. de 1 a 3 horas. En la composición del baño entran tres tipos de sales, unas activas formadas por sulfito sódico, otras protectoras de carácter reductor para impedir la oxidación de las sales activas y otras de soporte, alcalinas o alcalinotérreas para bajar la temperatura de fusión de la mezcla a unos 450°C

Cuando es indeseable la britad se elimina por recocidos pero en algunas ocasiones es benéfica, como en el caso de los alambres para los resortes llamados de "cuerda de piano" ya que se aumenta el límite elástico.

La deformación en frío superficial se aplica generalmente para incrementar la resistencia a la fatiga y se realiza básicamente, por bombardeo con perdigones de acero a altas velocidades, lográndose un endurecimiento superficial como en el caso de hojas para muelle.

### TRATAMIENTOS TERMOMECAÑICOS

Es el ausforming\* el más conocido, que consiste en la deformación del acero cuando se encuentra en estado austenítico

Es aplicable a aceros de temple al aire, cuyo análisis aproximado es:

C	-----	0,5%	Ni	-----	1,5 a 4,0%
Si	-----	1,5%	Mo	-----	0,5 a 1,5%
Cr	-----	2,5%	Va	-----	0,35% (a veces)

El proceso se realiza en 5 etapas:

1. Calentamiento del acero hasta la austenización completa.
2. Se lleva el acero a un horno de baño de sales a temperatura de 450 a 625°C.
3. Se procede a la deformación (puede ser en una o varias etapas).
4. Una vez deformado se somete a un enfriamiento rápido de temple.
5. Se revienen las piezas tratadas.

Este tratamiento es aplicable a piezas para barras de torsión, muelles y piezas de aeronáutica.

### TRATAMIENTOS SUPERFICIALES.

Metalización. (con pistola). Consiste en la aplicación de partículas en estado plástico o fundidas sobre la piezas, mediante una pistola metalizadora que lleva un soplete oxiacetilénico para fundir el metal de aporte (puede ser alambre o polvo), y un suministro de aire a presión proporcionado por una turbina que lleva la pistola, que proyecta el metal fun-

\* Ausforming.- Deformación del acero cuando se encuentra en estado austenítico.

dido, atomizándolo sobre la pieza.

Tiene gran aplicación en la recuperación de ejes y piezas desgastadas, piezas fundidas, protección de piezas contra el desgaste, contra la corrosión, etc.

Las piezas a tratar requieren de una preparación previa por arenado o materiales abrasivos, o bien por mecanizado; el objeto es crear una superficie limpia y áspera que garantice agarre del material de aporte.

Se aplica en capas de hasta 20 mm de espesor, realizándose el proceso prácticamente en frío. No es recomendable en piezas sujetas a impactos (dientes de engranes).

Cromado duro. Es un recubrimiento galvánico con arreglo a una técnica especial diferente al cromado ornamental, que mejora algunas de las propiedades del metal base.

El cromado duro mejora la resistencia al desgaste, al rayado, y a la penetración (70Rc)<sup>\*</sup>, a la corrosión y mejora el coeficiente de rozamiento.

La densidad de corriente en el cromado duro es de 30-50 A/dm<sup>2</sup> y la temperatura es de 45° C, lo que hace que el espesor de las capas de cromo duro sean de 0,5 a 1,0 mm, en tanto que en el decorativo son menores de 0,001 mm.

El cromo duro se aplica sobre aceros, fundiciones de hierro, aluminio y a veces sobre latón y cobre.

Se usa en cilindros, camisas, cigüeñales, árboles de levas y válvulas de motores de combustión interna y así como en la recuperación de rodillos de laminación, moldes para plástico,

(\* Ver Anexo 1

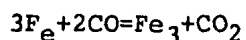
y para pastas alimenticias, matrices y troqueles, herramientas de corte como brocas y escariadores, instrumentos de medición, etc.

## II. CEMENTACION.

### 1) INTRODUCCION.

La cementación es el más antiguo procedimiento de fabricación de acero. El procedimiento era poner dentro de crisoles pequeños de arcilla, el hierro dulce con pequeños trozos de carbón vegetal (aproximadamente del tamaño de un arroz). Los crisoles perfectamente sellados en la parte de arriba con arcilla o barro, se introducían al horno, donde se calentaban a temperaturas que oscilaban entre 925 y 1100°C con lo cual el hierro ( $C \approx 0.10\%$ ) absorbía carbón a temperaturas superiores de 925°C transformándose en acero ( $C \approx 1\%$ ). La principal característica que se lograba es que se podía templar adquiriendo una dureza extraordinaria.

Este proceso de carburación del hierro por la acción del carbono, se realizaba de acuerdo con la siguiente reacción:



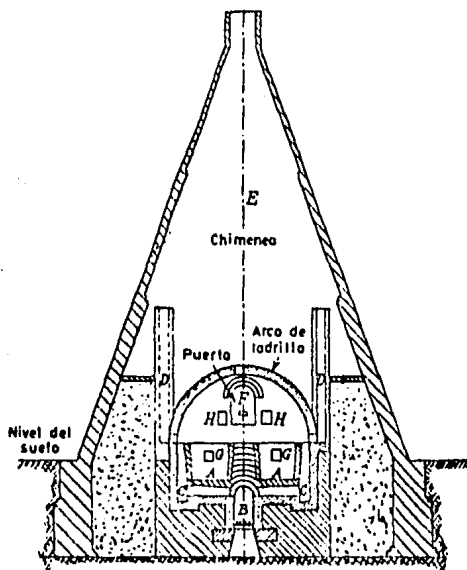
En el material aparece un nuevo microconstituyente, el carburo de hierro o cementita ( $Fe_3C$ ), que junto con la ferrita (Fe), es uno de los constituyentes fundamentales de los aceros.

A mediados del siglo XVIII se descubrió en Inglaterra la fabricación de acero en crisol, con lo que se conseguía acero de mucha mejor calidad que el acero cementado, debido a que se llegaba a fundir los trozos de acero cementado que se

empleaban como materia prima en el proceso, lo que permitía separarlos de las escorias, que contenía el acero fabricado por cementación.

El procedimiento empleado en Bélgica consistía en carburar las barras de hierro rodeándolas de carbón de madera u otras sustancias carburantes y calentándolas a elevadas temperaturas.

La materia prima empleada eran pletinas\* de hierro de 10 a 20 mm de espesor y de 2 a 4 m de longitud, procurando que no tuvieran grietas, ni cascarilla y que el hierro fuera lo más puro posible. La operación duraba unos 20 días, en hornos especiales (hornos de cementar), en los que se cargaban generalmente dos grandes cajas:



Horno de cementar para la fabricación de barras de acero.

\* Pieza de hierro más ancha que gruesa.



De la figura anterior: A. Construidas con bloques de piedras silicosas, que resisten bien la acción del calor; B. Hogar central, alargado que queda abajo de las cajas, en donde se localizaba el combustible para el calentamiento.

Encendiendo el horno, las llamas rodean a las cajas y el humo escapa por aberturas y canales C y D., hacia la chimenea E. Antes de salir las llamas y los gases envuelven bien las cajas con lo que se conseguía un rápido y uniforme calentamiento de las barras de hierro que había en su interior.

Las cajas tenían de 3 a 6 m de longitud y de 0,6 a 1,5 m de anchura aproximadamente. Según el tamaño de las cajas se cargaban de 500 a 1000 Kg de barras de hierro junto con carbón vegetal, alternando las capas de hierro y las de carbón. Posteriormente se cerraban lo mejor posible las tapas (parte superior) con piedras planas selladas con arcilla (en ocasiones se cubrían las tapas con escoria de hierro y arcilla) evitando la entrada de oxígeno y la salida de los gases producidos a altas temperaturas. En la pared frontal se tenían unos agujeros donde se podían extraer muestras periódicamente del acero (barras de control), se templaban y rompían; por la fractura se conocía el avance de la cementación.

Marcha de operación en los hornos de cementar.

El proceso comenzaba cuando se colocaban las barras de hierro (4 cm) bien alternadas con capas de carbón (2 cm)

en las cajas que estaban ya dentro del horno. Se cerraban bien las tapas, se introducía el combustible y se daba fuego al horno. La operación era bastante larga y duraba alrededor de 20 días; 4 días en alcanzar 1000 a 1200°C, manteniéndose esa temperatura durante unos 10 días para que se calentara bien el material y penetrara el carbono en el interior de las barras, y luego durante 6 días, se dejaban enfriar lentamente las cargas.

Por cada 1000 Kg de acero fabricado, se consumían unos 1000 Kg de hulla para el calentamiento y 50 Kg de carbón vegetal para la carburación.

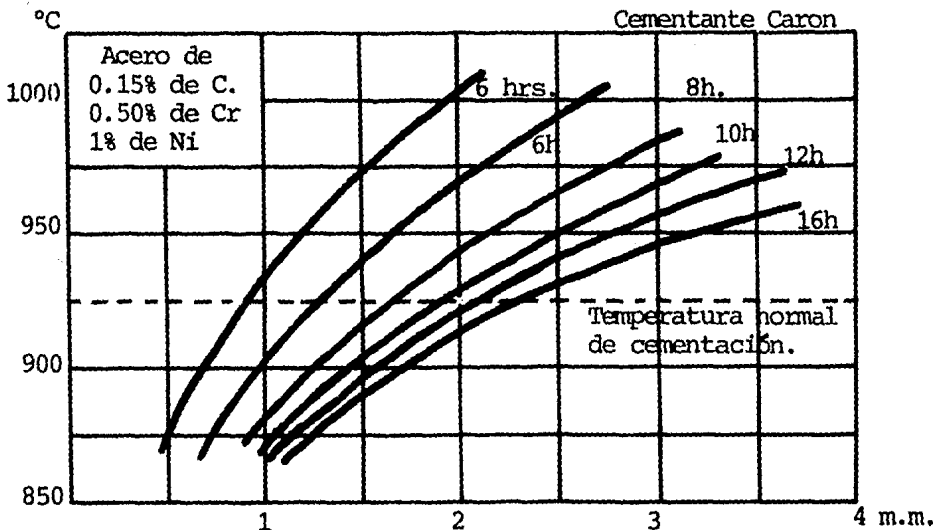
Actualmente la cementación consiste en carburar una capa superficial del acero, rodeándola de un producto carburante y calentándola a una determinada temperatura. Terminada esta operación se temple y reviene la pieza, con lo que queda una gran dureza superficial y una buena tenacidad en el núcleo. El acero empleado es de bajo contenido en carbono (no superior a 0,30%), utilizándose también aceros aleados con níquel, cromo y molibdeno, los que son especialmente para la cementación.

El proceso se realiza entre 850 y 950°C (acero en estado austenítico el hierro en forma de hierro gamma), que es cuando tiene lugar un proceso significativo de difusión de carbono hacia interior de la pieza.

La concentración de carbono aumenta en la capa cementada con la temperatura pudiendo llegar a 1.76% de carbono a 1130°C (se consideran las porciones más adecuadas las que oscilan entre 0.5 a 0.9% de carbono con las que se consiguen después

del temple durezas de 60 a 65 Rockwell-C). \*

No es conveniente pasar el 0,9%C, pues a partir del 1% se forman carburos y redes de cementita que debilitan la capa cementada y tiende \*a descascarillarse. En caso de que por accidente haya exceso de carbono en la capa cementada, se les da a las piezas un recocido de difusión de 800 a 900°C, con lo que se uniforma la composición y disminuye el porcentaje de carbono (en una atmósfera apropiada). El espesor de la capa cementada depende de la temperatura y del tiempo de permanencia de la pieza en el horno durante la operación.



Espesores de capa cementada según la temperatura y duración de la cementación con cementante sólido Caron.

El espesor más corriente oscila entre 0,5 a 1,5 mm.

Se usan espesores menores de 0,5 mm para piezas pequeñas a las que no se les rectificará posteriormente. Excepcionalmente se cementan capas de 3 a 4 mm.

\* Ver Anexo 1.

## 2) PROCESOS DE CEMENTACION

También se le conoce como proceso de conversión; escuetamente era impregnar carbono en barras de hierro púdelado o de hierro dulce a una temperatura por debajo de su punto de fusión y se emplean para la producción de barras altas en carbono; que a su vez se usan en la manufactura del acero al crisol o del acero al corte. Las barras son generalmente de acero puro sueco (hechas por el procedimiento Wallon) de 63 a 76 mm de ancho, 15 a 20 mm de grueso y de unos 7,5 m de largo, variando en su peso de 8 a 13 toneladas. Las cargas se colocan en cámaras de ladrillo refractario (cubas de conversión) calentadas exteriormente por medio de canales de humo (que forman parte del horno de cementación) y son empaquetadas las cargas en capas separadas por carbón vegetal.

. El empaquetado de las piezas a cementar en la caja es una operación que requiere cierto cuidado para asegurar un contacto apropiado entre cada pieza de acero y el cementante, puesto que en caso contrario pueden obtenerse capas cementadas poco uniformes sino se realiza debidamente. El tamaño de grano del compuesto cementante es importante y debe ser lo suficientemente fino para que permita su entrada en taladros y dientes de los piñones, pero no tanto que interfiera en la libre circulación de los gases. La parte alta del pote\* se cierra con polvo de muela que al calcinarse cierra herméticamente.

El tiempo en que el horno alcanza su temperatura total es

\* Vasia redonda.

en unos 3 ó 4 días y se mantiene durante unos 7 u 8 días para las coladas dulces, 9 y medio días para las coladas de medio carbón y para las coladas en alto carbón, 11 días; todos requieren para su enfriamiento de 4 a 6 días. Hay que tener en cuenta el tiempo que le vamos a dar para el enfriamiento ya que si dejamos las empaquetaduras a un enfriamiento paulatino la difusión del carbono continuará actuando sobre el acero y el carbono superficial seguirá penetrando hacia el interior; por otra parte la capa más externa, ya muy rica en carbono, presentará cierta dificultad en la absorción, tanto mayor cuanto más va bajando la temperatura, por lo cual se comprende que el carbono seguirá penetrando al interior de la pieza sin continuar enriqueciéndose la superficie; es decir que se pierde carbón superficial durante el enfriamiento, a costa de que éste vaya penetrando más hacia el interior, teniendo el inconveniente que al rebajar la dosificación en carbono de la superficie, nos disminuirá la dureza de la pieza, una vez terminada, por lo cual no conviene finalizar en esta forma la operación. Para evitar que esto ocurra, podríamos enfriar las piezas, lentamente en la caja de cementar y terminar la operación enfriándolas rápidamente por la inmersión en un baño de aceite o de agua; pero esto tiene el inconveniente de que, no avanzando durante la cementación de una manera perfectamente progresiva, la difusión del carbono, la pieza cementada presentaría una separación brusca entre la capa cementada y el núcleo, por lo que tendría el peligro

de que no estableciera una perfecta trabazón entre ambas, y la capa cementada podría saltar fácilmente durante el trabajo, descasquillándose la pieza y quedando inútil.

Es preciso pues, utilizar la difusión del carbono en la zona de unión de ambas capas, sin que esto empobrezca la superficie de la capa cementada. Esto se puede conseguir mediante un nuevo calentamiento lentamente por debajo del punto crítico, con lo que se conseguirá cierta difusión en la zona de contraste (final de la capa cementada y el principio del núcleo); pero esta difusión, siendo tanto menor cuanto menos es el contraste, no llegará a afectar la superficie cementada de la pieza; por lo tanto, no perderá su dureza.

El progreso de la cementación se comprueba sacando muestras a intervalos regulares y examinándolas (barras testigo) por unas aberturas hechas para este fin.

Las llamadas "ampollas" formadas por la reacción entre la escoria contenida y el carbono, se presentan cuando se emplea hierro pudelado \* (acero ampollado); en algún tiempo a este acero se le conoció como "acero alemán". Estas ampollas no se presentan cuando se usa acero (también se le conoció como acero artificial debido a que no partían del mineral) .

Cuando se desea una barra con alto contenido de carbono, se vuelve a tratar y entonces se le conoce como barras convertidas dobles o barras glaseadas. En las barras de acero dulce

\* hierro colado dulce.

existe un corazón inalterado llamado núcleo y las barras muy duras se distinguen fácilmente, como barras con escamas, ya que sobre su fractura presentan planos de despegue brillante, (el carbono avanza del exterior al interior por lo que el núcleo es la parte de más bajo contenido en carbono con respecto a la superficie).

Por ejemplo: En unas barras de 13 mm de espesor, después de cementadas 4 y 15 días se obtenían aproximadamente los siguientes porcentajes de carbono:

Tiempo	Exterior	Centro	Contenido medio
4 días	1,0% C	0,10% C	0,45% C
15 días	1,15% C	0,85% C	0,95% C

Habiéndose comprobado experimentalmente que para diversos usos conviene utilizar aceros de diferente grado de carburación, o sea, de diferente contenido medio en carbono; se estableció una clasificación de aceros que se señala en la siguiente tabla:

PRINCIPALES CALIDADES DE ACERO  
FABRICADO POR CEMENTACION.

Calidad	Porcentaje medio de carbono	Aplicaciones
1	0,50	muelles
2	0,65	Herramientas agrícolas
3	0,80	cuchillería
4	1,00	cortantes
5	1,25	calidad limas
6	1,50	para fundir

La transición de uno a otro grado es muy importante tenerla presente, tan gradual como sea posible; los defectos que se observan en las barras de prueba nos darán el proceso al que fueron sometidas; así, si la línea de demarcación es demasiado brusca, el proceso se realizó demasiado rápido y se dice que las barras son propensas al desconchado; si el pote no cerró herméticamente y entró aire, la parte exterior de las barras se oxidará, llamándose barras aireadas; si la temperatura fue algo alta, y se fundió la parte exterior ligeramente se les llama barras glassadas; las barras ampoladas (laminadas o martilladas al calor amarillo) se conocen como barras aplanadas o acero en barras.

El tipo de utilización de los aceros impone muchas veces una cantidad elevada de carbono (elevada dureza) para soportar intensos rozamientos y una elevada tenacidad para contrarrestar (núcleo) las altas acciones fragilizadoras.

Modernas tendencias existen hacia el uso de aceros altos en níquel o aleaciones cromo-níquel para la fabricación de las cajas. Estos materiales sufren menos ataque de los gases producidos durante la cementación, que los aceros de baja aleación o fundiciones que en ocasiones suelen usarse. Sin embargo, utilizar aleaciones de alto contenido de níquel requiere de un cuidadoso control del azufre del cementante y de la atmósfera del horno; (por ejemplo si es de aceite pesado), ya que estas aleaciones son muy susceptibles al ataque del azufre a altas temperaturas.



### 3) MECANISMOS DE LA CEMENTACION

Durante los procesos de cementación son utilizados diferentes métodos y cementantes como son los líquidos, los sólidos y los gaseosos. La duración cuando se utilizan cementantes sólidos oscila entre 6 y 10 horas. Cuando se trata de sales (cementantes líquidos) varía de 1 a 6 horas y utilizándose cementantes gaseosos varía de 1 hora a 2 días.

En el proceso de cementación se pueden distinguir 3 etapas fundamentales:

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

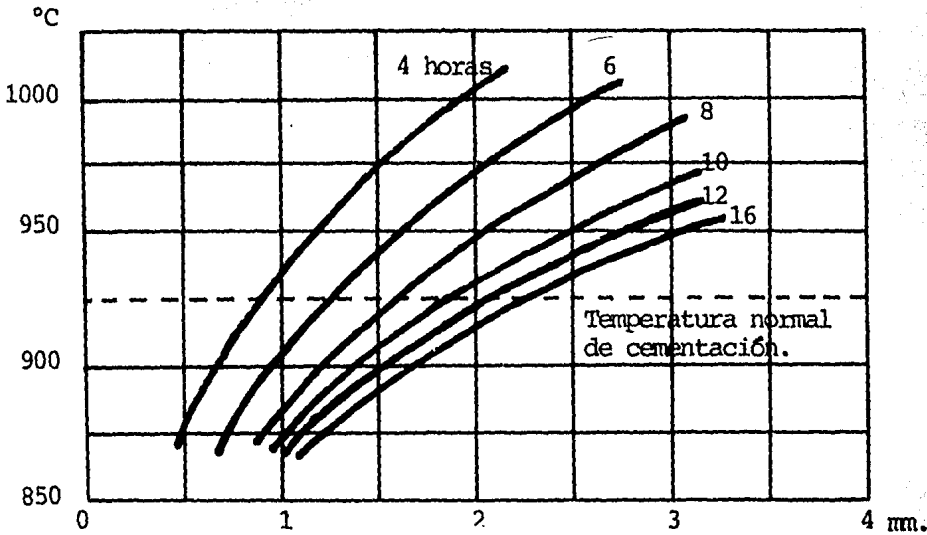
En realidad estas tres etapas se producen simultáneamente, señalándose de esta forma para facilitar el estudio de las diferentes fases del proceso.

La cantidad y distribución del carbono absorbido por cada pieza depende:

- 1° De la temperatura y duración de la cementación.
- 2° De la naturaleza de la sustancia cementante.
- 3° De la composición del acero sometido a la cementación.

En todas las cementaciones el carbono naciente se produce normalmente por descomposición de uno de los 2 gases siguientes: óxido de carbono o metano.

El óxido de carbono se puede producir en el interior de las

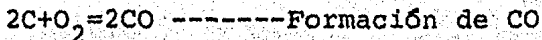


Profundidad de la penetración del carbono a diferentes temperaturas en función de la duración de la cementación con carburantes sólidos.

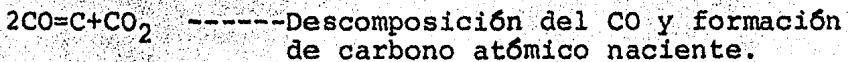
cajas de cementar por la reacción o descomposición de los carburantes sólidos que se emplean en la operación y en los baños de sales por la acción del oxígeno o dióxido de carbono sobre los cianuros o por descomposición de los cianatos. El metano que se emplea en los talleres de tratamiento térmico, se suelen recibir casi siempre en botellas, y a veces el metano puede provenir de la descomposición de hidrocarburos más complejos que durante el proceso se descomponen en hidrógeno y metano.

Es interesante señalar que la cementación del hierro no se produce por el carbono sólido, sino por la acción del óxido de carbono gaseoso (CO). Este se forma a elevadas temperaturas en el interior de las cajas de cementar al reaccionar el carbono con una cierta cantidad del oxígeno que contiene el aire, que siempre queda en el interior, de acuerdo con la

siguiente reacción:

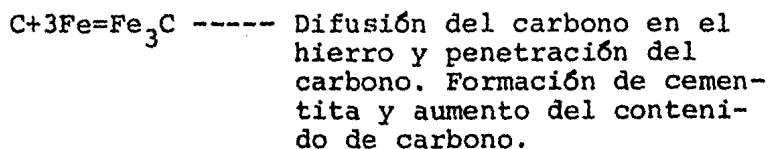


Posteriormente al ponerse en contacto con el óxido de carbono el hierro a elevada temperatura, se descompone en carbono atómico naciente y dióxido de carbono, según la siguiente reacción:



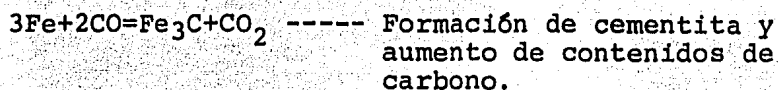
Ese carbono atómico es muy activo químicamente, se deposita sobre la superficie del hierro y penetra por difusión hacia el interior, produciéndose así un aumento del contenido de carbono. Así el hierro dulce ( $C \approx 0,10\%$ ) se transforma en acero ( $C \approx 1,0\%$  aprox.).

Al avanzar el carbono hacia el interior, se disuelve en el hierro, y aumenta progresivamente la riqueza en carbono de la aleación. A la temperatura ambiente aparecen cristales de cementita o carburo de hierro ( $Fe_3C$ ), cuyo contenido en carbono es 6,66%.



Esa cementita que es uno de los constituyentes microscópicos clásicos de los aceros y fundiciones, se reparte en el interior de las barras y, según la proporción que haya de cementita, será mayor o menor el contenido de carbono del material. Ese contenido de carbono dependerá de la temperatura alcanzada y del tiempo de permanencia a esa temperatura. Esas 2

últimas reacciones se pueden resumir en:



Para que se realice bien la difusión del carbono hacia el interior, el acero debe estar en estado austenítico (850 y 1000°C). Cuando está abajo de la temperatura inferior el hierro se presenta como hierro alfa, que prácticamente no disuelve el carbono, en cambio cuando está en estado austenítico, el hierro se encuentra en estado gamma que disuelve fácilmente cantidades de carbono que oscilan entre 0,9 y 1,7%. Por tanto la cementación debe hacerse a temperaturas superiores a  $A_{c3}$ . (\*)

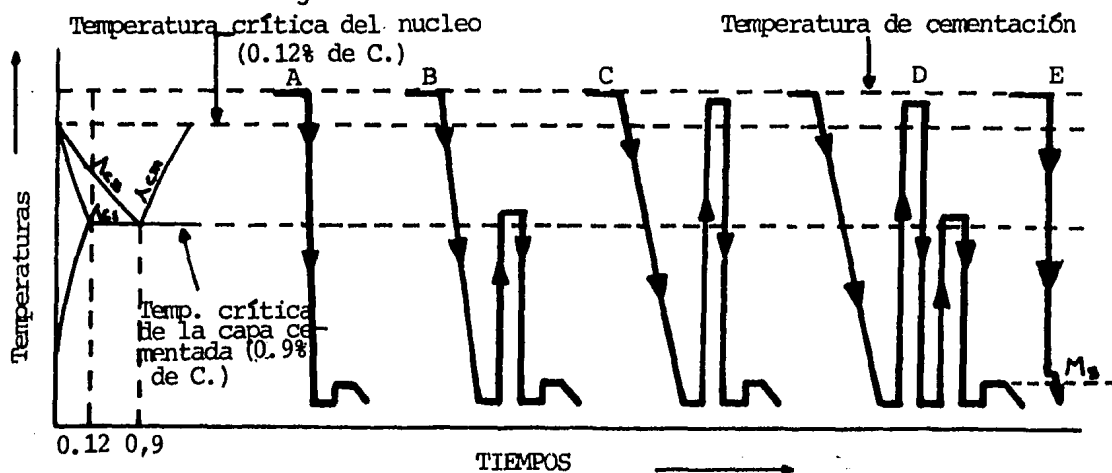


Diagrama de los tratamientos térmicos utilizados después de la cementación: A. temple desde la temperatura de cementación; B. temple a temperaturas entre  $A_{c1}$  y  $A_{c3}$ ; C. temple a temperaturas superiores a  $A_{c3}$ ; D. temple doble; E. austempering.

Cuando se cementan aceros de contenido de carbono relativamente elevado (0,2 a 0,4%), la cementación es más lenta que

(\*) Ver Anexo 2.

en los aceros de bajo contenido de carbono, debido a la velocidad de difusión del carbono.

Observando la fractura de las barras, después del temple, se podía conocer la penetración de la cementación y el porcentaje aproximado de carbono o grado de carburación. En general, después de la cementación, las barras son frágiles y de aspecto cristalino bastante grosero, muy distinto a las fracturas tenaces y fibrosas que caracterizan a las barras de hierro dulce. Por ello las barras de acero, antes de ser utilizadas, deben de ser forjadas nuevamente con gran cuidado a temperaturas bien definida para afinar su estructura y conseguir que queden con más tenacidad.

a) Defectos de la cementación, sus causas y formas de evitarlas.

En la tabla siguiente se reúnen los principales defectos que pueden aparecer en el proceso de cementación, las observaciones que ayudan a descubrir las anomalías y los remedios eficaces y prácticos utilizados normalmente en las secciones de tratamientos térmicos.

## DEFECTOS DE CEMENTACION

DEFECTOS	CAUSAS	OBSERVACIONES	REMEDIOS
<b>DUREZA INSUFICIENTE Y PUNTOS BLANCOS</b>	a) Acero de calidad inferior.	Los análisis no han sido respetados; se comprueban segregaciones.	Recepcionar el acero. Efectuar regularmente los análisis.
	b) Insuficiencia de cementación.	Un golpe de punzón atraviesa la débil capa carburada; la punta de diamante Rockwell hace lo mismo.	Distribuir las piezas en las cajas para que haya bastante cementante; poner los testigos de cementación en cada caja para seguir bien la marcha de la operación.
	c) Cementante muy pobre, de mala composición o conteniendo impurezas.	Los gases no se difunden; la capa carburada obtenida da una dureza deficiente después de un temple energético.	Hacer los ensayos de recepción de cementantes. Evitar que se impurifique el cementante; regenerar ampliamente el cementante después de utilizado.
	d) Superficie decarburada; temple incorrecto.	Ensayos Rockwell o a la lima no satisfactorios.	Vigilar la estanqueidad de las cajas de cementación. Reglar los hornos cuya atmósfera no debe ser oxidante.
	e) Mala regulación de las temperaturas de cementación o de temple.	Las capas cementadas son irregulares en espesor y dureza.	Utilizar los pirómetros frecuentemente contrastados; no fiarse de la observación visual; evitar las temperaturas irregulares en el mismo horno; si es necesario, modificar el modo de calentamiento.
<b>DESCONCHADO DE LA CAPA CEMENTADA</b>	Cementante muy brusco; espesor de la capa cementada demasiado profunda; temperatura de cementación muy elevada.	Se nota la presencia de cementita y una brusca variación del tanto por ciento en carbono entre la capa y el núcleo.	Emplear un cementante de buena composición. No calentar bruscamente y no pasar de una temperatura de cementación de 1.000° C como máximo.
<b>FRAGILIDAD</b>	Sobrecalentamiento del metal en la cementación o temple.	La fractura es cristalina; las partes débiles no tienen ninguna tenacidad.	Hacer el doble temple, regeneración y dureza. Evitar secciones delgadas irregulares. Calentar el baño para obtener temperatura uniforme (revenir a 200° C).
<b>DEFORMACION</b>	Variación de volumen en el curso del calentamiento. Piezas largas mal sostenidas en el horno.	Las piezas no son utilizables en este estado y deben ser enderezadas.	Observar las temperaturas. Calentar las piezas sobre unos soportes apropiados. Templar siguiendo el eje de simetría. Estudiar unos montajes de temple para laminar las piezas en el enfriamiento.

Como se ha visto la dureza de los aceros era una propiedad en cierto modo contraria a la tenacidad (resiliencia) y ductilidad (alargamiento y estriación); por lo cual se trataba de obtener durezas elevadas, templando aceros de alto contenido de carbono, por lo que quedaban frágiles; y en cambio, si se usaban aceros de bajo contenido de carbono, se obtenían piezas de buena tenacidad pero de poca dureza.

En teoría la solución a este problema es la cementación obteniendo gran dureza superficial y buena tenacidad en el núcleo. La cementación consiste en aumentar el porcentaje de carbono, para conseguir en ella, una vez templada, la dureza de los aceros de alto contenido de carbono; quedando así las piezas con gran dureza superficial y buena tenacidad.

Con estas combinaciones, que son muy adecuadas para piezas de maquinaria como engranajes, levas, etc., que deben tener una superficie muy dura para resistir el desgaste y, en cambio, el núcleo de los dientes muy tenaz para resistir los golpes que pueden producirse en las alteraciones de funcionamiento de la máquina, arranques, paradas bruscas, etc.

Con los aceros de dureza másica\* se cumplen estas condiciones, pero la baja resiliencia, de estos aceros a los revenidos de 150/200°C, adecuados para tales resistencias dan lugar a que el núcleo de las piezas no posea la tenacidad que en muchos casos es requerida.

Se emplean multitud de tipos de aceros para cementar, aleados o no, conteniendo generalmente de 0,05 a 0,25% de carbono  
\* en el núcleo.

y tratándolos por medio de la cementación el contenido de carbono de la capa superficial suele ser de 0,8 a 0,9%, no conviniendo que pase del 1,0%.

El espesor más común de la capa cementada es de 0,5 a 1,5 mm. Si las piezas son pequeñas y no han de rectificarse posteriormente, se cementa a veces con capas inferiores a 0,5mm. Los espesores superiores a 1,0mm, sólo se emplean para aplicaciones especiales, como construcción de chapas para blindajes.

De acuerdo con las dimensiones de la pieza a construir se hace la elección del acero, lo que nos indica la templabilidad a exigir: la resistencia que debe soportar el núcleo y la presión que debe soportar la zona cementada. La dureza superficial es casi igual para todos después de tratados y suele alcanzar de 60 a 65 Rockwell\* C, y dependerá del tanto por ciento de carbono en la superficie, logrado mediante la cementación; la resistencia de la capa cementada depende fundamentalmente del espesor de la misma, pero también de la composición del acero base. Es decir, como vemos ambos dependen de la cementación. En cuanto al núcleo depende del acero empleado.

Cuanto mayor sea la presión que soporte la pieza en su capa cementada mayor debe ser la resistencia en su núcleo, pues de lo contrario se corre el peligro de que, aunque la capa cementada soporte sin romperse la presión a que se halle sometida, puede deformarse la pieza por incrustarse

\* Ver Anexo 1



aquella en un núcleo demasiado blando.

A continuación las templabilidades y resistencias en el núcleo después del tratamiento de los aceros. (ver Anexo 3)\*

Aceros	D crítico	R en el núcleo
F.152*	8 mm	75 Kg/mm <sup>2</sup>
F.155*	14 "	95 "
F.154*	22 "	95 "
F.159*	30 "	100 "
F.157*	33 "	110 "
F.162*	42 "	100 "
F.153*	55 "	120 "
F.156*	70 "	130 "
F.161*	75 "	110 "
F.158*	105 "	125 "

La resistencia mecánica, límite de elasticidad, resiliencia, alargamiento y estricción del conjunto de una pieza son parecidas a las del acero empleado sin cementar, después de haberlo sometido a los mismos calentamientos y tratamientos térmicos finales. La resistencia y límite de elasticidad quedan un poco mejoradas por el aumento del contenido de carbono de la capa cementada. La tenacidad, en cambio es inferior, sobre todo en los aceros al carbono, debido al crecimiento del grano, que se origina a las temperaturas de cementación.

Comunmente se limita la cementación de las piezas a las zonas que realmente la requieren por estar sometidas a rozamientos, evitando que las zonas libres de él se cemen. Esto puede lograrse cobreando en un baño electrolítico las partes que no deben cementarse, y así la película de cobre depositada, evitan el contacto con la materia cementante, impidiendo en esas zonas la cementación.

Debemos considerar que si las piezas en servicio pueden hallarse sometidas a acciones corrosivas, deberá eliminarse el cobre una vez realizada la cementación, ya que de lo contrario formará un par galvánico de efectos perjudiciales para el material. El cobre puede eliminarse fácilmente con el chorro de arena si no fuese eliminado en las operaciones de mecanizado.

También puede evitarse la cementación empleando pastas anticementantes que producen efectos semejantes.

El tratamiento térmico más adecuado para estos aceros, una vez cementados, es el doble temple y revenido.

La cementación en sales tiene la ventaja de su rapidéz, que deja las piezas limpias y libres de oxidaciones, y finalmente de que sólo se requiere el temple "B"\* y el revenido a 150/200°C como tratamiento, pues por su rapidéz produce menores efectos de sobrecalentamiento.

#### a) Tipos de aceros para cementar.

Hay dos tipos de aceros para cementar:

- a.1) Aceros al carbono para cementar
- a.2) Aceros aleados para cementar
  - a.2.1) Aceros débilmente aleados
  - a.2.2) Aceros de alta aleación.
- a.1) Aceros al carbono para cementar.

En este grupo están incluidos los aceros que sólo contienen en cantidades apreciables carbono, silicio y manganeso, que son los 3 elementos fundamentales en

\* Temple a temperaturas entre Ac<sub>1</sub> y Ac<sub>3</sub>.

los aceros ordinarios, y siempre contienen pequeños porcentajes de impurezas como fósforo, oxígeno, azufre, etc. Para conseguir durezas superiores a los 60 Rc\* en estos aceros después de la cementación y temple posterior, es necesario enfriarlos rápidamente en agua, ya que la velocidad crítica de temple del acero de 0,9% C, que constituye la capa cementada es muy elevada. Estos aceros contienen de 0,1 a 0,25% C excepcionalmente llegan a 0,4% C (utilizando estos últimos en muy pocas ocasiones, porque usando tan alto contenido de carbono las piezas quedan, generalmente con poca tenacidad en el núcleo).

El porcentaje de silicio varía de 0,1 a 0,35% y de manganeso unos autores dicen que varía de 0,3 a 0,6% y otros de 0,5 a 0,7%; aunque a veces se utilizan porcentajes superiores (0,6 a 0,86%) de manganeso para mejorar su templabilidad.

El uso de estos aceros, en el núcleo de las piezas cementadas no se obtienen resistencias superiores a 80 Kg/mm<sup>2</sup>.

En la periferia después del temple rápido en agua, cuando se trata de piezas de tamaño reducido, se consiguen durezas iguales que con los aceros aleados. Estos aceros tienen el inconveniente que cuando se tratan de piezas complicadas en su forma, las deformaciones son importantes, otro inconveniente es que

\* Ver Anexo I.

umenta mucho el tamaño de su grano a la temperatura de cementación que suele ser de 875 a 950°C.

El inconveniente del crecimiento de grano podría solucionarse empleando aceros de grano muy fino, que al crecer quedaría en tamaños considerados como normales, de 6 a 9 A.S.T.M., teniendo el inconveniente que su templabilidad es muy baja; por lo que se prefiere usar aceros de grano normal, aunque queden más frágiles y sufran mayores deformaciones que los de grano fino. Por lo que y para obtener con ellos buenos resultados (tenacidad aceptable) es necesario cuidar bien los tratamientos de regeneración, que con frecuencia suele ser necesario dar después de la cementación.

Para pequeñas piezas y sencillas suelen utilizarse porcentajes entre 0.08 y 0,12% C.; para piezas de tamaño medio 0,12 a 0.17% C.; y para piezas grandes hasta 0,2% C., pues de otro modo se endurece muy poco el núcleo y no puede resistir sin deformarse las presiones que ejerce sobre él la zona exterior cementada al contraerse. Con frecuencia se fabrican estos aceros con porcentajes de manganeso más elevados (0,6 a 0,9% C.) que los que suelen tener los aceros al carbono de usos generales ( $Mn=0,3$  a 0,6%), porque en los aceros de cementación al carbono, interesa mejorar la templabilidad para obtener en el proceso

buenos resultados.

El I.H.A.\* ha seleccionado como acero al carbono de cementación el F-151, de 0,08 a 0,12% de C; 0,3 a 0,4% de Mn; y 0,15 a 0,35% de Si, cuya temperatura de cementación es de 900 a 950°C, y después de 2 temple uno al agua o aceite, de 800 a 910°C y otro de 740 a 770°C en agua y revenido a 200°C, queda con una dureza superficial de 115 a 145 RB, una resistencia mecánica de 45 Kg/mm<sup>2</sup> y una resiliencia de 15 Kg/mm<sup>2</sup>.

a.2) Aceros aleados para cementar.

El manganeso aumenta el tamaño del grano en el proceso de su fabricación; esta tendencia puede corregirse añadiendo aluminio.

El manganeso baja las temperaturas críticas de temple lo que reduce el riesgo de descarburaciones y deformaciones. También mejora la templabilidad en piezas no muy grandes, en agua.

El níquel baja también las temperaturas críticas, pudiendo templar a más bajas temperaturas; además mejora la resistencia y tenacidad de los aceros.

El cromo tiende a aumentar el tamaño del grano en la fabricación, corrigiéndose con la adición de aluminio en la colada, además aumenta la dureza y la resistencia de las piezas y la dureza y desgaste de la capa cementada.

El molibdeno mejora la resistencia al desgaste y la templabilidad, manteniendo la dureza de la capa periférica aunque la pieza se caliente durante el trabajo

\* Instituto del Hierro y del Acero (España).

a temperaturas bastante elevadas.

Conviene incorporar 2 o 3 elementos de aleación a los aceros de gran resistencia, pues así, sus influencias favorables se suman y pueden contrarrestarse algunos defectos. Así, por ejemplo, el empleo conjunto de cromo y níquel resulta bastante positivo ya que el cromo aporta dureza y resistencia al desgaste al acero y, el níquel aporta tenacidad, del que carecen los aceros al cromo solamente. La templabilidad y resistencia del núcleo resultan mejoradas por la influencia de ambos elementos conjuntamente. Si a estos 2 elementos se añade el molibdeno, se mejora aún más la templabilidad y aumenta también la dureza de la capa cementada.

#### a.2.1) Aceros debilmente aleados.

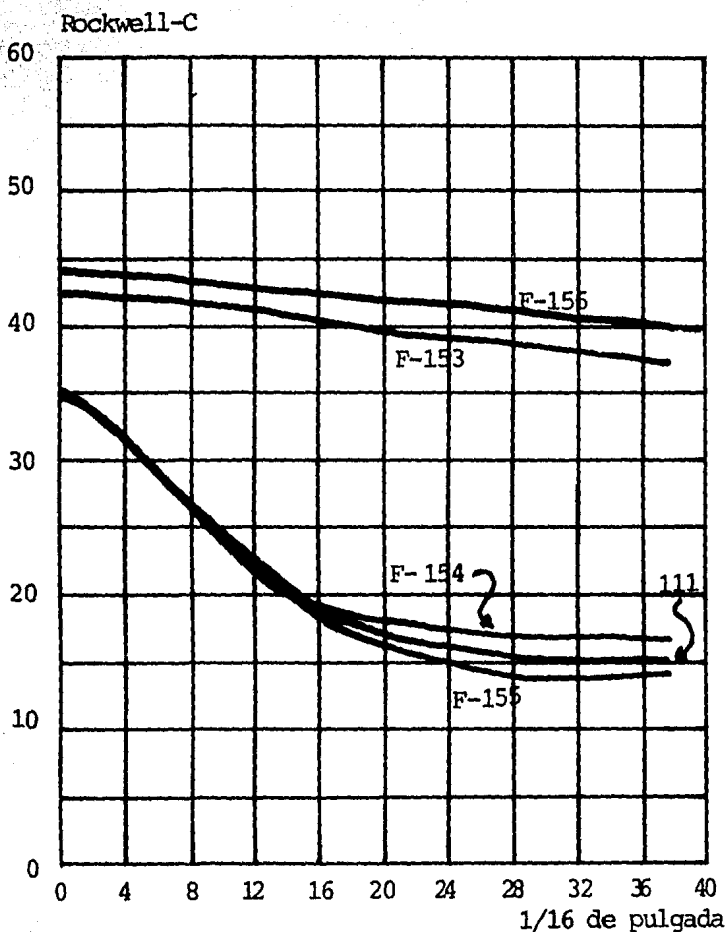
A este grupo pertenecen los aceros de baja aleación, en los que la suma de los porcentajes de elementos aleados: cromo, níquel, molibdeno y manganeso es inferior a 3%. Entre ellos se encuentran los aceros cromo-molibdeno con  $Cr=1\%$ ,  $Mo=0,2\%$  y  $C=0,14\%$  y también los de la misma aleación y más elevado carbono ( $C=0,17\%$  y también los de  $C=0,21\%$ ). Los aceros níquel-molibdeno con 0,1 a 0,2%,  $Ni=1,6$  a  $2\%$  y  $Mo=0,2$  a  $0,3\%$ . En la actualidad son cada día más utilizados los aceros de triple aleación y bajo porcentaje de elemento aleado cromo-níquel-molib-

deno, con porcentajes de carbono variables desde 0,1 a 0,25% y contenidos en Cr= 0,35 a 1%, Ni=0,35 a 1,5% y Mo=0,15 a 0,4%. De todos estos aceros los de más elevada aleación se suelen templar en aceite y los de menos aleación en agua. Para un mismo acero también suele ocurrir que cuando se trata de piezas pequeñas se pueden templar en aceite y las piezas grandes, en cambio, se deben templar en agua. A veces, también, es muy interesante durante unos segundos en agua y pasar luego al aceite. Estas variables en los métodos de enfriamiento se derivan de la templabilidad de estos aceros que, en muchos casos, se encuentran justo en el límite y no llega a ser suficiente para que se pueda realizar el temple en aceite, ya que enfriando en esta forma la dureza superficial que se alcanza no llega a 60 Rockwell C.

Con estos aceros, combinando los elementos de aleación con un adecuado porcentaje de carbono, que varía entre 0,08 a 0,25%, se llega a alcanzar en el núcleo resistencias que varían desde 70 a 130 Kg/mm<sup>2</sup>.

Las diferencias entre las propiedades de los diversos tipos de aceros de este grupo, son difíciles de señalar y en la mayoría de los casos se pueden conocer esas diferencias comparando las curvas "Jominy" de las diferentes

clases.



Curvas Jominy de varios aceros de cementación de uso frecuente.

Los aceros de triple aleación y bajo porcentaje de elementos aleados tienen templabilidades muy aceptables, y tienen la ventaja que en su fabricación se llega a un aprovechamiento muy completo de las chatarras que contienen ele-



mentos de aleación.

a.2.2) Aceros de alta aleación.

Cuando se quiere evitar las deformaciones y se quieren obtener además elevadas resistencias en el núcleo (piezas de gran responsabilidad) se emplean aceros con elementos de aleación en porcentajes superiores a 3%. El contenido en carbono casi siempre suele ser inferior a 0,2% de C, pues al ser la templabilidad de estos aceros muy elevada no son necesarios porcentajes más altos de carbono para alcanzar resistencias en el núcleo de 90 a 150 Kg/mm<sup>2</sup>.

A este grupo pertenecen los clásicos aceros al níquel de C=0,1 a 0,2%, Ni=3 a 5%. También son muy utilizados para estos usos los aceros cromo-níquel con C=0,1 a 0,2%, Cr=0,75% y Ni=3%, y los de Cr=1,0% y Ni=4,0%. Para piezas de aviones y motores de aviación y piezas de alta resistencia y gran tamaño, son muy empleados los aceros al cromo-níquel-molibdeno con los mismo o parecidos porcentajes de carbono y elementos de aleación que los cromo-níquel que acabamos de citar, y contenidos en molibdeno variables de 0,2 a 0,6%. Conviene conservar el contenido en carbono relativamente bajo para que no se endurezca demasiado el núcleo y llegue a disminuir

sensiblemente la tenacidad. Para evitar la presencia de austenita retenida, en la zona periférica, después del temple, a veces se da a las piezas tratamientos especiales a temperaturas inferiores a cero grados.

b) Selección de los aceros de cementación.

Es difícil dar reglas generales para la elección de aceros destinados a la fabricación de piezas cementadas, ya que son muchos los factores que hay que tomar en cuenta, a continuación daremos unas normas que podrán orientar en forma muy general para su selección.

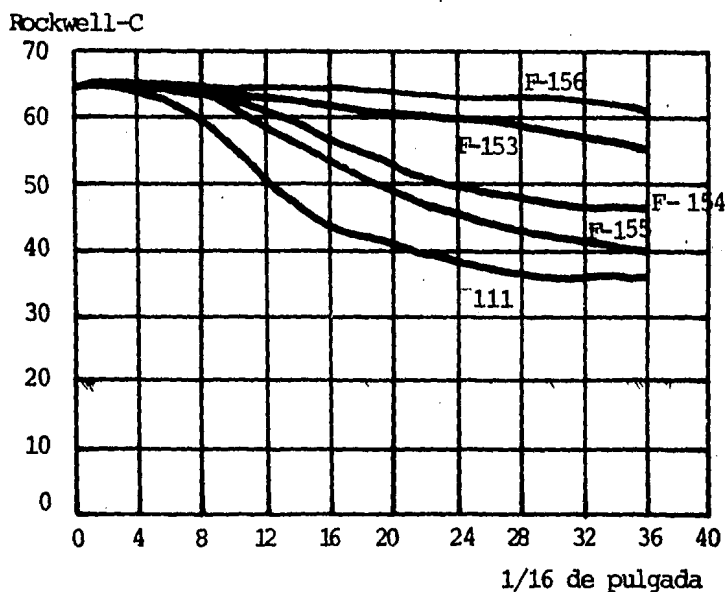
Piezas pequeñas de formas regulares, en las que no es probable que se presenten problemas de deformaciones, ni es de gran interés ni la resistencia ni la tenacidad del núcleo.	ACEROS AL CARBONO	TEMPLE AL AGUA
Piezas de tamaño mediano y pequeño en las que deben cuidarse las deformaciones, y en las que interesa buena tenacidad y resistencias en el núcleo variable de 70 a 90 Kg/mm <sup>2</sup> .	ACEROS DE MEDIA ALEACION	TEMPLE AL ACEITE O AL AGUA
Piezas de cualquier tamaño en las que no se permiten deformaciones sensibles en el temple y en las que interesa buena tenacidad y alta resistencia en el núcleo variable generalmente de 90 a 150 Kg/mm <sup>2</sup> .	ACEROS DE ALTA ALEACION	TEMPLE AL ACEITE
PIEZAS A FABRICAR	CLASE DE ACERO	TRATAMIENTO RECOMENDABLE

c) Influencia de los elementos aleados en los aceros de cementación.

Entre las características o factores que pueden quedar modificados por la influencia de los elementos de aleación, la templabilidad y los puntos críticos son los que sufren variaciones más importantes.

La templabilidad de la parte periférica y del núcleo de las piezas cementadas quedan muy modificadas por la presencia de elementos aleados, circunstancia que modifica notablemente las características que con cada acero se pueden obtener.

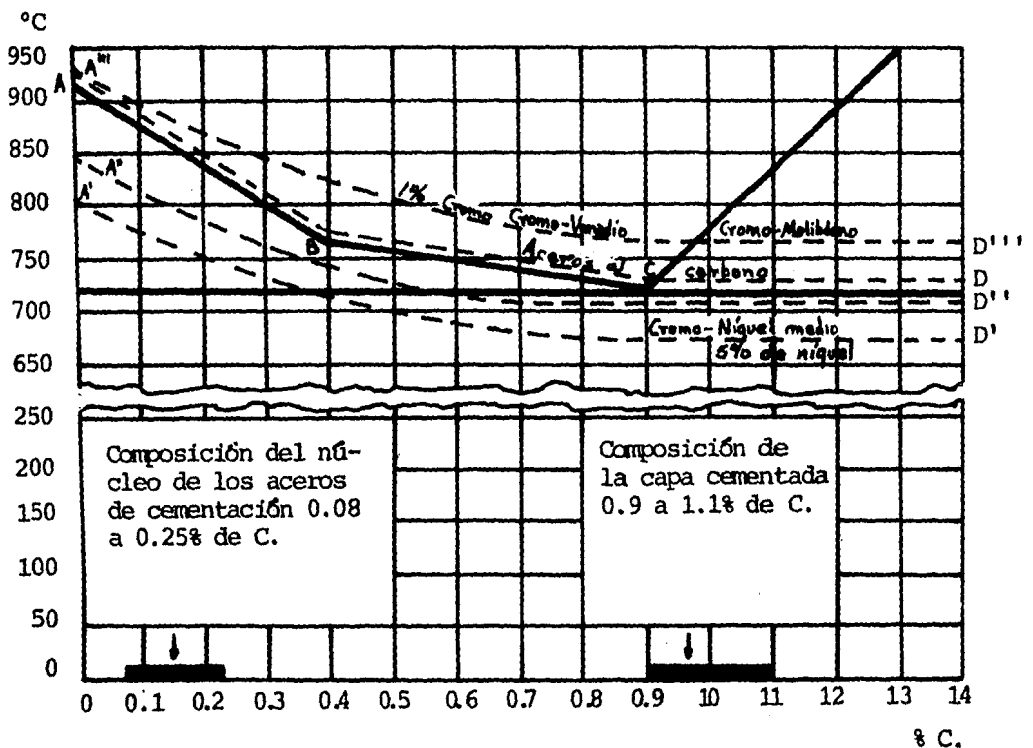
En la siguiente gráfica se puede observar las curvas de diversos aceros de cementación y que corresponden a las composiciones del acero de las capas cementadas (Curvas Jominy).



Curvas Jominy correspondientes a la capa cementada de varios aceros de cementación de uso frecuente.

Observando esas curvas, se aprecian fácilmente diferencias importantes entre ellas y se comprende por qué unos aceros deben ser templados en agua y otros en cambio pueden ser templados con un simple enfriamiento en aceite. Los elementos de aleación tienen una influencia bastante importante sobre las temperaturas críticas del material, tanto en lo que corresponde a la parte cementada como a la zona sin cementar, y también, como es natural, influyen en las temperaturas de tratamiento que deben emplearse en cada caso.

El níquel y el manganeso hacen descender los puntos críticos y el cromo y el molibdeno los elevan.



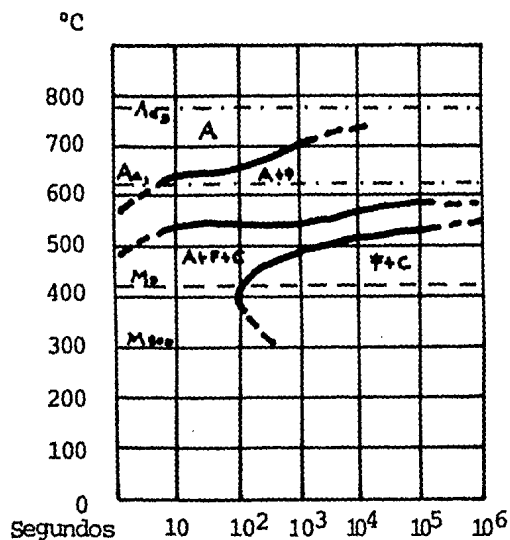
Temperaturas críticas de diversos aceros al carbono y aleados.

En la gráfica anterior se señalan las temperaturas  $Ac_3$ ,  $Ac_{32}$ , y  $Ac_{321}$ , de diversos aceros, por medio de las líneas AD, A'D', etc. La línea A'D' corresponde a los aceros de 5% de Ni; la A''D'' a los aceros cromo-níquel medios y la A'''D''' a los aceros cromo-molibdeno y cromo-vanadio con 1% de Cr. Las temperaturas críticas de un acero al carbono de 0,12% de C, son  $Ac_1=732^\circ$  y  $Ac_3=870^\circ$ . Las de un acero cromo-níquel de 0,1% de C; 0,6% de Cr, y 3% de Ni, son:  $Ac_1=715^\circ$  y  $Ac_3=790^\circ$ , y las de un acero cromo-molibdeno 0,12% de C; 1% de Cr y 0,2% de Mo, son:  $Ac_1=775^\circ$  y  $Ac_3=875^\circ$ .

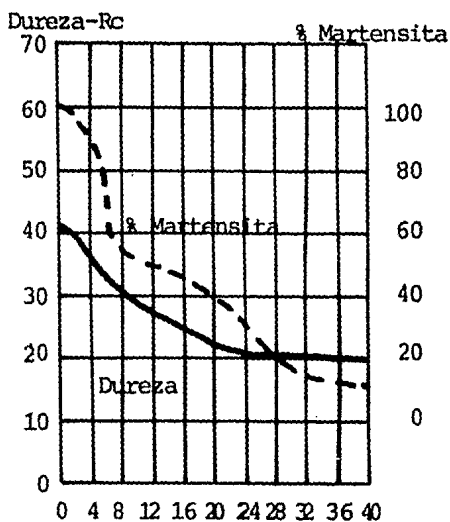
Teniendo en cuenta que la cementación debe hacerse a temperaturas superiores en 30 a 60° al punto  $Ac_3$ , pues así el acero se encuentra en estado austenítico, que disuelve con gran facilidad el carbono, las temperaturas de cementación serán:

Aceros al carbono.....	900 a 950°
Aceros cromo-níquel .....	850 a 900°
Aceros cromo-molibdeno .....	900 a 950°

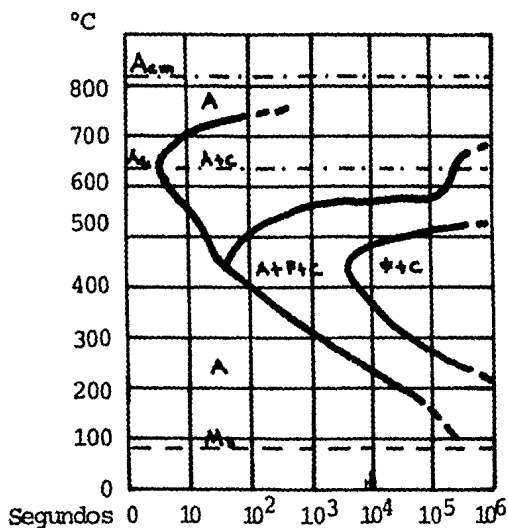
Si se emplearan temperaturas inferiores al punto  $Ac_3$  una parte del acero se encontraría en estado ferrítico, que no disuelve o disuelve cantidades muy pequeñas de carbono, y la penetración del carbono en la cementación sería muy lenta. Las temperaturas de tratamiento que se emplean para el primer temple (temple del núcleo) suelen ser de 5 a 25°C más elevadas que el punto  $Ac_3$  y para el segundo (temple de la periferia) de 35 a 55° más elevadas que el punto  $Ac_1$ .



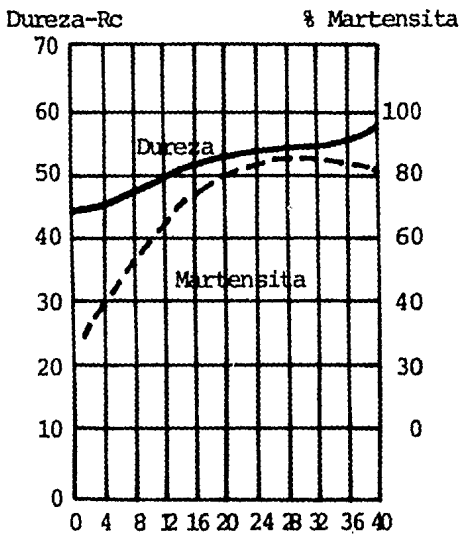
Curva de la S de un acero de cementación al níquel de la siguiente composición: C= 0.20%; Mn=0.52% y Ni= 5%.



Curva Jominy y porcentaje de martensita correspondiente a los diferentes puntos de la probeta de un acero de la misma composición. Temperatura de calentamiento para el temple, 925°.



Curva de la S correspondiente a la capa cementada (1% de Carbono aprox.) del mismo acero al níquel.



Curva Jominy y porcentaje de martensita corresp. a los diferentes puntos de la probeta de un acero de la misma composición. Temperatura de calentamiento para el temple, 925°. En el extremo templado existe gran cantidad de austenita retenida.

Aceros al carbono.

Temple del núcleo, 980°C.

Temple de la periferia, 780°C.

Acero cromo-níquel.

Temple del núcleo, 825°C.

Temple de la periferia, 780°C.

Acero cromo-molibdeno.

Temple del núcleo, 890°C.

Temple de la periferia, 825°C.

La velocidad de penetración y la distribución del carbono en el interior del acero no se modifica muy sensiblemente por la presencia de elementos de aleación en el acero. Sin embargo, se observa que el níquel y el silicio tienden a retrasar esa penetración, y en cambio los elementos formadores de carburos como el cromo, molibdeno y manganeso lo aceleran.

El manganeso en general da lugar a aceros de grano grueso, pero este problema se resuelve en parte, haciendo durante el proceso de fabricación del acero adiciones especiales (generalmente de aluminio) para conseguir afinar el grano. El manganeso baja los puntos críticos de los aceros por lo que el temple de los aceros con manganeso se realiza a temperaturas más bajas que lo normal, lo cual tiene ciertas ventajas, porque se evitan descarburaciones y deformaciones. El manganeso mejora notablemente la templabilidad por lo que a veces es posible templar en aceite piezas

que con bajo contenido en manganeso sería necesario templar en agua.

El níquel mejora la tenacidad y la resistencia de los aceros de cementación. Baja los puntos críticos y al poderse utilizar (lo mismo que con los aceros al manganeso) temperaturas de tratamiento más bajas que lo normal, se disminuyen los peligros de formación de cascarilla, y la aparición de descarburaciones y deformaciones. El níquel tiende a retrasar la formación de la austenita en martensita.

Si en los tratamientos se calienta el acero a temperatura demasiado elevada, en la zona periférica de las piezas cementadas de los aceros altos en níquel aparece austenita retenida y el material no quedatan duro como le corresponde a su composición. Empleando las temperaturas de temple correctas (más bajas que las que corresponden a otros aceros) se resuelve fácilmente este problema.

El cromo aumenta en la zona central de las piezas cementadas la resistencia y la dureza que se obtiene después del temple, así como la dureza y resistencia al desgaste de la capa periférica. A veces, estos aceros son de grano grueso, frágiles y muy sensibles a pequeñas diferencias en las temperaturas de temple. Esas dificultades se pueden resolver lo mismo en el caso de los aceros al manganeso, fabricando los aceros al cromo con grano fino (adicionando aluminio en la cucharada de colada). En los pri-



meros años de empleo de los aceros al cromo, estos problemas impidieron que se difundiera rápidamente su empleo, pero posteriormente cuando se ha estudiado con detalle el tamaño de grano de los aceros y se ha llegado a regularlo, su empleo se ha extendido extraordinariamente. El molibdeno mejora la templabilidad y la resistencia al desgaste. Además mantiene dura la capa periférica a pesar de que durante el trabajo llegue a calentarse por el roce de la superficie de las piezas y alcancen temperaturas relativamente elevadas.

Con la adición de níquel y del cromo a la vez, se ha conseguido en los aceros de cementación alcanzar excelentes características mecánicas. El níquel da a los aceros gran tenacidad que precisamente les falta a los aceros al cromo y el cromo en cambio les da gran dureza y resistencia al desgaste que no tienen los aceros al níquel. Ambos aumentan la templabilidad y la resistencia en el núcleo.

Añadiendo además molibdeno a los aceros al níquel se mejora notablemente su templabilidad y con los aceros cromo-níquel-molibdeno ha sido posible fabricar piezas cementadas de gran tamaño con resistencia y durezas muy elevadas.

##### 5) PRINCIPALES CLASES DE ACEROS DE CEMENTACION.

Excepcionalmente cuando no interesa conseguir una gran tenacidad en el núcleo se llegan a emplear, a veces, aceros hasta de 0,4% de carbono. Entre los diversos factores que deben tenerse en cuenta para la elección de uno y otro tipo de acero de cementación, los más importantes a considerar

son tres: 1°. La forma o tamaño de las piezas que se va a fabricar junto con las tolerancias de dimensiones que se exigirán a las piezas después del temple (ya que en función de las tolerancias que se admiten en las deformaciones, se decidirá si el temple se debe hacer en agua, en aceite o por algún otro procedimiento y, en consecuencia, estas condiciones servirán, en gran parte, para señalar los elementos de aleación que debe tener el acero; 2°. La resistencia que deben tener las piezas en el núcleo central y; 3°. El precio que se puede llegar a pagar por el acero.

A pesar de ser las circunstancias que acabamos de señalar las más importantes para la selección de aceros de cementación, en la actualidad en muchos talleres se hace todavía la selección por sentimiento o preferencia personal hacia una composición química, más o menos conocida. Esta es una de las causas por la que, a veces, por no valorar debida-

Marca	COMPOSICIÓN EN %							
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Alu
P 151	0,08/0,12	0,15/0,35	0,30/0,40	< 0,01	< 0,01	—	—	—
P 152	0,10/0,15	0,10/0,35	0,30/0,60	< 0,01	< 0,01	3,80/4,50	—	—
P 153	0,10/0,15	0,10/0,35	0,30/0,60	< 0,01	< 0,01	3,80/4,50	0,50/1,10	—
P 154	0,10/0,15	0,10/0,35	0,30/0,60	< 0,01	< 0,01	2,50/3,00	0,50/0,80	—
P 431	0,17/0,22	0,10/0,35	1,00/1,50	< 0,01	< 0,01	—	1,10/1,50	—
P 432	0,12/0,16	0,10/0,35	0,10/0,80	< 0,01	< 0,01	—	0,60/0,90	—
P 155	0,12/0,15	0,10/0,35	0,30/0,60	< 0,01	< 0,01	—	1,00/1,30	0,15/0,25
P 156	0,12/0,18	0,10/0,35	0,30/0,60	< 0,01	< 0,01	3,80/4,50	0,80/1,10	0,15/0,35
P 157	0,13/0,18	0,10/0,35	0,30/0,60	< 0,01	< 0,01	2,50/3,50	0,50/0,80	0,25/0,35
P 158	0,15/0,20	0,10/0,35	0,10/0,70	< 0,01	< 0,01	1,00/2,20	1,80/2,20	0,15/0,25
P 159	0,15/0,20	0,10/0,35	0,10/0,70	< 0,01	< 0,01	1,50/2,00	0,10/0,30	0,15/0,25

Aceros de cementación del Instituto del Hierro y del Acero (España). Ver Anexo 3.

Marca	COMPOSICIÓN EN %									
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V	P	S	
S A E (Estados Unidos)										
1010	0,05-0,15	0,30-0,60						< 0,045	< 0,055	
1013	0,10-0,20	"						"	"	
1025	0,20-0,30	"						"	"	
1115	0,10-0,20	1,30-1,60						"	"	
2315	0,10-0,20	0,30-0,60			3,25-3,75			< 0,04	< 0,05	
2320	0,15-0,25	"			3,25-3,75			"	"	
2512	0,12	"						"	"	
2915	0,10-0,20	"			4,75-5,25			"	"	
3115	"	"		0,65-0,75	1,00-1,30			"	"	
3275	"	"		0,90-1,25	1,50-2,00			"	"	
3220	0,15-0,25	"		0,60-1,25	1,50-2,00			"	"	
3312	0,14	"		1,15-1,75	3,25-3,75			"	"	
3325	0,20-0,30	"		1,25-1,75	3,25-3,75			"	"	
3415	0,10-0,20	"		0,60-0,95	2,75-3,25			"	"	
4115	"	"		1,00		0,15-0,25		"	"	
4615	"	0,40-0,70			1,65-2,00	0,20-0,30		"	"	
4620	0,14-0,25	"			"	"		"	"	
4640	0,15-0,45	0,50-0,80			"	"		"	"	
4815	0,10-0,20	0,40-0,60			3,25-3,75	"		"	"	
5120	0,15-0,25	0,70-0,90		0,60-0,70	"	"		"	"	
5115	0,10-0,20	"		0,80-1,10	"	"	0,15-0,18	"	"	
6120	0,13-0,23	"		0,80-1,10	"	"	"	"	"	
D I N (Alemania)										
								Niveles de normalización		
St 1061	0,05-0,13	< 0,50	< 0,35					C 15		
St 1661	0,11-0,18	< 0,40	< 0,35					C 22		
St 22	0,19-0,25	0,20-0,30	0,15-0,30							
St 15	0,10-0,17	< 0,50	< 0,35	< 0,30	1,50-1,25			14 NiCr 10		
ECN 25	"	"	"	0,75-1,20	2,50-3,25			14 NiCr 14		
ECN 35	"	"	"	0,75-1,20	3,50-4,25			14 NiCr 18		
ECN 45	"	"	"	1,10-2,20	4,50-5,25					
EC 30	0,10-0,16	0,40-0,60	"	0,30-0,50						
EC 40	0,12-0,18	0,40-0,60	"	0,60-0,90						
EC Me 80	0,13-0,17	0,70-1,00	"	0,80-1,20		0,20-0,30		15 Cr 3		
EC Me 100	0,17-0,22	0,80-1,10	"	1,00-1,30		0,20-0,30		15 Cr 5		
EC 80	0,14-0,19	1,10-1,40	"	0,80-1,10						
EC 100	0,18-0,23	1,20-1,50	"	1,20-1,50						
EC Me 200	0,17-0,23	1,30-1,50	"	1,70-2,00		0,15-0,25				
20 Me Cr 3	0,17-0,22	1,10-1,40	< 0,40	1,00-1,70						
22 Me Cr 6	0,20-0,25	1,30-1,60	< 0,40	1,30-1,60						
U N I (Italia)										
C 10	0,05-0,13	0,30-0,60	< 0,35					< 0,035	< 0,035	
C 13	0,11-0,18	0,30-0,70	"					"	"	
18 C 3	0,12-0,16	0,40-0,80	"	0,60-0,90				"	"	
18 NiCr 3	0,13-0,18	1,00-1,40	"	0,80-1,10				"	"	
20 NiCr 3	0,17-0,22	1,00-1,50	"	1,10-1,50				"	"	
14 Ni 5	0,12-0,16	0,80-1,10	"	1,00-1,30	0,90-1,10			"	"	
19 Ni 5	0,16-0,22	0,80-1,10	"	1,00-1,30	0,70-1,10			"	"	
19 Ni 8	0,16-0,22	0,40-0,80	"	1,80-2,20	1,50-1,80			"	"	
16 Ni 10	0,11-0,18	0,40-0,80	"	1,80-2,20	0,20-0,30	0,20-0,30		"	"	

Aceros de cementación de uso normal en Estados Unidos, Alemania e Italia. Ver Anexo 3.

mente las circunstancias, que antes hemos citado, decisivas en el proceso, no se obtienen buenos resultados en determinadas fabricaciones.

Los aceros de cementación, de acuerdo con los elementos de aleación que contienen, se pueden clasificar en tres grupos: 1°. Aceros al carbono; 2°. Aceros de media aleación; y 3°. Aceros de alta aleación.

Por la resistencia y tenacidad que se puede llegar a alcanzar en el núcleo de las piezas cementadas, se pueden clasificar en otros tres grupos: 1°. Aceros de gran tenacidad y baja resistencia, en los que no se suele dar en general gran importancia a la resistencia; con ellos se suele obtener en el núcleo alargamientos superiores a 14%, resiliencias superiores a 12 Kg/cm<sup>2</sup> y resistencia y tenacidad media, con resistencias variables en el núcleo de 80 a 110 Kg/mm<sup>2</sup>, y 3°. Aceros de alta resistencia en el núcleo con resistencias variables de 110 a 160 Kg/mm<sup>2</sup>.

Por el método de realizar el temple se pueden clasificar en; 1°. Aceros de temple al agua; 2°. Aceros de temple al agua o al aceite (utilizándose uno u otro método de enfriamiento según sea el espesor de la pieza); y, 3°. Aceros de temple al aceite.

Finalmente por el tamaño de grano o aptitud de crecimiento del grano durante el calentamiento que se realiza en la cementación, se pueden clasificar en: 1°. Aceros de grano grueso, tamaño de grano del n°1 al 4; 2°. Aceros de grano medio, tamaño de grano del n°5 y 6; y 3°. Aceros de grano fino, tamaño de grano del n°7 y 8.

## 6) TRATAMIENTOS DE LOS ACEROS ANTES DE LA CEMENTACION.

Antes de la cementación, se da a veces a las piezas en bruto de forja, ciertos tratamientos especiales con el fin de hacer algunas mejoras de gran interés. Se dan a las piezas esos tratamientos unas veces para reducir al mínimo las deformaciones que se producen en el temple que sigue a la cementación, otras veces para mejorar la maquinabilidad, facilitándose así el mecanizado del acero antes de la cementación y en ocasiones para conseguir ambas cosas a la vez.

Interesando cada día más el empleo de los aceros de cementación de media aleación y de precio relativamente bajo para la fabricación de engranajes de formas complicadas, como los de cajas de cambio, diferenciales, etc., conviene reducir en lo posible los problemas de deformaciones en el temple que con el empleo de estos aceros se presentan al constructor. Las deformaciones que se producen en el temple se pueden reducir de formas muy diferentes. Es corriente, por ejemplo, antes de la cementación, mecanizar las piezas en desbaste dándoles luego un recocido de estabilización a  $650^{\circ}\text{C}$ , porque elimina las tensiones y evitan posibles deformaciones, y terminar luego el mecanizado. También se han empleado desde hace mucho tiempo máquinas para el enfriamiento de las piezas, en especial engranajes. Esas máquinas en el momento de templar el acero sujetan las piezas con un mecanismo hidráulico que impide o disminuye las deformaciones.

Otra forma de disminuir las deformaciones es realizar el tem

ple interrumpido primero en agua 5 a 20 segundos y luego pasarlo al aceite. Con el martempering en baños de sales se han obtenido muy buenos resultados en el tratamiento de engranajes.

Para resolver el problema de deformaciones se dan también a las piezas, a veces, ciertos tratamientos térmicos especiales antes del mecanizado. Con los aceros de media aleación es frecuente primero temprar a  $925^{\circ}\text{C}$  en agua las piezas en bruto de forja o estampación, y luego calentarlas a  $875^{\circ}\text{C}$  aproximadamente y enfriarlas luego a  $625^{\circ}\text{C}$  para transformar isotérmicamente a esa temperatura. El temple enérgico al agua y luego la transformación isotérmica da muy buenos resultados, ya que de esa forma se consigue eliminar ciertas estructuras en forma de bandas que favorecen las deformaciones en el temple.

Otro problema de gran interés en los aceros de cementación, es mejorar su maquinabilidad. Experimentalmente se observa que estos aceros son difíciles de mecanizar sobre todo cuando son de grano fino. En los aceros de cementación de media aleación ese problema se resuelve haciendo crecer el grano por calentamiento a alta temperatura ( $950^{\circ}\text{C}$  aproximadamente), y dejándolos enfriar luego al aire para obtener una estructura de ferrita y perlita relativamente grosera y con buena aptitud para el mecanizado.

En los aceros de alta aleación, como suelen ser de temple al aire, la maquinabilidad se suele mejorar calentando hasta austenizar y enfriando luego al aire, dándoles a continuación un

revenido a 650°C.

Con frecuencia se da a estos aceros un calentamiento a 900-950°C y luego se realiza isotérmicamente la transformación a 650-700°C.

Generalmente se suelen combinar los tratamientos que se dan para evitar deformaciones, con los que se emplean para facilitar la mecanización, y así se pueden llegar a resolver los dos problemas a la vez.

#### 7) TRATAMIENTOS TERMICOS DE LAS PIEZAS CEMENTADAS.

El proceso industrial que se suele seguir normalmente es, en líneas generales el siguiente:

1° Mecanización de la pieza dejando sólo un ligero exceso (de algunas centésimas o décimas, según sea la pieza que se va a fabricar).

2° Cementación.

3° Tratamiento de regeneración y endurecimiento.

4° Rectificación.

En ocasiones, cuando existen graves problemas de deformaciones se dan a las piezas antes del mecanizado ciertos tratamientos especiales, (descritos en el inciso 6 de este capítulo).

Otras veces antes de la cementación, se protege a las piezas con pinturas o con cobreado electrolítico, para evitar que ce menten ciertas zonas del material. También hay piezas que se dejan mecanizadas a las medidas definitivas porque luego no es necesario el rectificado final, etc.

Los tratamientos de cementación, temperatura, duración del ca

lentamiento, método de enfriamiento, etc., y los temples posteriores que es necesario dar a las piezas, varían mucho de unos casos a otros, según sea la clase del acero y las características que se deseen obtener.

Son un poco complicados los tratamientos térmicos de las piezas cementadas debido a la diversidad del porcentaje de carbono entre el núcleo y la capa cementada. Las capas cementadas quedan con un porcentaje de un 0,8 a 0,9% C y los aceros de cementación sólo contienen un 0,2% de carbono.

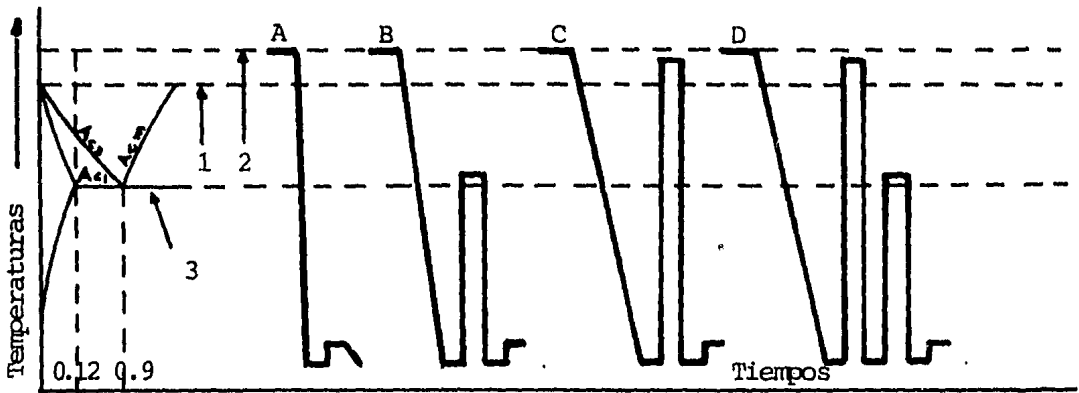
Según el porcentaje de carbono variará la temperatura de austenización siendo los aceros de 0,1 a 0,2% de C próxima a los 900°C; en cambio los aceros de 0,8% de C no llegan a 750°C.

Por lo que le damos al acero un calentamiento a 900°C, la capa cementada quedará templada; pero como se ha sobrecalentado mucho por encima de los 750°C (temperatura de austenización) habrá aumentado el tamaño de grano y su estructura final será muy frágil.

En cambio, el núcleo de 0,2% de C quedará templado correctamente. Pero si calentamos el acero cementado a 750°C, la capa cementada quedará templada correctamente, pero el núcleo sin templar.

En la siguiente figura veremos los tratamientos térmicos empleados con los aceros cementados:





1. Temperatura crítica del núcleo (0.12% de C.)
2. Temperatura de cementación.
3. Temperatura crítica de la capa cementada (0.9% de C.)

Diferentes clases de tratamientos que se suelen dar a las piezas cementadas.

a) Temple directo desde la temperatura de cementación y revenido (A).

Se emplea sólo cuando se cementa en baño de sales o con gases, y únicamente para piezas de pequeño espesor inferior a 0,6 mm. y mayor de 0,2 mm.

Es recomendable el uso de aceros de grano fino, baja aleación o al carbono ya que el temple se hace a muy alta temperatura (exageradamente en la periferia), se corre el riesgo que queda austenita residual sin cementar, por lo que no es recomendable usar aceros de alta aleación.

Con aceros de grano grueso, el núcleo queda frágil, debido a que después de la cementación los granos crecen exageradamente y templando directamente desde la temperatura de cementación no se regenera el grano.

Con este procedimiento quedan con gran dureza el núcleo y la capa periférica corriéndose el riesgo de que queden muy

frágiles, las deformaciones son muy pequeñas. (\*)

b) Temple a temperaturas inferiores a  $A_{c_3}$  y revenido (B).

Se dejan enfriar lentamente las piezas cementadas.

Después se calientan a temperaturas a  $A_{c_1}$  (ver página 54, la gráfica) pero inferiores a  $A_{c_3}$ ; se templean y se revienen finalmente. (Ver anexo 2)

La capa quedará cementada pero el núcleo no; con lo que se obtiene una máxima tenacidad del núcleo, cuya resistencia será un poco inferior a la máxima que se obtiene templando a más alta temperatura. Como el calentamiento ha sido a temperatura relativamente baja, no se afinará el grano, que habrá crecido a la temperatura de cementación. Se producen pocas deformaciones.

Se utiliza este tratamiento para aceros de grano fino y alta aleación. Si se utiliza este tratamiento para aceros de grano grueso, la periferia quedará con buenas características, pero el núcleo quedará bastante frágil por no haber sido regenerado. A este tratamiento se le ha dado en los últimos años gran importancia, empleándose hornos de difusión a temperaturas ligeramente superiores a  $A_{c_1}$ , desde cuya temperatura se templean las piezas. En estos hornos debe emplearse atmósferas controladas para evitar la descarburación de la capa cementada. (Ver anexo 2)

c) Temple a temperaturas superiores a  $A_{c_3}$  y revenido (C).

Después de la cementación se enfrían lentamente las piezas y a continuación se calientan a una temperatura superior a

(\*) Ver anexo 2.

$Ac_3$ , se templan y se revienen finalmente.

Tanto la capa cementada como el núcleo quedarán templados. Como el calentamiento ha sido superior a  $Ac_3$ , se habrá afinado el grano del acero del núcleo, por lo que quedará éste en muy buenas condiciones después del revenido. En cambio la capa cementada quedará algo frágil por haber sido sobrecalentada muy por encima de su temperatura de austenización. La dureza de la capa cementada puede ser un poco baja por quedar algo de austenita residual sin transformar. Se emplea este medio para aceros de aleación media y grano fino cuando se requiere obtener la máxima resistencia en el núcleo, como ocurre en algunas piezas empleadas en la industria aeronáutica, de automóviles, etc.

d) Dos temple a temperaturas ligeramente superiores a  $Ac_3$  y  $Ac_1$  y revenido (D) final (D).

Conviene emplear este tratamiento con los aceros al carbono y de media aleación, y, en general con todos los de grano grueso, en los que durante la cementación crece mucho el grano. Este es el tratamiento racional de aceros cementados, que antes se empleaba mucho para piezas de gran responsabilidad.

En el 1<sup>er</sup> temple a temperaturas superiores a  $Ac_3$ , quedará toda la pieza templada, pero con la capa cementada sobrecalentada y con grano grueso, como en el temple del inciso "c". En el 2<sup>o</sup> temple a temperatura ligeramente superior a  $Ac_1$ , quedará corregido el sobrecalentamiento de la capa

cementada mejorando su estructura, que quedará en forma de una martensita fina de gran dureza. Por otra parte el núcleo quedará con menor dureza, y mayor tenacidad.

Este tratamiento ha caído en desuso al disponer modernamente de aceros de grano fino con elementos aleados que limitan su crecimiento. (Ver anexo 2).

Revenidos. Los revenidos después de todos los temple descritos se hacen a temperaturas entre 150 a 200°C teniendo como misión casi únicamente reducir tensiones producidas por el temple, pues la martensita del núcleo cuyo contenido de carbono es muy bajo, queda después del temple con una tenacidad bastante buena.

e) Austempering y Martempering.\*

Pueden también aplicarse estos dos tratamientos a las piezas cementadas cuando se requiere reducir al mínimo las deformaciones en temple, por agua o aceite y se hace enfriando las piezas en sales fundidas.

La dureza que se obtiene en la periferia depende de varios factores como: composición, tamaño de las piezas, temperatura del baño de sales, tiempo de permanencia en el mismo.

8) CEMENTACION SELECTIVA DEL ACERO.

Cuando en una pieza no interesa la cementación de toda ella, es necesario evitar el contacto con el agente carburante de la zona correspondiente.

La producción de estas superficies se realiza mediante una capa de cobre depositada mediante un proceso electrolítico. Es-

\* Austempering= revenido austenítico,  
Martempering= revenido martensítico.

te depósito puede ser parcial, por protección de las zonas que no van a ser cementadas, o bien total, depositando cobre sobre toda la superficie. En el último caso, la capa de cobre debe eliminarse de las zonas que interese cementar, lo cual se hace durante la operación final de mecanizado que precede a la cementación. Se han desarrollado diferentes fórmulas para evitar la cementación en alguna zona de la superficie, las cuales se usan para pequeñas producciones, en especial cuando la instalación de un equipo de electrodeposición de cobre puede resultar antieconómico.

Otro procedimiento consiste en dejar suficientemente sobredimensionadas las partes a proteger de la cementación. Se cementa toda la pieza sin precauciones especiales y la sobredimensión se elimina por mecanizado después de la cementación y antes del temple. Este procedimiento, que presenta una seguridad absoluta para la cementación selectiva del acero, tiene el inconveniente de que necesita una buena colocación en las máquinas-herramientas, operación siempre costosa.

### III. CEMENTANTES SOLIDOS

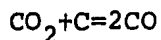
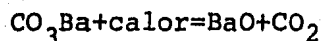
Las materias más usadas para la cementación pueden ser: carbón vegetal, el negro animal, huesos calcinados, cuero, coque. Sin embargo el carbono solo no se emplea ya que no se consiguen concentraciones superiores de 0,6 a 0,65% de C en la periferia del acero, debido a esto se le mezcla con carbonatos alcalinos o alcalinoterreos, alcanzando hasta 1,2% de carbono en la periferia del acero.

Una mezcla muy utilizada por muchos años fué la mezcla "Caron" o cementante "Caron" preparada de 60% de carbón vegetal triturado en trozos de 3 a 6 mm de diámetro y 40% de carbonato bórico en polvo. Experimentalmente se ha comprobado que se puede disminuir el porcentaje de carbonato bórico, obteniéndose muy buenos resultados con porcentajes de 10 a 15%, sin que pierda efecto sensible la acción carburante de la mezcla; bajando en cambio de 8%, el rendimiento disminuye notablemente. Se suele añadir un 20% de coque como diluyente, porque facilita la penetración del calor a través del compuesto carburante, permite obtener rápidamente temperaturas uniformes en el interior de las cajas y disminuye el costo de la mezcla, sin que quede debilitada la acción carburante del cementante "Caron".

Según el autor (Ing. José María las Heras) la mezcla (el cementante Caron) puede mejorarse sustituyendo parte del carbonato bórico por carbón de coque y se obtienen los mismos resultados. Menos frecuentemente se utiliza en vez del carbonato bórico, carbonato cálcico y carbonato sódico como activadores.

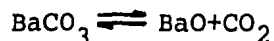
Es importante asegurarse de la ausencia de humedad o de agua en el carbón y en los demás materiales ya que pueden dar lugar a descarbonaciones locales y luego a puntos blandos en las piezas después del último temple.

La acción activadora de los carbonatos de calcio, bario y sodio se suelen explicar de formas diferentes. La carburación se creyó en un principio que la afectaba el carbon vegetal naciente producido por la descomposición del óxido de carbono a altas temperaturas según las reacciones:

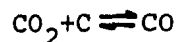


Apráz Barreiro dice que primero se realiza la descomposición de los carbonatos y luego el  $\text{CO}_2$  reacciona con el carbono y produce óxido de carbono:

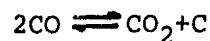
La descomposición de carbonatos (elevadas temperaturas):



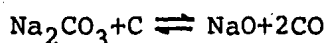
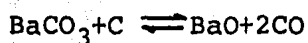
Luego el  $\text{CO}_2$  producido reacciona con el carbono produciendo óxido de carbono:



Y finalmente el óxido de carbono se descompone en la superficie del acero:



dando dióxido de carbono y carbono naciente que pasa al acero. En la actualidad se está aceptando cada vez con mayor fuerza otra hipótesis similar a la anterior, pero que no señala la formación de  $\text{CO}_2$  y que atribuye la acción activadora de los carbonatos a la reacción que se produce a alta temperatura con el carbono, formándose óxido de carbono, de acuerdo con las siguientes reacciones:



Y luego el CO producido es el que al descomponerse dá lugar al carbono naciente, que es el que produce la carburación. Los óxidos BaO y Na<sub>2</sub>O que se producen en esas reacciones tienden luego a reaccionar con el CO<sub>2</sub> producido en la descomposición de CO, obteniéndose así los carbonatos correspondientes y con ellos se realiza la regeneración de los carbonatos que no se consumen sino que al ser elementos productores de CO actúan como activadores del proceso de carburación. La presencia de estos óxidos tiende a bajar el contenido de CO<sub>2</sub> de los gases y aumentar el porcentaje de CO, favoreciendo todo ello a la cementación.

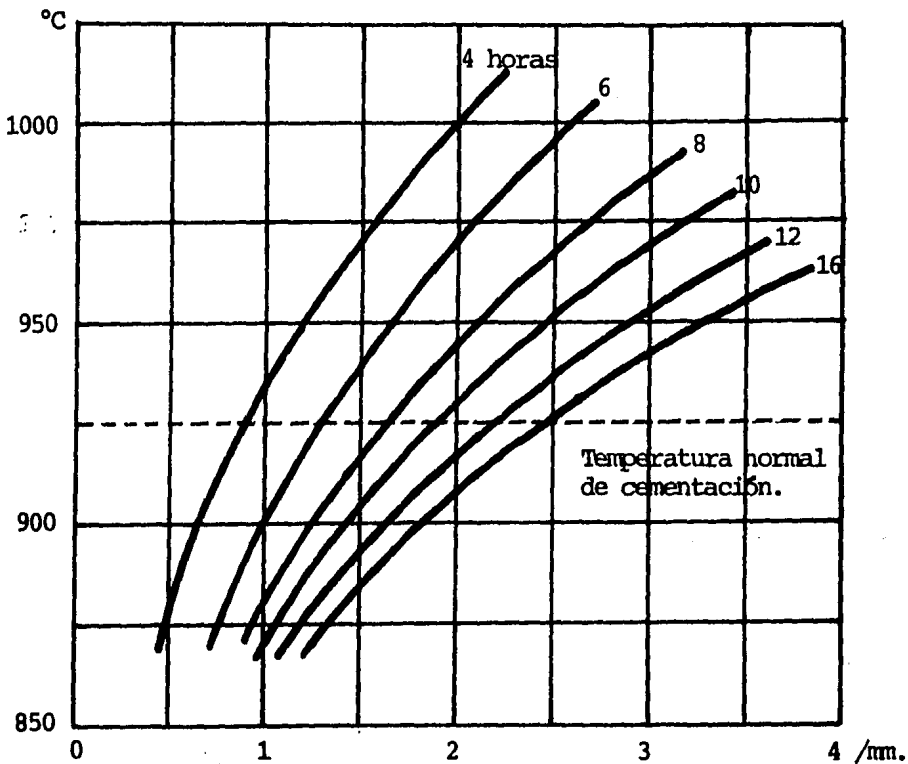
Lasheras dice que las mezclas cementantes deben renovarse periódicamente utilizando aproximadamente 4 partes de mezcla usada y 1 de nueva; otros autores dicen que 3 de usada y 5 de nueva.

Las piezas que se han de cementar se colocan en cajas especiales de fundición, de chapa o de acero inoxidable rodeadas



del material cementante.

Estas cajas están provistas de patas o se colocan sobre tacos en el horno, para que el calentamiento sea más uniforme. Una vez preparadas, se cierran con una tapa metálica del mismo material que el resto de la caja y se cierran herméticamente con barro refractario.



Es espesores de capa cementada según la temperatura y duración de la cementación con cementante sólido Carón. (profundidad de la penetración del carbono)

Con el cementante Carón se consigue aproximadamente una capa cementada de 0,15 mm por cada hora de permanencia en el horno a una temperatura de 900°C.

Raramente se utiliza este proceso para cementaciones inferior-

res en espesor a 0,6 mm., siendo usualmente 1,0 mm., el límite inferior del campo de aplicación.

Al juzgar las tolerancias permisibles en la profundidad de la capa cementada, conviene tener un criterio muy amplio ya que es difícil que las variaciones sean inferiores a 0,25 mm para todas las piezas contenidas en una caja grande.

En caso de emplear la cementación en tambores rotatorios, los límites de tolerancia pueden ser más estrechos.

Los principales inconvenientes de los cementantes sólidos son; 1° La gran duración de la operación.

2° Elevado consumo de carbón

3° Necesidad de mucha mano de obra

4° Dificultad de templar las piezas directamente.

5° Irregularidad de temperaturas en las cajas de cementación.

#### IV. CEMENTANTES LIQUIDOS

##### 1) CEMENTACION LIQUIDA

La cementación líquida, que es el más reciente método de carburación, es una evolución del proceso conocido con el nombre de cianuración, el cual consiste en el calentamiento del acero en un baño apropiado de cianuro sódico.

La capa cementada contiene carbono y nitrógeno, y normalmente posee menos profundidad y mayor dureza que las de las capas de carbono obtenidas por otros procesos.

Las proporciones de carbono y nitrógeno de la capa cementada dependen de la composición del baño y de la temperatura de trabajo.

El descubrimiento de poder incrementar la actividad del baño por adición al mismo de determinados compuestos químicos ha permitido la obtención de capas más profundas, en las cuales el carbono y el nitrógeno pueden controlarse con más facilidad. Las capas producidas usando estos nuevos baños son más parecidas a las obtenidas por cementación sólida o gaseosa que aquéllas producidas por simple cianuración.

La gran dureza superficial que adquiere el acero, en el proceso de carburación líquida se debe a la acción del carbón en esencia, consisten en baños de cianuro activados con agentes catalizadores. Se suelen preparar con elementos básicos, como los cianuros: sódico, cálcico y

potásico, sales inertes del tipo cloruro y carbonato sódico y activadores como cloruros y fluoruros de bario, calcio, etc., cuya misión es incrementar la penetración del carbono. La influencia que ejerce el nitrógeno en la capa periférica por ser muy pequeño el porcentaje se pueden despreciar.

La presencia de cloruros alcalinoterreos dificulta la penetración del nitrógeno y favorece la del carbón; también con estos cloruros se puede trabajar a temperaturas más elevadas.

Para la cementación de los aceros las sales utilizadas según su penetración se clasifican en 2 grupos:

unas con 17 a 23% de cianuro, con alto porcentaje de cloruro sódico y bajo en cloruro bórico, empleados a temperaturas que oscilan entre 850 a 925°C, consiguiéndose capas de espesor medio de 0,2 a 1,5 mm de profundidad; el 2º grupo tienen de 7,5 a 12% de cianuro con el porcentaje del cloruro bórico alto y porcentaje de cloruro sódico bajo, obteniéndose espesores que varían de 1 a 3 mm y se emplean temperaturas entre 875 a 950°C.

También hay otras sales con el 25% de cianuro sódico y 70% de cloruro cálcico, que aunque de uso bastante frecuente, son sin embargo, menos conocidas, que las otras dos que hemos citado.

En la siguiente tabla se señalan las composiciones de las sales de uso más corriente:

	Capa cementada de 0,2 a 1,5mm	Capa cementada de 1 a 3mm
Cianuro sódico	17 a 23%	7,5 a 12%
Cloruro bórico	14 a 40%	45 a 55%
Otras sales alcalinas	0 a 3,5%	2 a 10%
Cloruro potásico	-----	5,5 a 20%
Cloruro sódico	20 a 30%	0,0 a 15%
Carbonato sódico	< 30%	< 30%
Cianato sódico	< 1%	< 0,3%

Como con el uso disminuye el porcentaje de cianuro y se alteran también los porcentajes de otros elementos, es necesario añadir periódicamente ciertas sales para mantener cierta composición (conveniente).

Según los casos se suelen usar:

1° Una sola sal, a base de cianuro y cloruro cálcicos, con algo de cianuro sódico que contiene todos los elementos necesarios para cementar el acero y que a medida que se va gastando el baño también sirve de relleno.

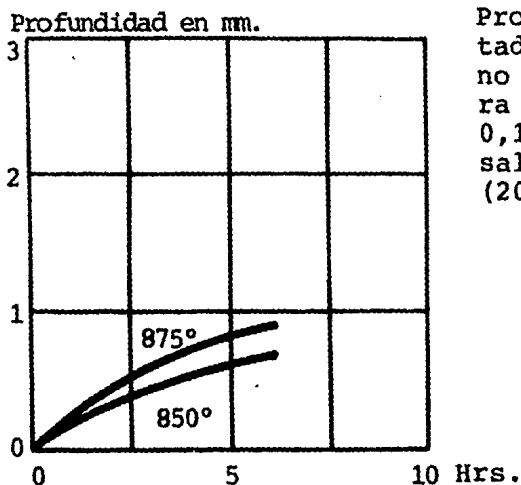
Esta sal suele contener  $CNNa=25\%$ ,  $(CN)_2Ca=0,5$  a  $5\%$  y  $Cl_2Ca=70\%$ , es muy barata; pero es higroscópica, por lo que es muy importante lavar muy bien las piezas para evitar su corrosión. No es necesario hacer análisis del baño y observando el aspecto de su superficie se conoce su grado de actividad.

2° Dos sales, una de ellas es neutra o una mezcla de sales neutras, constituida generalmente por cloruro y carbonato sódico y la otra una sal de cianuro con cloruros activadores ( $CNNa=30\%$ ,  $ClBa=50\%$  y  $ClNa=20\%$ , aproximadamente).

3° También se suelen usar tres sales. Una de bajo punto de fusión neutra, compuesta generalmente por cloruro o carbonato sódico que sirve para iniciar la fusión de una pequeña parte del baño de sales. Otra sal de cianurar con 80 a 90% de cianuro sódico y 5 a 10% de carbonato sódico, y la tercera que es la sal catalizadora, con 70 a 85% de cloruro bórico, 5 a 10% de cianuro sódico, 10% de cloruro sódico, y 10% de carbonato sódico.

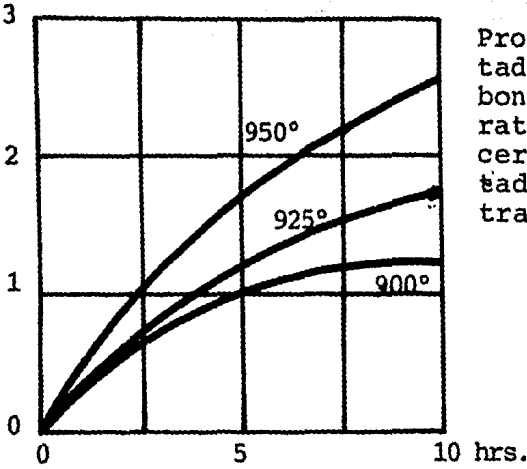
En estos dos últimos casos se añaden durante el trabajo periódicamente pequeñas cantidades de sales de elevado contenido de cianuro para que el contenido del mismo sea el adecuado.

Las profundidades que se consiguen empleando sales de media (capa cementada de 0,2 a 1,5mm) y gran penetración (capa cementada de 1 a 3mm) se señalan en las siguientes gráficas:

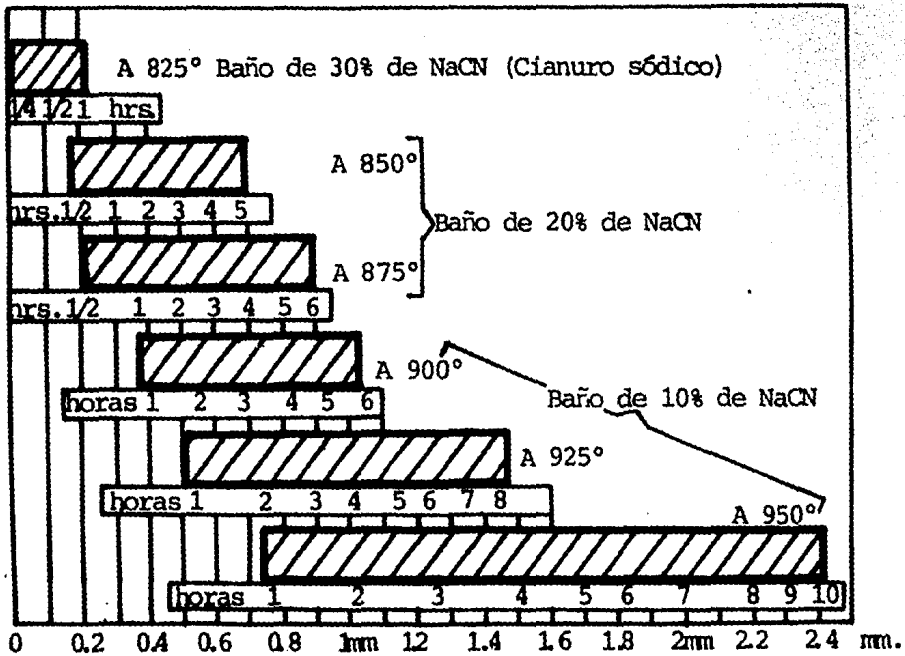


Profundidad de la capa cementada con más de 0,3% de carbono en función de la temperatura y del tiempo en un acero de 0,1% de carbono cementado con sales de penetración media (20% de CNNa)

Profundidad en mm.

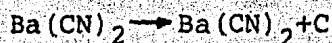


Profundidad de la capa cementada con más de 0,3% de carbono en función de la temperatura y del tiempo, en un acero de 0,1% de carbono cementado con sales de gran penetración 10% de CNNa).



Esposores de capa cementada según la concentración de cianuros, la temperatura y la duración de la operación con cementantes líquidos (sales) según Apráiz Barreiro.

La actividad carburadora del cloruro bórico en las sales de cementar es debida principalmente a las siguientes reacciones:



En las que "C" representa el carbón naciente que pasa al acero.

En las sales que se emplea el cianuro cálcico en vez de cianuro sódico, la principal reacción es la siguiente:



Aunque algo de nitrógeno naciente se libera, en la práctica este fenómeno de liberación de carbono es mucho más importante. La intensidad de estas reacciones se acentúa con la temperatura y con ella aumenta la liberación de carbono activo y disminuye la formación de nitrógeno, cuya influencia es perjudicial en este tratamiento, porque dificulta la penetración del carbono en el acero. Como el porcentaje de cianato en el baño es un índice de la cantidad de nitrógeno que absorbe el acero, para asegurar una buena penetración de carbono, debe evitarse que pase de ciertos límites, debiendo mantenerse en los baños de penetración media, porcentajes de cianato inferiores a 1% y en los de gran penetración menores de 3%.

Las irregularidades que se pueden presentar en estos procesos deben atribuirse a alguna de las siguientes circunstancias:

1° Contenido insuficiente de cianuro para generar el car



bón activo.

2° Aumento exagerado del contenido de carbonato sódico.

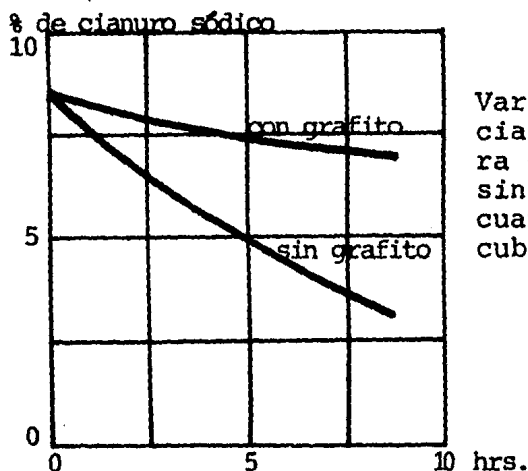
3° Cantidad excesiva de cianato sódico.

4° Bajo contenido de cloruro bórico, y

5° Error en la temperatura de cementación.

A este proceso también se le conoce como "Cementación en baño de sales".

Como los cianuros se oxidan con facilidad durante la operación de cementación, deben cubrirse las sales fundidas con grafito para impedir el contacto del baño líquido con el aire. Si no se cubren bien los baños de sales, el contenido de cianuro baja rápidamente y la cementación es muy lenta.



Variación del contenido de en cianuro en un baño de sales para cementar cuando se utiliza sin proteger superficialmente y cuando se trabaja con el baño cubierto con escamas de grafito.

Para la cementación con sales se suele emplear crisoles de acero, recomendándose el empleo de aceros inoxidables y no se pueden en cambio usar crisoles preparados con ladrillos refractarios, ni proteger las piezas con barro o arcillas, debido a que las sales se descomponen.

La cementación con sales tiene la ventaja de que las instalaciones son sencillas y relativamente baratas. El precio de un horno de sales suele ser menor que el de cualquier otro tipo de horno. Para grandes series no es recomendable con respecto a otros métodos (cementación gaseosa).

Los cuidados que se deben tener con los cementantes líquidos (manipulación) son:

- 1° No deben meterse en el baño fundido y a la temperatura de trabajo, piezas húmedas, pues el vapor que se formará provocará la proyección del baño caliente.
- 2° Tampoco deben introducirse piezas que contengan restos de nitratos (depositados por ejemplo, en el proceso de calentamiento previo), ya que en caso contrario se producirán explosiones y proyección de las sales fundidas pudiendo accidentar al operario.

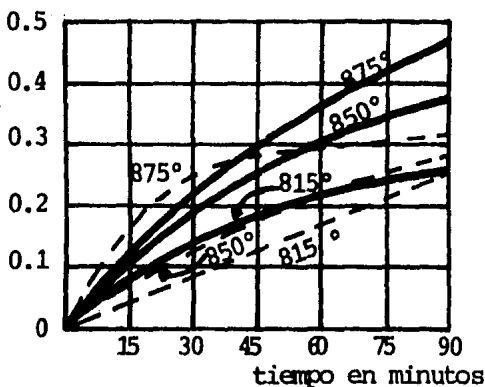
Además los cianuros son venenos muy activos, principalmente por vía digestiva, por lo cual los operarios han de tener mucho cuidado con una buena limpieza de manos al terminar la jornada de trabajo. En cambio los humos que se desprenden no son tóxicos, ya que no son cianuros, sino carbonatos producidos en la oxidación de aquél, pero sí muy irritante para las fosas nasales, recomendándose una buena ventilación del local.

## 2) CIANURACION

Se emplea para endurecer superficialmente pequeñas piezas de acero. El contenido de cianuro sódico (elemento fundamental) oscila entre 20 a 50%, 20 a 30% de cloruro sódico y 30 a 40% de carbonato sódico (ambos son sales diluyentes inertes); estas dos últimas sales tienen por objeto rebajar el precio de la mezcla, siendo recomendable utilizar porcentajes de cianuros variables de 30 a 40%. Según algunos autores las temperaturas de trabajo oscilan de 750 a 850°C y otros de 760 a 950°C.

Una observación pertinente es que el cianato sódico, no se añade intencionalmente al baño, sino que se forma por oxidación del cianuro durante el trabajo, además emplean do baños cubiertos con escamas de grafito, el porcentaje de cianato sódico no suele exceder de 3%.

El último producto que se forma en los baños por descomposición u oxidación del cianuro por la acción oxidante del aire es el carbonato sódico.

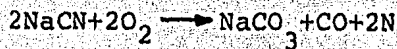


Profundidades de capa dura obtenidas al cianurar y cementar en aceros al carbono extradulce.

— sales activadas  
 - - - cianuro sódico

La incorporación del carbono y el nitrógeno a los aceros es la siguiente:

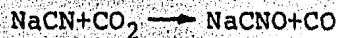
El cianuro por acción de oxígeno se transforma en carbonato, óxido de carbono y nitrógeno:



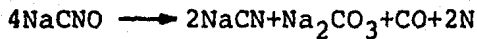
El óxido de carbono se descompone en dióxido de carbono y carbono naciente:



El dióxido de carbono ataca al cianuro y se forma cianato:



El cianato por la acción del calor se descompone en carbonato, cianuro, óxido de carbono y nitrógeno:



El CO formado en las diversas reacciones se descompone en la siguiente forma:



Siendo en definitiva el carbono naciente formado y el nitrógeno naciente los que pasan al acero.

La acción del oxígeno del aire fué comprobada al observar que en los baños profundos la acción de las sales era menos rápida en el fondo que en la superficie y la cementación se hacía más lentamente cuanto más difícil fuera el acceso del aire, retrasándose extraordinariamente si el aire que estaba en contacto con la superficie se desplazaban por una corriente de nitrógeno.

De acuerdo con los más recientes trabajos de investigación parece que, para que se realice la cianuración, es fundamental la formación de una cierta cantidad de cianato. Experimentalmente se ha comprobado que un baño de alto porcentaje en cianuro sin cianato, no cianura el acero. Es difícil de encontrar en la práctica industrial un baño de cementar sin cianato, pues al estar todos los baños más o menos en contacto con el aire, el cianuro reacciona con el oxígeno, y siempre contiene algo de cianato, siendo su formación casi automática, sobre todo al elevarse la temperatura de los baños.

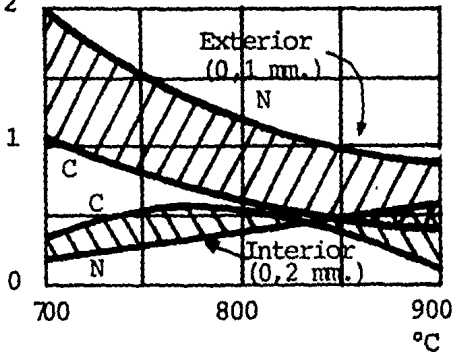
Los nitruros que se forman interfieren y dificultan la penetración del carbono y por su influencia perniciosa no se pueden utilizar los baños de cianuro sin catalizadores para producir económicamente capas duras de más de 0,3 mm de profundidad.

En la zona muy periférica, a menos de 0,1mm del exterior al elevarse la temperatura de cianuración desde 200° hasta 925°C, los porcentajes de carbono y nitrógeno disminuyen desde 1 y 2% hasta 0,4 y 0,7%, respectivamente, y hacia el interior a 0,2mm de la periferia, los contenidos de carbono y nitrógeno aumentan.

La composición de la capa cianurada varía mucho de unos casos a otros. En general el nitrógeno se encuentra concentrado en la zona exterior y los contenidos en nitrógeno son más altos que los contenidos en carbono en la zona

periférica, y en cambio en las zonas interiores ocurre alrevés, ya que el porcentaje de nitrógeno es menor el porcentaje de carbono. En la siguiente figura se ve la influencia de la temperatura de cianuración, se observa

% de C. y de N.

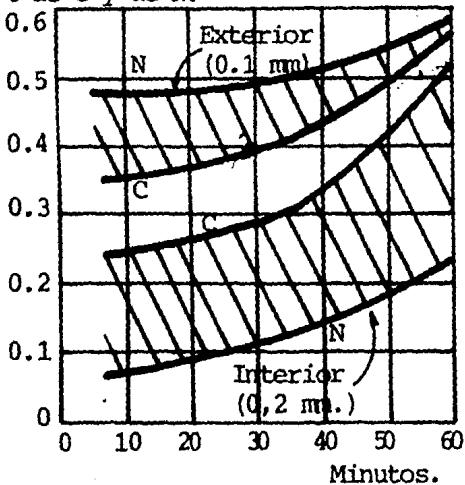


Influencia de la temperatura de cianuración en el contenido en carbono y nitrógeno de la capa periférica de un acero al carbono cianurado con sales de 25% de CNNa. Se señalan los valores correspondientes a una capa situada a 0,1mm de la periferia y a otra más interna situada a 0,2mm del exterior.

que al aumentar la temperatura de tratamiento disminuye en la capa más exterior, el porcentaje de carbono y de nitrógeno, y en cambio en la zona interior, al aumentar la temperatura, aumenta el contenido de nitrógeno.

La influencia de la duración del proceso se acusa más en la composición de la zona interior que en la del exterior

% de C y de N.



Influencia del tiempo de cianuración en el contenido en carbono y nitrógeno de la capa periférica de un acero al carbono cianurado con sales de 36% de CNNa a 800°. Se señalan los valores correspondientes a una capa limitada a 0,1mm de la periferia y a otra más interna situada a 0,2mm del exterior.

En la zona interior se ve que al aumentar la duración de la cianuración de 10 a 50 minutos por ejemplo, aumentan mucho los porcentajes de carbono y nitrógeno, y en cambio en la zona exterior el aumento del porcentaje de esos elementos, en especial el de nitrógeno, es muy poco sensible. En el comercio existe cianuro sódico para usos industriales de varias concentraciones, siendo las más corrientes las de 97, 75, 45% de cianuro.

Es común hacer análisis diariamente de las sales usadas, y debido al uso disminuye el porcentaje de cianuro y el baño pierde actividad, por ello se agrega cianuro de alta concentración (96 a 75%) para mantener el contenido de cianuro del baño dentro de los límites convenientes.

La profundidad de la capa dura en la cianuración depende también del tamaño del espesor de las piezas. Con un acero cualquiera, a igualdad de temperatura y tiempo, el espesor de capa que alcanza un redondo de 6mm aproximadamente 15% mayor que el que corresponde a uno de 12mm y 40% más que el de un redondo de 25mm., a partir de este espesor la penetración es constante.

No sólo la cianuración es empleada para endurecer aceros de bajo contenido de carbono, sino también algunas ocasiones para concentraciones más elevadas en carbono con o sin aleación, en los que además de elevadas propiedades en el núcleo, se desea mejorar la dureza superficial.

Esto se consigue calentando las piezas para el temple, en

baños con 40% de cianuro y manteniendo las piezas en el baño de 15 a 60 minutos aproximadamente. De esta forma las piezas después del revenido, tendrán en el núcleo las características correspondientes a un temple y revenido normal y la periferia quedará con 50 a 62 Rockwell-C, según la temperatura de revenido.

El principal inconveniente como ya hemos dicho es que no podemos conseguir capas duras de gran profundidad. Para una determinada profundidad de capa cementada obtenida con cementantes sólidos y con cianuros, la profundidad de la capa dura es mayor en la cementación con materias sólidas.

Una capa cementada, obtenida con baños de cianuro de 1mm de espesor, no le suele corresponder más de 0,3mm de capa dura, mientras que en el otro caso, la capa dura es de 0,55mm para esa misma capa cementada. Con los baños de cianuro activados, se consigue para un determinado espesor de capa cementada, mayor capa dura que en la cianuración. En concreto las diferencias fundamentales entre la cementación líquida y la cianuración son:

La capa cianurada es alta en nitrógeno y baja en carbono; la velocidad de penetración del carbono en la carburación líquida es más rápida que en la cianuración para una determinada temperatura; en la cianuración raramente se obtienen capas de cementación superiores a 0,25mm y con los carburantes líquidos pueden lograrse capas de 6mm.



Esta diferencia en el carácter de las capas producidas hace que se distinga el proceso de cianuración del de carburación líquida. Ambos procesos tiene muchos puntos en común, por lo que se ha englobado bajo la denominación de cementantes líquidos, de acuerdo con la clasificación establecida al principio y que nos definía el estado del agente cementante a la temperatura de trabajo. A este procedimiento también se le conoce como "Endurecimiento superficial con baños de sales fundidas".

## V. CEMENTANTES GASEOSOS

### 1) CEMENTACION CON GASES

Hacia el año 1860 Carón inició los primeros trabajos y experiencias sobre la cementación gaseosa. Posteriormente en 1879 Manesmann, Charpy (1903) y Guillet (1904) estudiaron y desarrollaron este procedimiento. Sin embargo fué F. Giolitti (italiano), el primero en experimentar a fondo este proceso, publicando en 1912 los resultados de sus ensayos cementando con óxido de carbono, etileno, metano y gas de alumbrado.

Posteriormente se utilizó la cementación gaseosa casi exclusivamente para la fabricación de blindajes y no fué sino hasta los años 1925-1927 que tomó verdadero desarrollo el proceso.

En los comienzos de la cementación gaseosa, el gas natural o el gas del alumbrado se hacían pasar directamente al horno y reaccionaban con el acero a una temperatura conveniente y durante el tiempo determinado como experimentalmente necesario para obtener la profundidad de la capa deseada. No empleaban circulación forzada y la formación del hollín sobre el acero era su mayor problema y los resultados muy problemáticos. En los modernos procedimientos, el éxito de la operación, se asegura por un cierre adecuado del horno para evitar el acceso del aire y por una circulación forzada del gas. Se ha encontrado que capas de cementación uniforme. Para todas las piezas que

componen la carga, solamente se pueden obtener si se evitan las filtraciones de aire en el horno, los cuales operan bajo una presión positiva, siendo convenientes frecuentes comprobaciones para detectar fugas.

En este proceso, manteniendo las piezas de 1 a 8 horas en atmósfera carburante, a temperaturas de 850 a 950°C, se obtienen capas cementadas de 0,2 a 1,5 mm de profundidad. Únicamente en casos especiales, como la fabricación de blindajes, se emplean procesos más largos y se obtienen capas cementadas de mayor espesor. Aunque las instalaciones son bastante complicadas y costosas, la cementación de las piezas es muy sencilla y rápida. Se obtienen resultados muy regulares y se pueden cementar gran cantidad de piezas en muy poco tiempo. Para las grandes producciones, por ejemplo, dos toneladas de material por hora, se utilizan hornos continuos, en los que las piezas son transportadas a través del horno de un extremo a otro por medio de bandejas o cadenas móviles, a la velocidad deseada. Sin embargo para una producción menor, del orden de 125/150 kilos por hora, se emplean hornos estacionarios.

El mecanismo de cementación es el siguiente:

El acero se calienta en contacto con una atmósfera que contenga óxido de carbono e hidrocarburos, los cuales son fácilmente descompuestos a la temperatura de cementación.

Los hidrocarburos pueden ser: metano, propano, gas natural,

hidrocarburos, líquidos vaporizados o cualquier producto similar. Los hidrocarburos más elevados se descomponen a la temperatura de trabajo en: metano, carbono e hidrógeno. Parte del carbono activo penetra en el acero, mientras otra porción puede depositarse como hollín en la superficie del mismo.

En el gas cementante, el monóxido de carbono es un agente menos efectivo que el metano. En una atmósfera de óxido de carbono solamente es necesaria una pequeña proporción de anhídrido carbónico para alcanzar el equilibrio a temperatura de carburación y que la reacción se detenga. Pero si se usa el metano, la reacción puede proseguir hasta que la atmósfera del horno contenga 99% de hidrógeno antes de que se alcance el equilibrio. Es más, el óxido de carbono se hace más estable y tiene, por tanto, menor facilidad de reacción a medida que se incrementa la temperatura. Exactamente lo contrario le ocurre al metano en igualdad de circunstancias. Sin embargo es conveniente que en las atmósferas carburantes exista cierto porcentaje de óxido de carbono, y también de nitrógeno, para que la eficacia del gas carburante sea máxima, evitando que parte del metano se gaste inútilmente en reacciones con los elementos nocivos, oxígeno, vapor de agua, y anhídrido carbónico, que en mayor o menor proporción siempre se encuentran en los otros gases de los hornos. Hemos indicado la conveniencia, de que exista hidrógeno

en la cementación gaseosa. Ello es así, a pesar de que este elemento está considerado como un poderoso carburante, porque su acción es débil en presencia del metano y se utiliza para evitar la formación, sobre las piezas, de depósitos carbonosos producidos por la descomposición de los hidrocarburos.

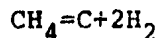
El proceso de cementación gaseosa se realiza frecuentemente en dos etapas. La primera es la de cementación propiamente dicha y se efectúa a elevadas temperaturas y en atmósferas fuertemente carburantes. La segunda etapa es la difusión del carbono y tiene por misión conseguir una distribución del mismo en la capa cementada, para lo cual se utilizan temperaturas más bajas del orden de 800°C, y atmósferas neutras o ligeramente carburantes. Hoy en día se suelen utilizar gases compuestos formados por un gas activo y un gas portador.

El gas activo es generalmente metano, aunque puede utilizarse también propano o butano. El gas portador es una mezcla de óxido de carbono, hidrógeno y nitrógeno, con pequeños porcentajes de vapor de agua, anhídrido carbónico, etc. El gas portador sirve para purificar la atmósfera del horno antes de adquirir la mezcla carburante, y mantener dentro del horno la presión deseada, y al servir al mismo tiempo como diluyente, resulta la mezcla cementante más económica. Su preparación se hace quemando incompletamente un gas combustible, como gas de alumbrado

con lo que se forma  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  y cantidades variables de hidrocarburos. Esta mezcla gaseosa se hace pasar por carbón vegetal a alta temperatura, óxido de bario u otro catalizador, con lo que se transforma en anhídrido carbónico en óxido de carbono, y se disocia el vapor de agua. Después de incorporar el metano desde la botella en que está almacenado a presión el gas portador, se conducen los gases al horno de cementación. Concretamente la misión del gas portador es:

- 1a. Desplazar el aire o gases que existan dentro del horno, sobre todo el vapor de agua, y el anhídrido carbónico, que son muy perjudiciales para la buena marcha de la cementación.
- 2a. Reducir el depósito de hollín que inevitablemente se forma en la cementación gaseosa.
- 3a. Economizar metano, ya que se consigue el mismo efecto empleando pequeñas cantidades de este gas que si la totalidad de la atmósfera del horno estuviese constituida por él.

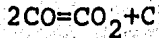
Sin embargo, la cementación la realiza principalmente el metano, al descomponerse mediante la siguiente reacción:



Y el carbononaciente es absorbido por el acero, a la temperatura de austenización (850 a 950°).

También el óxido de carbono ( $\text{CO}$ ) colabora en la cementación descomponiéndose a altas temperaturas en carbono y anhí-

drido carbónico:



Por lo tanto, existirán en la atmósfera de los hornos de cementación gaseosa cantidades crecientes de  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2$  formados en el curso de la operación.

El espesor de la capa depende, como siempre, en su mayor parte, de la duración de la operación, pudiéndose obtener en ocho horas hasta 1,5mm de espesor.

El porcentaje de carbono de la capa cementada depende de la temperatura de la cementación.

Una ventaja importante de la cementación gaseosa se basa en el hecho de que la composición del gas y la velocidad con que fluye puede ajustarse para obtener la concentración de carbono y la profundidad de la capa cementada que se desee.

Este control es esencial para obtener resultados satisfactorios. Los métodos usuales de control consisten en la cementación de una pieza de ensayo juntamente con el resto de las piezas y su examen por diversos procedimientos (como se verá posteriormente), análisis del gas, a intervalos regulares o determinación del punto de rocío del gas.

El método de ensayar una pieza testigo es el único procedimiento usado en la cementación sólida y también frecuentemente usado en la cementación gaseosa, hasta el punto que algunas industrias no prosiguen el proceso de ce-

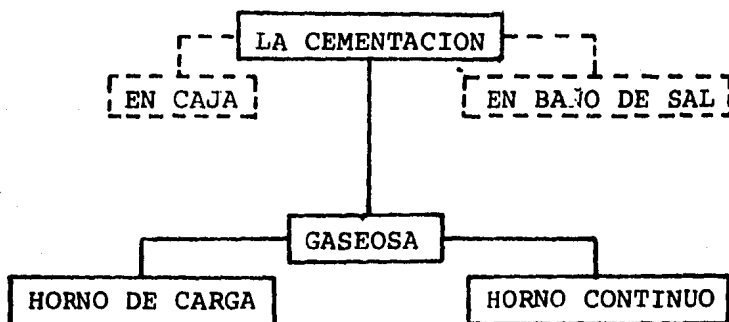
mentación hasta que las piezas testigo han sido inspeccionadas y certificadas satisfactoriamente.

Se ha demostrado que en la cementación gaseosa el método de determinación del punto de rocío es más sensible que el análisis del gas y permite detectar más rápidamente variaciones en las condiciones del horno. Sin embargo es necesario preparar gráficas que relacionen el punto de rocío con la proporción del óxido de carbono/anhidrido carbónico para mezcla gaseosa que se usa en el horno.

a) Materiales utilizados en la cementación gaseosa.

Introducción. Esta exposición describe los materiales utilizados actualmente en la cementación gaseosa, hornos y generadores. El título mismo nos conduce a no evocar los otros materiales de cementación en caja y en baño de sal no obstante que la reacción sea igualmente del tipo: gas-metal.

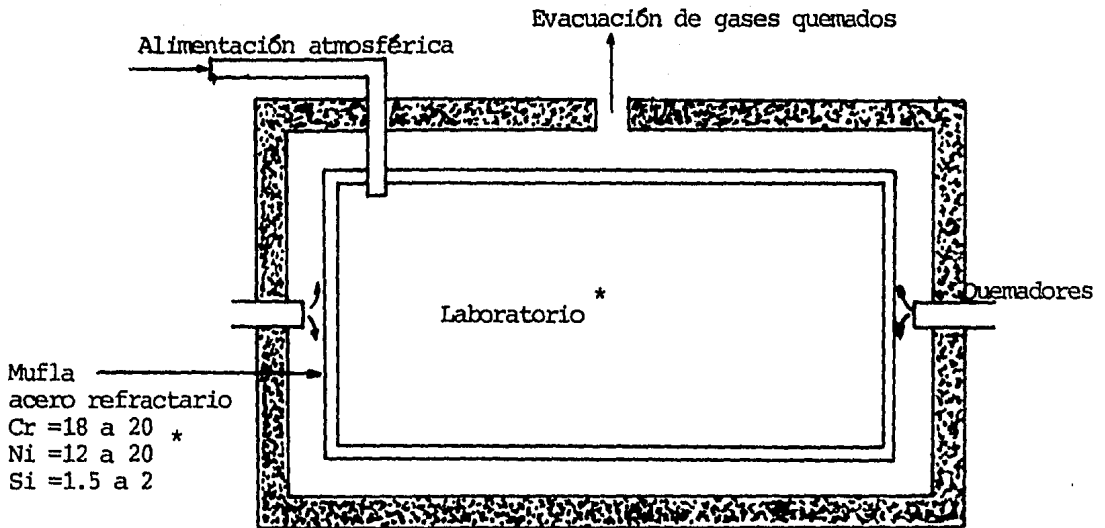
b) Los hornos de cementación





## b.1 Algunos principios constructivos

## - Hornos de mufla.



En el caso de los hornos de mufla en laboratorio o cámara de cementación está aislada de la atmósfera de calentamiento por unaampa hermética de acero refractario.

Esta mufla no debe:

- \* deformarse a pesar de las altas temperaturas,
- \* oxidarse o sulfurarse al contacto con las flamas.

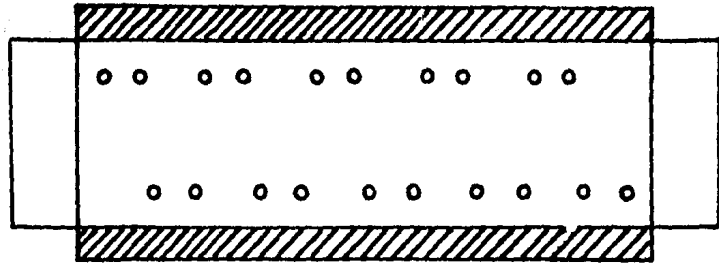
## - Hornos de tubos radiantes.

La mufla puede ser ventajosamente reemplazada por tubos radiantes de calentamiento que son también de acero refractario en vistas a limitar sus deformaciones y resistir a la corrosión seca.

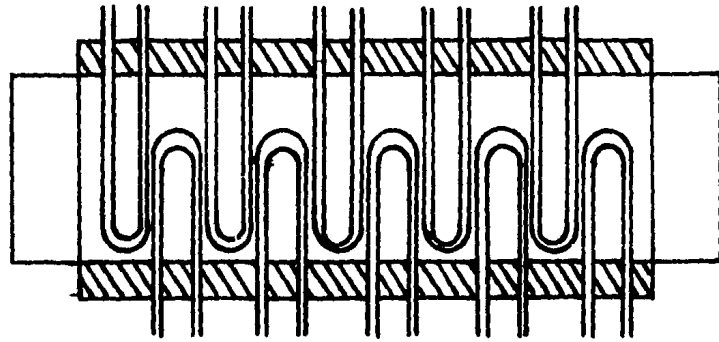
Pueden ser:

(\*) cámara

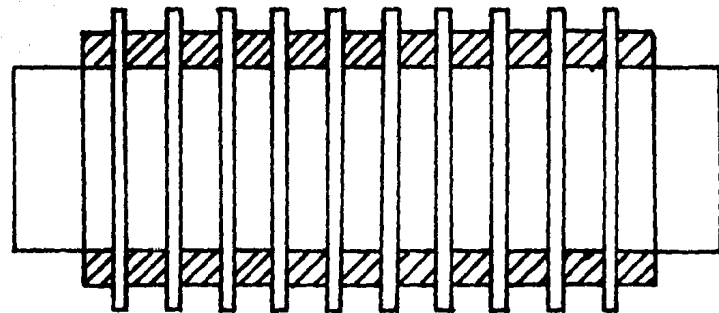
Horizontales (en forma de alfiler)



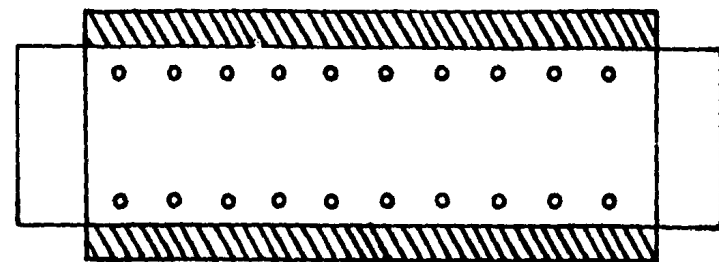
Tubos radiantes horizontales



Verticales

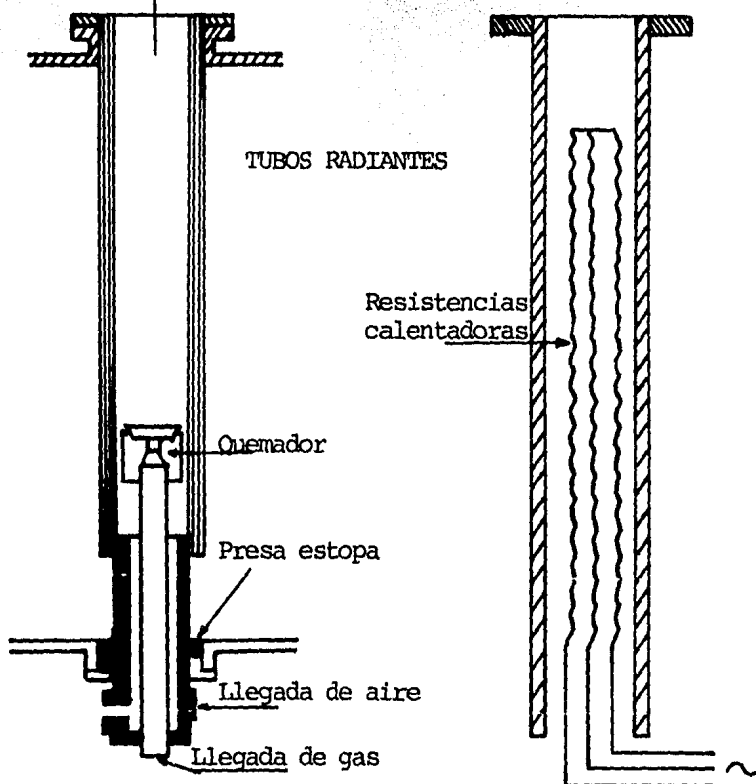


Tubos radiantes verticales



El calentamiento es entonces asegurado por radiación de los tubos y convección de la atmósfera.

Evacuación de gases quemados



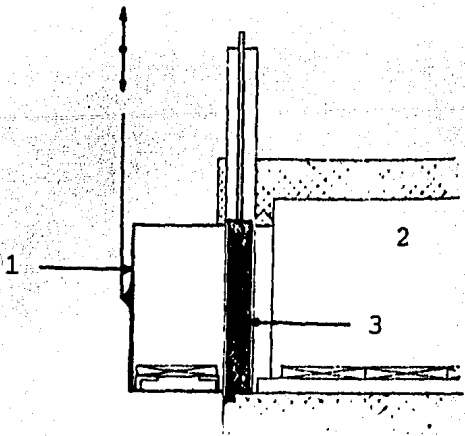
\* por combustión de una mezcla aire-gas al interior del tubo.

\* por resistencia eléctricas.

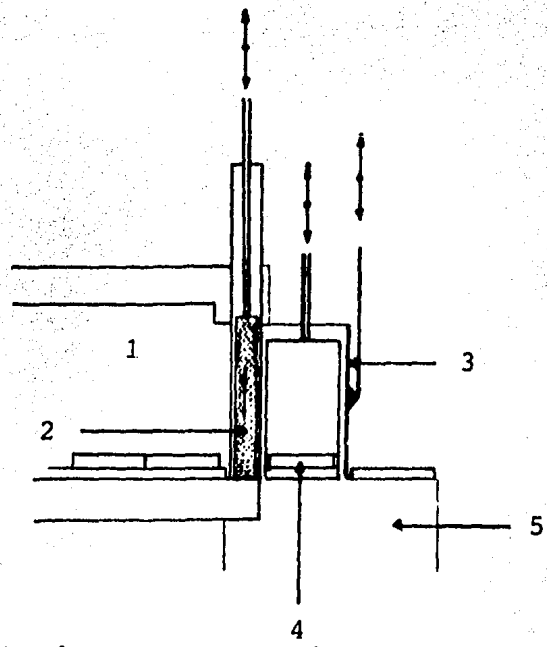
- Las esclusas.

A fin de reducir los tiempos de purga, de permitir las cargas y descargas para evitar las entrada de aire dentro de su laboratorio, los hornos están provistos de una o varias esclusas.

La esclusa de enhornado puede ser calentada o no.



- 1. Puerta fría
- 2. Cámara de Cementación
- 3. Puerta refractaria

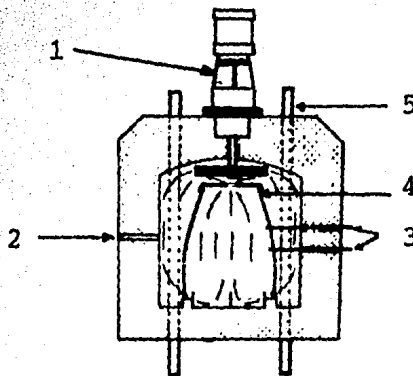


- 1. Cámara de Cementación
- 2. Puerta refractaria
- 3. Puerta fría
- 4. Ascensor
- 5. Recipiente de templado

Ello permite, sobre todo, el tratamiento de temple bajo atmósfera, es decir, guardar las cargas a temperatura antes de la introducción en el fluido de reenfriamiento.

- El laboratorio.

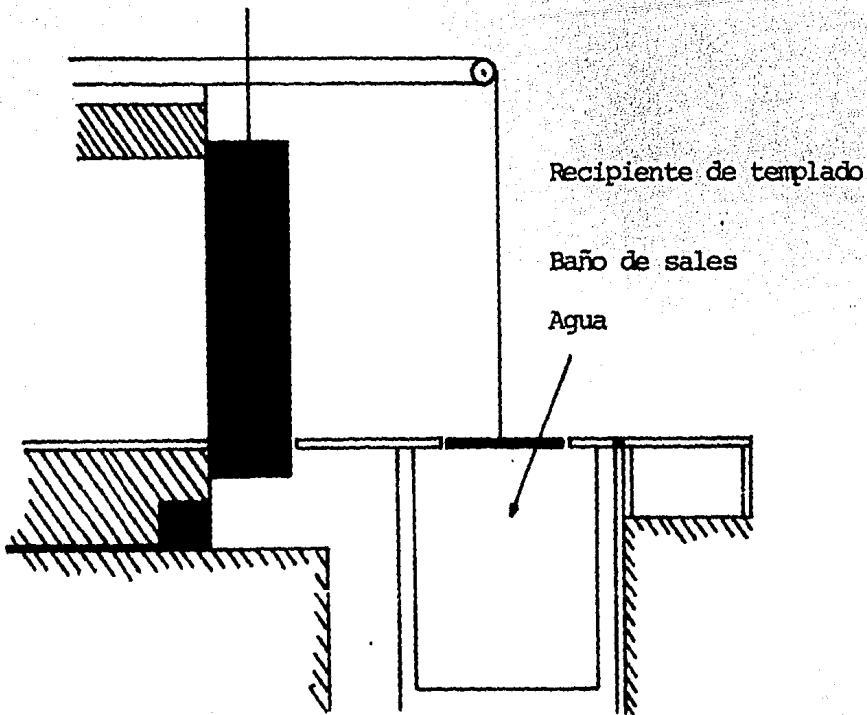
Para homogeneizar la composición química del gas, la temperatura, para volver más regular la cementación en las partes entrantes, y en el centro de las cargas, la cámara de cementación está equipada con uno o varios removedores de atmósfera (agitadores).



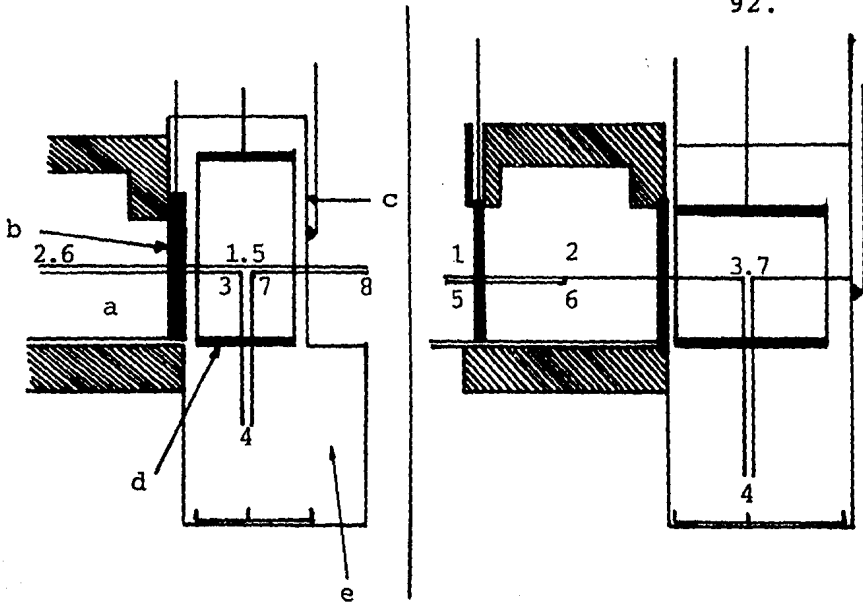
1. Removedor de atmósfera
2. Toma de gas
3. Bastones pirométricos
4. Deflector
5. Tubo radiante

Después de su paso por la cámara de cementación las cargas pueden ser templadas con aceite, con agua o con sales.

En estos dos casos, las cargas son extraídas una por una de la esclusa para ser templadas.



El temple con aceite puede operarse en un recipiente contiguo al horno en la esclusa de descarga, al abrigo del aire. Bajo esta atmósfera se evita la oxidación. Los vapores de aceite que penetran eventualmente en el laboratorio no perturbarán gravemente la atmósfera. Para los hornos de carga (en inglés BATCH-TYPE), el ascensor puede ser de dos pisos para permitir un nuevo enhornamiento tan luego como la carga precedente esté en el templeado.

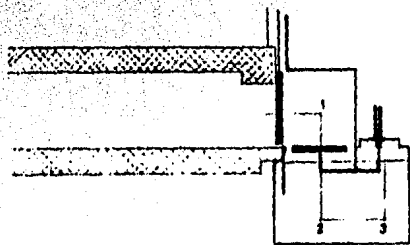


Vista lateral

Vista planta

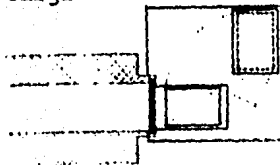
- a. Cámara de Cementación
- b. Puerta refractaria
- c. Puerta fría
- d. Ascensor
- e. Recipiente de templado

En los hornos con dispositivo de temple giratorio,  
la introducción de aire en la esclusa al contacto



Vista lateral

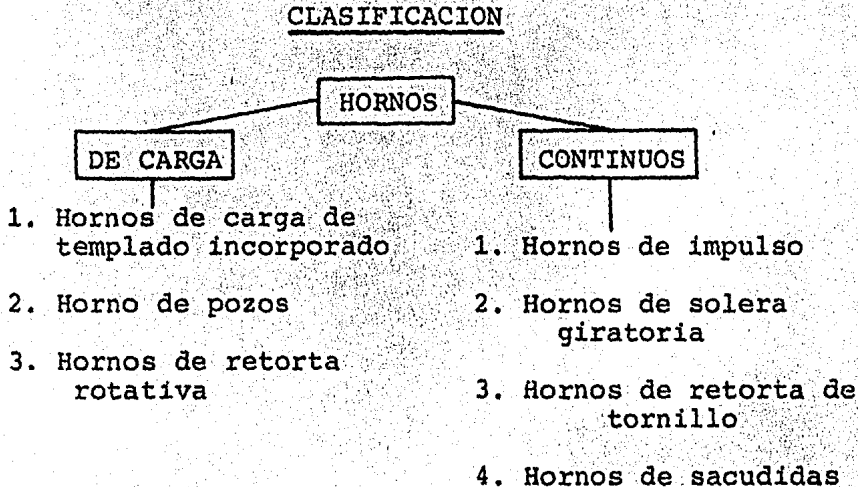
Templado en aceite  
con giro de la carga



Vista planta

de la puerta de salida del horno, se evita haciendo girar la carga en posición baja y extrayéndola del recipiente de templado en una esclusa aislada del horno.

## b.2) Clasificación general.



Se distinguen dos grandes clases de materiales:

- Los hornos de carga en los cuales una sola carga es tratada a la vez.
- Los hornos continuos en que las cargas se suceden sin interrupción.

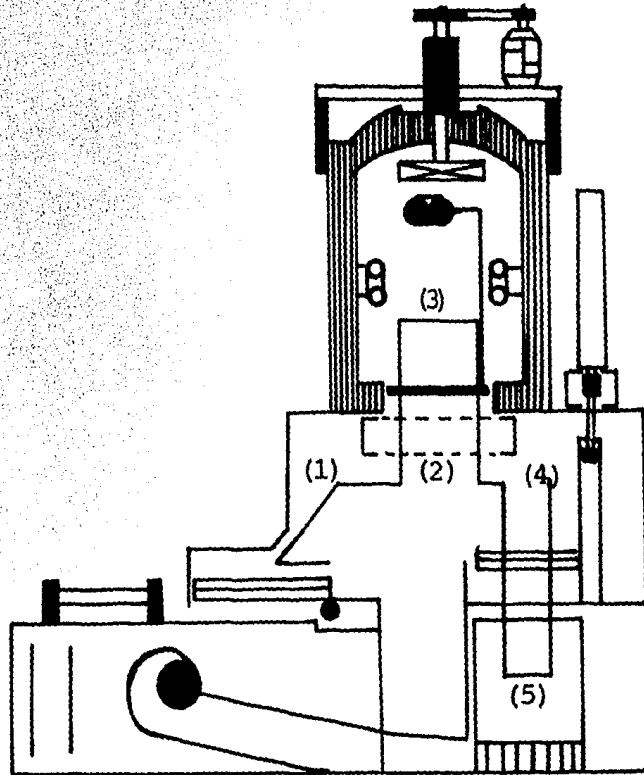
### b.2.1 Los hornos de carga

- Los hornos de carga de templado incorporado.

Cualquiera que sea el tipo de horno de carga incorporado, se compone de una simple o doble esclusa y de un laboratorio.



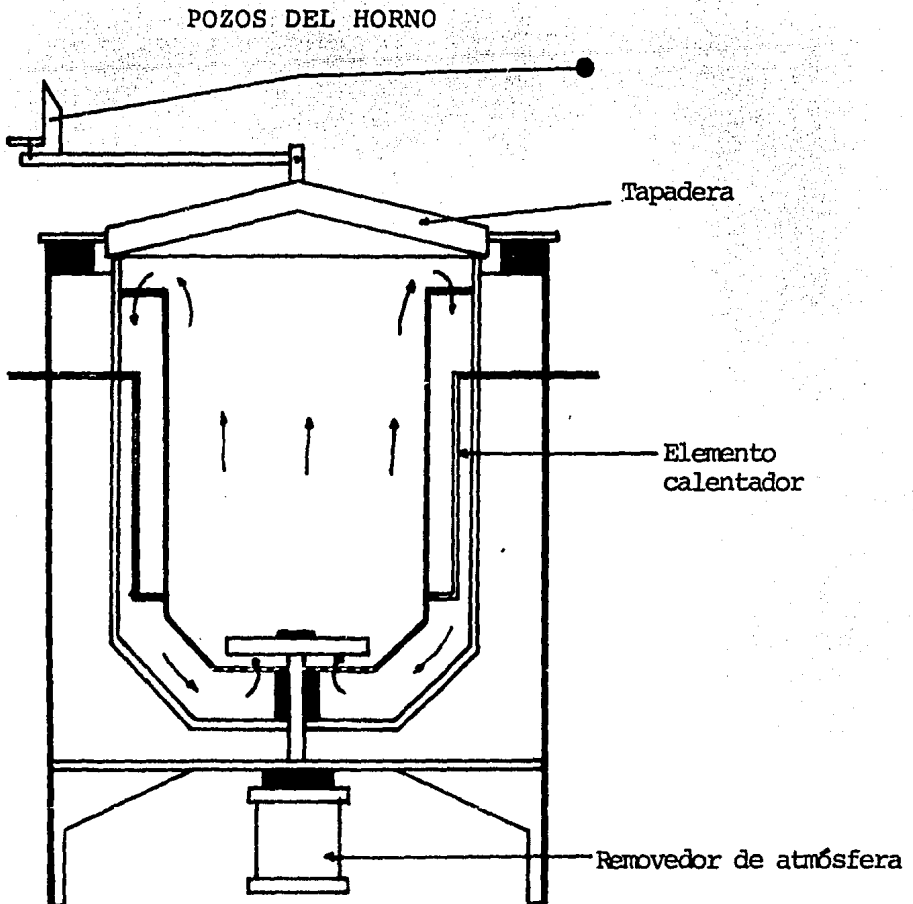
En la figura siguiente la carga es introducida en la esclusa (1), después puesta en posición (2), antes de ser colocada en el laboratorio <sup>\*</sup> (3). Al final de la cementación es puesta sobre el ascensor (4), para ser templada en (5); durante ese tiempo otro enhornamiento puede tener lugar.



El enhornamiento y deshornamiento pueden hacerse por la misma puerta. En este tipo de instalación se puede adjuntar una máquina de lavar y un horno de revenido.

(\*) cámara

- Los hornos de pozos.



En los hornos de pozos, la carga a tratar es dispuesta sobre una instalación apropiada y descendida en una mufla de acero refractario. Una tapadera hermética cubre el horno durante el tratamiento.

Se distinguen dos tipos de hornos, según si el agitador de atmósfera esté montado:

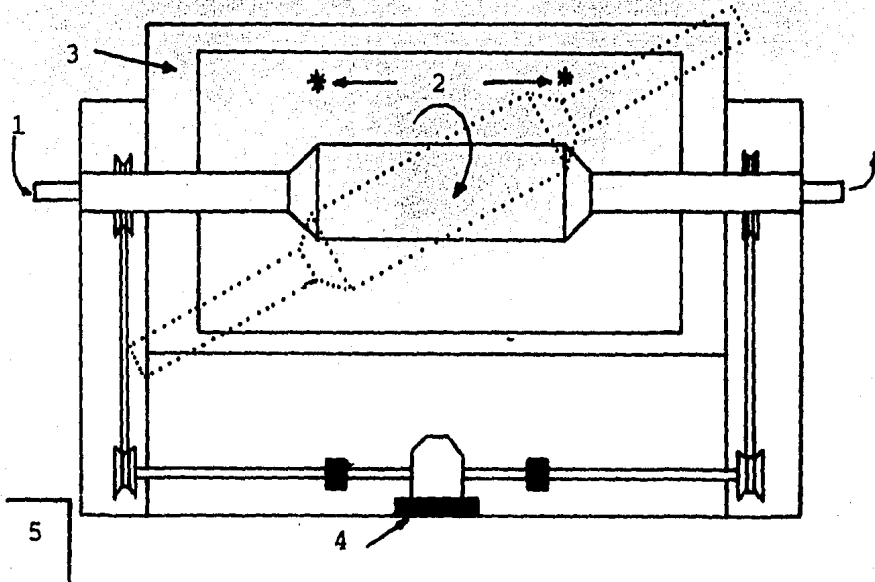
- al fondo de la mufla, o
- sobre la tapadera.

Los recipientes del aceite y del agua, anexados al

horno, permiten efectuar el templado. El paso del aire a la carga a templar es inevitable.

- Los hornos de retorta rotativa.

#### HORNO DE RETORTA ROTATIVA DE COLUMPIO



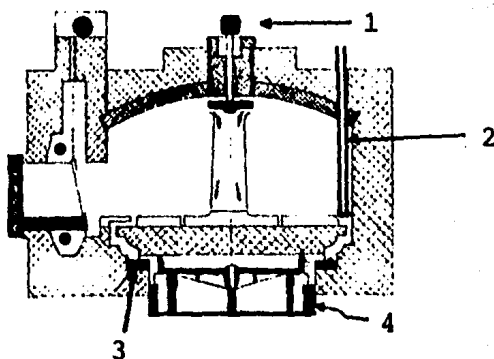
1. Llegada de gas
2. Quemadores
3. Retorta de acero refractario
4. Mecanismo de rotación de la retorta
5. Recipiente de templado

En los hornos de retorta rotativa la carga es colocada en una retorta horizontal que gira sobre su eje. Esta retorta está colocada al interior del armazón cilíndrico que lleva el enladrillado refractario y el sistema de calentamiento.

Un movimiento oscilatorio de adelante hacia atrás permite la descarga y la carga. Un recipiente de agua o aceite puede ser instalado delante del horno

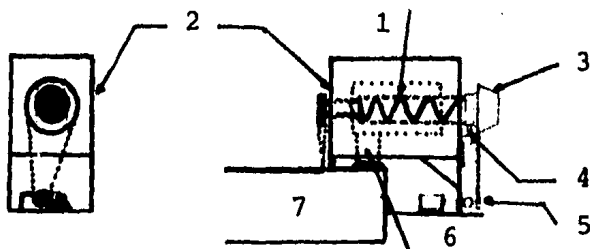
sobre bandejas que se impulsan mutuamente en el horno. Estas cargas constituyen una fila continua que atraviesa el horno. Existen hornos de 1, 2 y 3 filas. El tiempo de pasaje es uno de los parámetros que determinan la profundidad de la cementación. El ci-

#### HORNO DE SOLERA GIRATORIA



1. Removedor de atmósfera.
2. Tubos radiantes
3. Junta de arena
4. Junta de aceite

#### HORNO DE RETORTA DE TORNILLO



1. Resistencias calentadoras
2. Retorta
3. Tolva de carga
4. Rodillos soporte
5. Mecanismo de arrastre o tracción
6. Canal de templado
7. Recipiente de templado.

clo ha sido preestablecido por intermedio de interruptores, válvulas y relevadores. Gatos hidráulicos aseguran todos los movimientos según el orden seleccionado. Los seguros son accionados automáticamente.

Las cargas entran en una esclusa de enhornamiento antes de ser introducidos en el laboratorio que puede estar dividido en varias cámaras permitiendo así un ciclo de tratamiento estudiado. Antes de ser extraídas de la esclusa de deshornamiento las piezas son templadas en un recipiente de aceite calentado entre 80 y 200°C. Turbinas de soldadura aseguran la homogeneidad de la temperatura del aceite y del templado.

Instalaciones anexas permiten la alimentación de fluidos (gas de aporte, gas adicional, nitrógeno, agua, aceite), el calentamiento del horno (descompresores, supresores, mezcladores) y el control de las temperaturas, los despachos de gas y de la actividad de la atmósfera cementante.

- Los hornos de solera giratoria.

En los hornos de solera giratoria, la solera es un anillo circulante que gira sobre su propio eje. Ella reposa generalmente sobre rodillos exteriores del horno. El arrastre se hace por piñones y cremalleras. La solera es de acero especial o de materiales re-

fractarios. Estos hornos permiten una producción elevada, por una superficie de suelo reducido.

- Los hornos de retorta de tornillo.

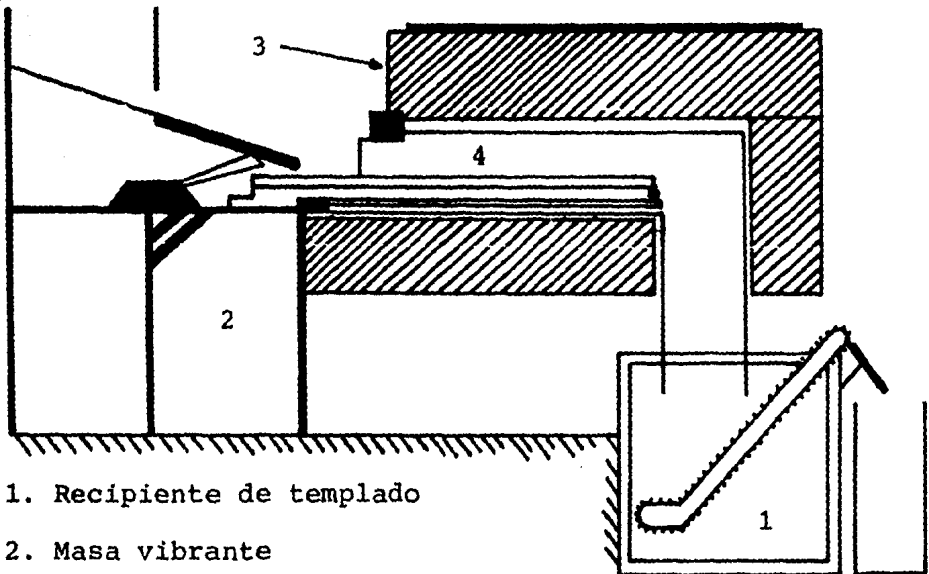
Se presentan como los hornos de retorta rotativa, pero la retorta es fija y las piezas son arrastradas dentro de un tornillo de Arquímedes.

Se carga por un extremo y las piezas caen en un recipiente de templado al otro extremo.

El tratamiento es entonces continuo.

- Los hornos de sacudidas o de retorta vibrante.

HORNO DE SACUDIDAS



1. Recipiente de templado
2. Masa vibrante
3. Solera vibrante
4. Cortina de flamas.

El desplazamiento de las piezas a tratar puede ser obtenido por inercia comunicando a la retorta un

movimiento alterno de adelante a atrás. Este es el principio de los hornos de sacudidas.

El movimiento puede ser comunicado a la retorta por impulsos a una frecuencia de 50 Hz, provistos por un vibrador electromagnético. Los hornos son llamados de retorta vibrante.

La retorta es siempre metálica de acero refractario. Ella debe ser diseñada con el fin de que la velocidad de avance de las piezas permanezca constante.

c) Los generadores.

c.1) Principio (o norma)

La fabricación de gas de aporte se efectúa en la mayoría de los casos en generadores endotérmicos. El gas de aporte (comunmente llamado Rx: gas derivado a partir del propano), es producido por el rompimiento de una mezcla correcta de aire y gas sobre un catalizador calentado a 1000°C., en unas retortas de acero refractario. El gas obtenido es enfriado bruscamente a la salida del generador para conservar su composición.

C.2) Descripción.

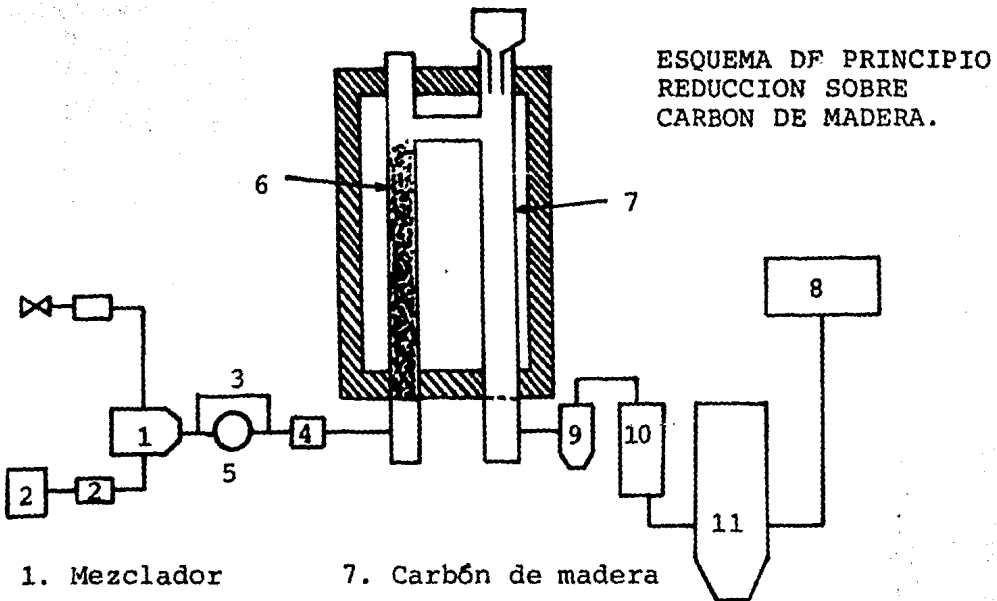
El generador se compone de un armazón metálico provisto de refractario y atravesado por retortas, de un conjunto de calentamiento y regulación que

permite mantener la retorta a una temperatura de alrededor de  $1,000^{\circ}\text{C}$ , de un conjunto de producción de gas de aporte incluyendo unos rotámetros, un mezclador, un supresor de los enfriadores y unos filtros.

c.3) Los generadores de gas tratado.

La mezcla rota pasa sobre carbón de madera calentado a  $1,000^{\circ}\text{C}$ . Enseguida es desempolvado, enfriado y filtrado.

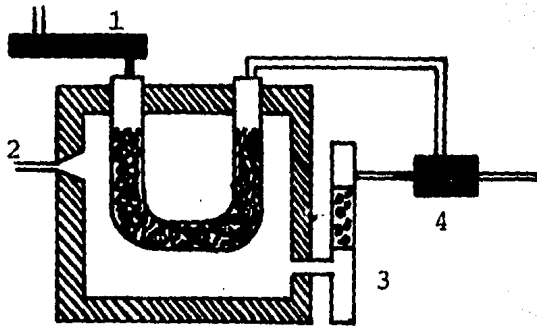
Este tratamiento permite eliminar los rastros de gases residuales:  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$  transformándolos en  $\text{CO} + \text{H}_2$ .



- |                |                     |
|----------------|---------------------|
| 1. Mezclador   | 7. Carbón de madera |
| 2. Debímetros  | 8. Analizador       |
| 3. By Pass     | 9. Desempolvador    |
| 4. A F         | 10. Refrigerador    |
| 5. Supresor    | 11. Filtro          |
| 6. Catalizador |                     |



## c.4) Los generadores de gas recuperado.



1. Enfriador
2. Mezcla de gas de calentamiento
3. Condensador
4. Ajuste de gases quemados.  
Gases secundarios.

Otro procedimiento consiste en recuperar una parte de los productos de combustión que han servido para calentar la retorta, a los cuales se aña de un gas secundario. Se hace pasar esta mezcla dentro de un retorta llena de catalizador. El gas obtenido enseguida es enfriado rápidamente.

## c.5) Algunas precisiones.

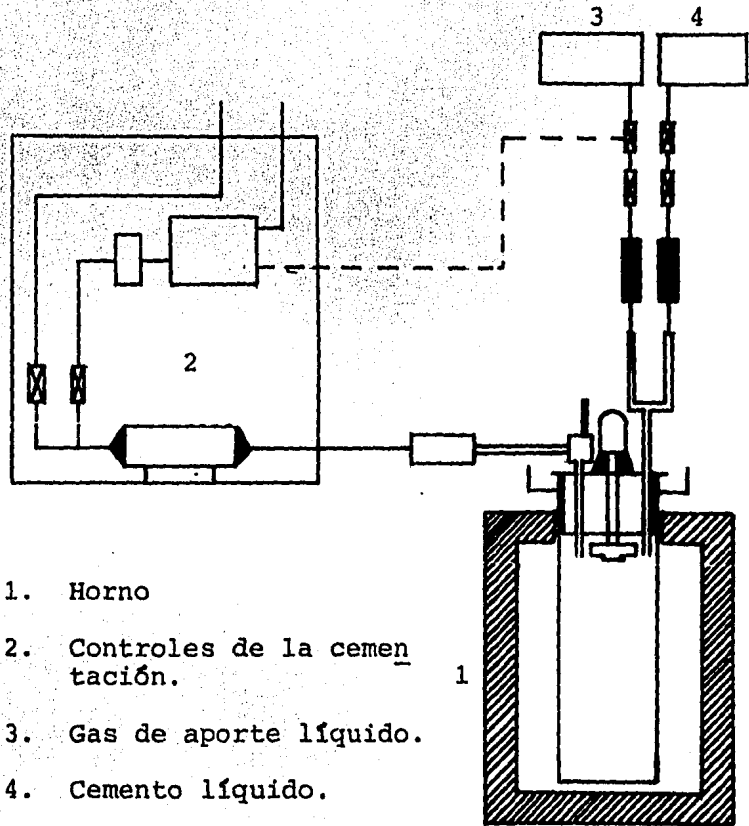
En estas instalaciones la composición del gas es es tá controlada manual o automáticamente.

Es posible añadir unos dispositivos de regulación automática que actúa directamente sobre la mezcla aire-gas.

## c.6) Cementación por instilación.

La atmósfera de cementación puede ser obtenida

PROCEDIMIENTO POR INSTILACION



1. Horno
2. Controles de la cementación.
3. Gas de aporte líquido.
4. Cemento líquido.

por instilación de productos orgánicos líquidos tales como el metanol que va a proporcionar el gas de aporte y el isopropanol, el agente de cementación.

Se envía a una campana una mezcla correcta de

estos productos orgánicos sobre un crisol pequeño calentado previamente. La mezcla líquida se evapora inmediatamente. Un horno de resistencias eléctricas permite calentar la campana. Un removedor de atmósfera homogeneiza la composición del gas. Al fin del ciclo, la campana es introducida en el enfriador. Las piezas tratadas siguen enseguida un ciclo correspondiente a las especificaciones deseadas.

d) Conclusión.

Los materiales de cementación disponibles en el mercado son muy variados y permiten resolver los problemas de pequeñas y grandes series. La automatización de los ciclos, los ajustes de temperatura y de atmósferas permiten resultados muy repetitivos compatibles con las exigencias de la metalurgia moderna. Algunos progresos son anunciados en este dominio, por ejemplo, el empleo de hornos al vacío que permitirán un trabajo a más alta temperatura en atmósfera reductora

## 2) CEMENTACION POR INSTILACION DE LIQUIDOS.

El método CARBOMAAG de cementación gaseosa por instilación ha sido desarrollado a fines de los 50's y principio de los 60's; hoy en día es muy utilizado en Europa y Japón. Este método se basa esencialmente en el empleo de metanol líquido, como "portador" y de acetona de etilo como "agente cementante", en lugar del gas endotérmico clásico. En consecuencia, su aplicación es más frecuente en aquellos sitios donde el gas natural no está disponible o es muy costoso, o bien, en los casos donde se busque reemplazar la cementación clásica. Los dos líquidos son introducidos simultáneamente, pero separadamente en el horno. El metanol se descompone dando un gas que barre el horno y después provee la presión suficiente durante el ciclo de cementación. La acetona o acetato de etilo se descompone proveyendo el gas necesario para la obtención del potencial de carbono adecuado. La mayor parte de los hornos regulados por el proceso CARBOMAAG son los hornos de pozos o de vasija. De todas formas la técnica puede ser aplicada en hornos horizontales discontinuos con un recipiente de templado por aceite (incorporado) y en hornos continuos. Actualmente los hornos más grandes de cementación que utilizan el CARBOMAAG tienen dimensiones útiles de 2 metros de diámetro y de 2,7 metros de altura, o de un metro de diámetro y 5,2 metros de altura. No existen límites dimensionales para estos hornos.

El CARBOMAAG ofrece otras ventajas importantes:

- 1) La posibilidad de regulación del potencial de carbono igual a aquella de la cementación clásica con un gas endotérmico

- 2) La eliminación de la necesidad de un generador de gas endotérmico.
- 3) Una disponibilidad adicional de carbono por volumen unitario, que asegura una cementación más uniforme de agujeros ciegos y de otras zonas difíciles de cementar, y favorece la cementación de las cargas muy compactas.
- 4) Un coeficiente de transferencia de carbono más elevada, esto se traduce en tiempos de cementación más cortos.
- 5) Cantidades menores de gases combustibles perdidos.
- 6) La supresión de la búsqueda de la producción de gas entre los ciclos sucesivos de cementación.

El proceso CARBOMAAG ha sido concebido inicialmente para la cementación y para el calentamiento antes del templado de aceros de mediano y alto carbono a temperaturas superiores a 840°C., bajo una atmósfera de potencial de carbono controlado. Actualmente se puede tratar a más bajas temperaturas los aceros al carbono de contenido elevado añadiendo una cantidad controlada de nitrógeno. Se puede efectuar una carbonitruración añadiendo amoníaco. La flexibilidad del proceso es tal que se puede también, recurriendo al nitrógeno puro, efectuar un templado o un revenido neutros.

a) Cinética de la disociación y reacciones de cementación.

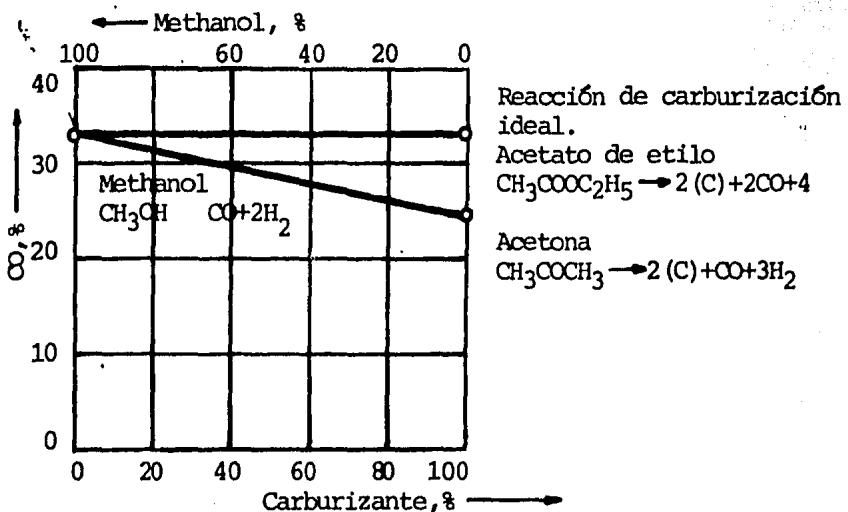
El metanol líquido se disocia proporcionando CO e hidrógeno:



aunque el metanol reemplaza el gas portador clásico, su

papel más importante es mantener una sobrepresión dentro del horno en todo momento, e incluso tan pronto como la salida de gas cementante es interrumpida. El efecto cementante del metanol es muy débil porque es introducido a un muy débil caudal 200/400gr/h. Se selecciona el líquido cementante de modo que se pueda obtener, por la disociación y reacciones de cementación, aproximadamente la composición de gas de aquella obtenida de la disociación del metanol. Esta condición debe ser satisfecha para estar seguros que la composición global del gas dentro del horno permanece constante; esto permite un control automático de la velocidad de aporte del líquido cementante por regulación de la proporción de CO o de agua (punto de rocío) del gas del horno.

La siguiente gráfica es relativa a la reacción de disocia-

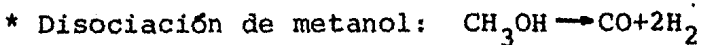


Empleo de acetato de etilo  $\text{CH}_3\text{COOC}_2\text{H}_5$  y de acetona como agentes cementantes en el proceso por instilación. Un agente cementante adecuado debe proporcionar aproximadamente la misma composición de gas, por las reacciones de disociación y de cementación, que luego de las disociación del metanol  $\text{CH}_3\text{OH}$ .

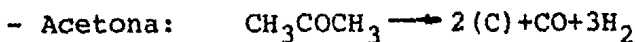
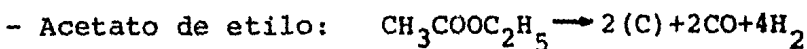
ción del metanol y la proporción de CO (33%) del gas obtenido está indicada a la izquierda. A la derecha, se tienen las reacciones ideales de cementación por acetato de etilo y acetona (los productos más interesantes) y los puntos experimentales dando las proporciones de CO obtenidas.

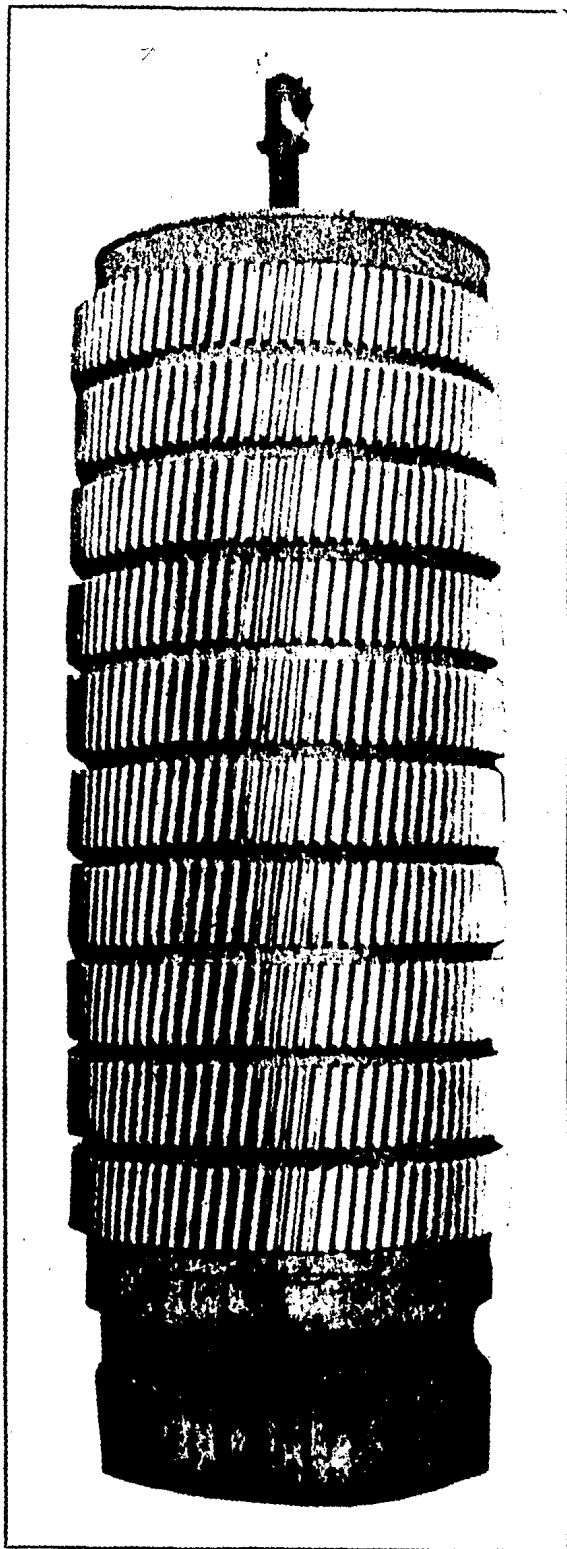
También se puede observar en la gráfica que comprende todos los productos de mezcla de metanol puro como agente de cementación pura. Se insistirá en que el acetato de etilo, si es introducido en combinación con metanol, no conduce a ninguna desviación por productos de la composición del gas de base. Pero la práctica ha demostrado que las desviaciones debidas a la acetona son tan débiles que este líquido, menos costoso y fácilmente dissociable puede ser también utilizado como agente cementante.

El empleo de acetato de etilo  $\text{CH}_3\text{COOC}_2\text{H}_5$  y de acetona como agentes cementantes en el proceso por instilación. Un agente cementante adecuado debe proporcionar aproximadamente la misma composición de gas, de las reacciones de disociación y de cementación, como también de la disociación de metanol  $\text{CH}_3\text{OH}$ . NOTA. La abscisa: proporción de líquido cementante, %. La ordenada: CO, %.



\* Reacción ideal de cementación:





Carga de 10 engranes de  
900 mm de diámetro lista  
para la cementación  
por el proceso de  
CARBOMAAG.



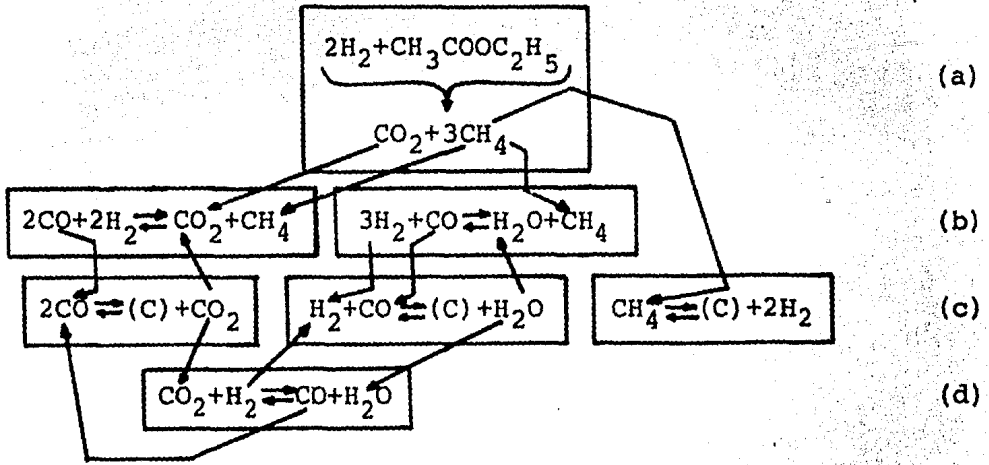
Otros líquidos orgánicos e hidrocarburos puros provocan desviaciones tan grandes por productos, de la composición del gas de base que no se puede efectuar del todo la regulación del potencial carbono a partir de la medida de la proporción de  $\text{CO}_2$  o del punto de rocío.

b) Velocidades de reacción.

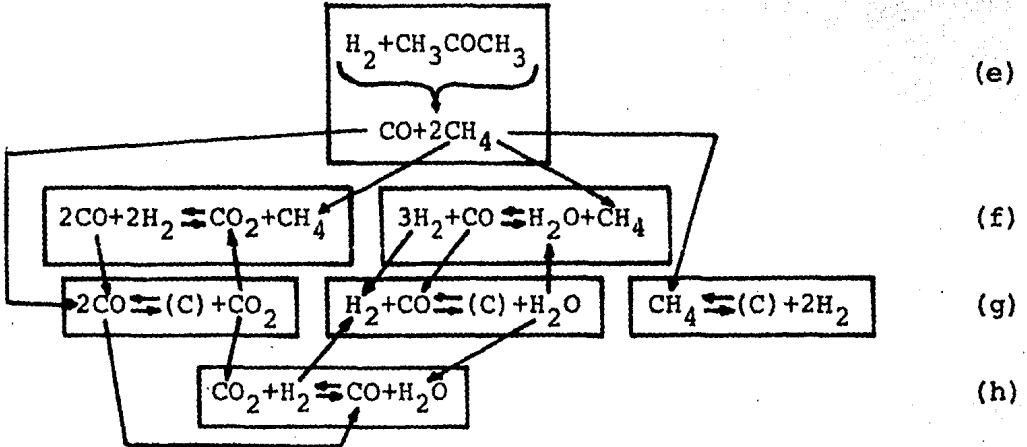
Se ha utilizado la cromatografía gaseosa para analizar la composición del gas del horno durante la cementación de numerosas cargas con superficies para cementar de muy variada importancia. Los datos muestran que las reacciones de disociación en el horno son muy rápidas y que las reacciones gaseosas y cementantes posteriores son más lentas. En conclusión, como el flujo de introducción del líquido cementante aumenta, los productos de la reacción primaria de disociación tienden a ser enriquecidos en el gas del horno, de donde una cierta desviación con la composición de base del gas.

En la siguiente página se puede observar las reacciones de disociación para el acetato de etilo y la acetona, y las reacciones homogéneas posteriores, gaseosas y cementantes. El metano,  $\text{CH}_4$  formado por la disociación de uno u otro agente cementante, y el  $\text{CO}_2$  formado solamente luego de la disociación del acetato de etilo (o por una de las reacciones de cementación) reaccionan entre ellas relativamente lento. Así, estos compuestos pueden conducir a concentraciones bastante elevadas por encima del equilibrio si

## Acetato de etilo



## Acetona



- (a) (e) Reacción de disociación primaria.  
 (b) (f) Reacción de  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$   
 (c) (g) Reacción de cementación  
 (d) (h) Equilibrio gas-agua.

Reacciones de disociación, gaseosa homogénea, y de cementación para el acetato de etilo y acetona. La reacción de cementación preponderante es:

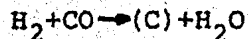
$$\text{H}_2 + \text{CO} \longrightarrow (\text{C}) + \text{H}_2\text{O}$$

el flujo de introducción es elevado, como es el caso de la cementación de superficies importantes.

En estas condiciones, el potencial carbono con el empleo de metanol-acetato de etilo no puede ser controlado con seguridad a partir de la medida de la proporción de  $\text{CO}_2$  porque el gas no está en equilibrio. Por el contrario, se puede controlar el potencial C por el punto de rocío.

En el proceso de metanol-acetona, el control con la proporción de  $\text{CO}_2$  no puede ser utilizado porque la disociación de la acetona no proporciona  $\text{CO}_2$ .

En cada proceso, la reacción de cementación dominante parece ser:



Y esta parece ser la reacción más rápida de las 3 reacciones indicadas sobre la figura de la página anterior.

#### c) Posibilidad de control del potencial carbono.

Se ha subrayado que la composición de base del gas debe permanecer absolutamente constante para un control automático del potencial C por la proporción en  $\text{CO}_2$  o el punto de rocío. Otros factores que se deben considerar son la cinética de la disociación y las reacciones posteriores. Examinemos así la gama completa de las mezclas metanol-acetato de etilo (o acetona). Enseguida, supongamos que los líquidos cementantes son introducidos en función de la demanda instantánea en C de la superficie, esto mantiene por ejemplo un potencial C de 1% a  $920^\circ\text{C}$ . La práctica muestra

que se obtienen grandes cantidades de metano (en los casos extremos más de 10 veces que la proporción de equilibrio) tan luego como el flujo de aporte del líquido cementante aumente. Las proporciones en  $\text{CO}_2$  están así debajo del equilibrio si se utiliza el acetato de etilo.

Se puede evaluar la modificación admisible de la composición de base del gas estudiado la influencia de la variación eventual del cuadrado de la presión parcial de  $\text{CO}$ ,  $p^2\text{CO}$ , sobre el potencial C a proporción de  $\text{CO}_2$  constante, o la influencia de  $p\text{CO} \times p\text{H}_2$  sin variación.

He aquí lo que se observa luego del control con el punto de rocío: a proporciones en  $\text{CH}_4$  mayores (proporción aumentada de los líquidos cementantes) corresponden

las desviaciones negativas más importantes del producto  $p\text{CO} \times p\text{H}_2$  (debidos a la vez al acetato de etilo y a la acetona) que aquéllas que son esperadas en condiciones ideales. La desviación de  $p^2\text{CO}$  para el acetato de etilo se vuelve muy importante y es positiva,; para la acetona, la desviación es negativa.

En condiciones reales, la proporción de líquido cementante (regulada por la demanda instantánea en C) varía en la horquilla operadora de 15-90%; para el producto  $p\text{CO} \times p\text{H}_2$  en el caso de metanol-acetato, se tiene entonces 0,212 a 0,192; para el metanol-acetona, 0,210 a 0,172. Estos valores corresponden a una diferencia de potencial C de 1,00 a 0,93% y de 1,00 a 0,87% respectivamente; yendo aún más lejos, esto corresponde a las desviaciones de

$\pm 0,035$  ó de  $\pm 0,065$  de C respectivamente.

Para la gama completa (0-100%) de líquido cementante, la desviación en relación al valor medio será de  $\pm 0,055\%$  C para el acetato y de  $\pm 0,105\%$  para la acetona; teóricamente se trata ahí de las desviaciones más fuertes posibles y eso no tiene lugar en la práctica.

Con el control a partir de la proporción de  $\text{CO}_2$ , las desviaciones en relación a un valor promedio son  $\pm 0,055\%$  C para el acetato y  $\pm 0,065\%$  C para la acetona para una producción de líquido cementante de 15 a 90%. Para toda la gama (0-100%) se obtienen respectivamente  $\pm 0,08\%$  C ó  $\pm 0,10\%$  C.

Se insistirá en que los valores relativos en el empleo del acetato no tienen más que una significación limitada, a causa de la posibilidad, para la proporción de  $\text{CO}_2$ , de situarse por debajo del equilibrio. Es por esto que se prefiere la acetona si se desea el control a partir de la proporción de  $\text{CO}_2$ . En la práctica, se puede reducir la desviación de  $\pm 0,065\%$  C ligado al empleo de acetona recurriendo a la mezcla 75% acetona + 25% acetato de etilo. Para el procedimiento clásico también se han determinado datos similares en el caso del gas endotérmico; se han calculado las variaciones de  $p_{\text{CO}} \times p_{\text{H}_2}$  y de  $p^2_{\text{CO}}$  en función de la relación de gas portador-gas natural que se ha supuesto está comprendido en la gama operatoria del 38%. El producto  $p_{\text{CO}} \times p_{\text{H}_2}$  permanece poco después constante hasta

las relaciones muy inferiores de esta gama debido a las variaciones en sentido opuesto de las proporciones de  $H_2$  y  $CO$  (cuando la relación gas portador/gas natural disminuyen, la proporción en  $H_2$  aumenta rápidamente en detrimento de aquella de  $CO$  y  $N_2$ ), en consecuencia la diferencia del potencial  $C$  en punto de rocío constante es muy débil ( $\pm 0,025\%$   $C$ ). Al contrario, el valor de  $p^2CO$  disminuye rápidamente en la relación gas portador/gas natural decreciente. En el rango de operación,  $p^2CO$  varía entre 0,037 y 0,026, de donde una diferencia del potencial  $C$  de 1,00 a 0,79% en proporción en  $CO_2$  constante; esto corresponde a una desviación de  $\pm 0,105\%$   $C$ .

Sobre toda la gama, desde el gas portador sin enriquecer hasta una relación gas portador/gas natural de 8, la diferencia del potencial  $C$  será de 1,00 a 0,73% (las variaciones relativamente débiles de la relación entrañan importantes desviaciones del potencial  $C$  en proporción de  $CO_2$  constante).

Los datos arriba indicados para el CARBOMAAG y la cementación clásica son retomados en la Tabla de la siguiente página. Las desviaciones son las más fuertes posibles y se les puede reducir cómodamente en la práctica adaptando el valor de la tabla a las condiciones operatorias. Se recordará que los puntos de rocío y las proporciones de  $CO_2$  muy bajos en el proceso del gas endotérmico son bastante más difíciles de controlar de manera confiable que

DESVIACIONES MAXIMAS DEL POTENCIAL CARBONO  
PARA DIVERSOS PROCESOS DE CEMENTACION (1)

PROCESO DE CEMENTACION	Regulación por el punto de rocío		Regulación por la proporción en CO <sub>2</sub>	
	RANGO DE OPERACION	RANGO TOTAL	RANGO DE OPERACION	RANGO TOTAL
Con metanol y acetato de etilo .....	± 0.035	± 0.055	± 0.055 (2)	± 0.08 (2)
Con metanol + mezcla a 75% de acetona y 25% de acetato de etilo.....	± 0.045	± 0.075	± 0.05	± 0.08 (2)
Con metanol-acetona.....	± 0.065	± 0.105	± 0.065	± 0.10
Con gas endotérmico.....	± 0.025	Fuera de la regulación	± 0.105	Fuera de la regulación

(1) Desviación máxima posible del potencial C en relación a una señal promedio de aproximadamente 1% a 920°C, debida a las modificaciones de la composición del gas de base.

(2) Regulación por la proporción en CO<sub>2</sub>, no recomendada para aplicaciones industriales.

los valores más elevados del proceso CARBOMAAG. Así, pues hay un interés limitado en la insensibilidad del potencial C a las variaciones de la relación gas portador/gas natural en el momento en que se recurre al punto de rocío. Desde el punto de vista de la variabilidad de la composición del gas, se puede controlar correctamente el potencial C en la gama operatoria para los 2 procesos. Sin embargo, la gama es más amplia para el CARBOMAAG, mientras que aquélla relativa al proceso de gas endotérmico es más restringida y no puede ser mantenida más que por la presencia del gas portador en exceso.

d) Datos relativos al carbono.

Se puede definir la disponibilidad de carbono de una atmósfera cementante por la cantidad de C transferido a la superficie del acero para un volumen dado de gas, siendo el potencial C abatido de 1,00 a 0,90%.

Para obtener un valor absoluto, se deben tener en cuenta las desviaciones de las proporciones de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{CH}_4$  en equilibrio para los potenciales C de 1,00 x 0,90%. Pero para el cálculo de la disponibilidad "efectiva" en C, se puede despreciar la proporción de  $\text{CH}_4$ , pues este gas no participa directamente en la cementación a causa de que su velocidad de reacción es lenta.

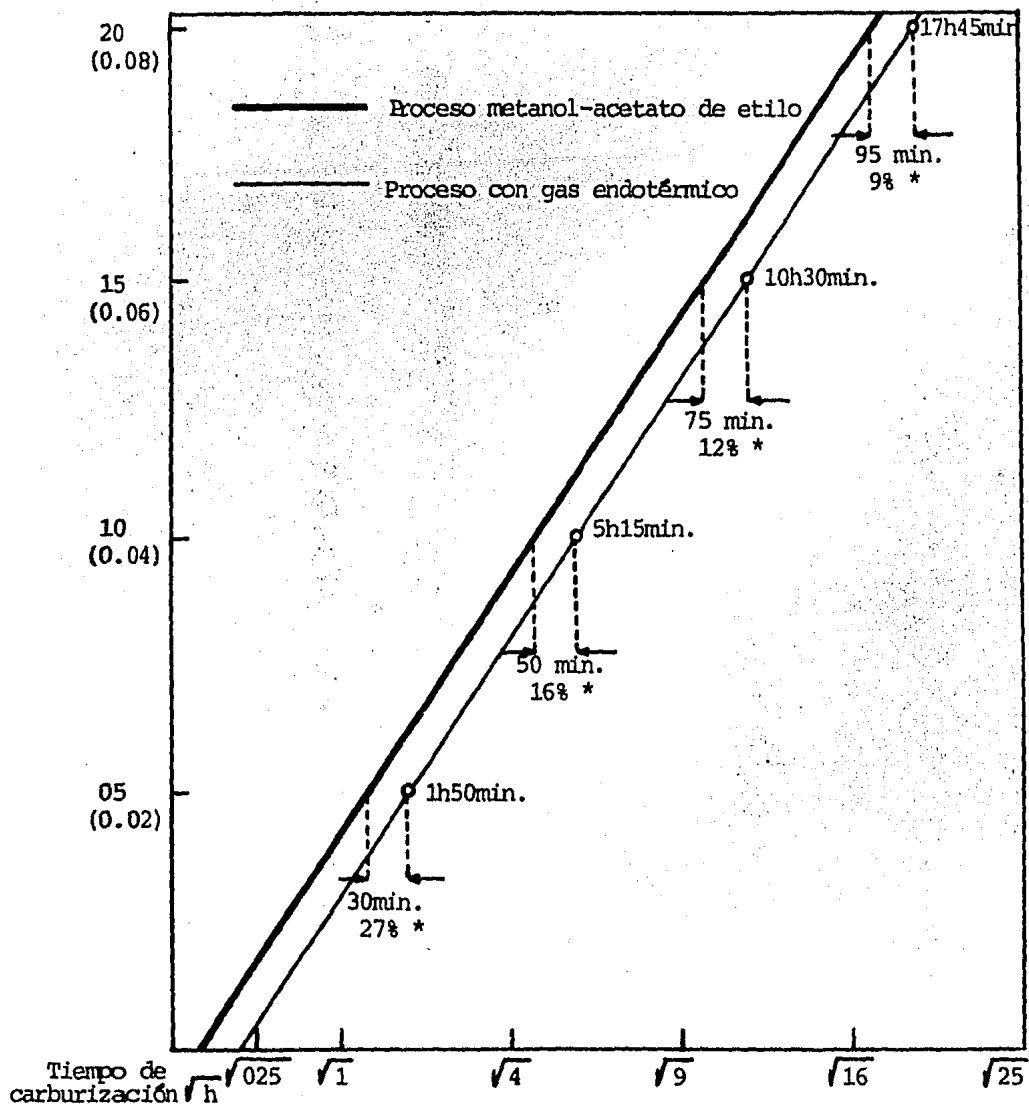
Así, se ha calculado que la disponibilidad efectiva de carbono en el proceso CARBOMAAG es 2,5 veces más elevado que en el proceso de gas endotérmico. Esto constituye una



ventaja durante la cementación de agujeros ciegos y otras zonas zonas poco expuestas a la circulación del gas o durante la cementación de cargas muy compactas.

Los coeficientes de transferencia de C son igualmente muy elevadas:  $275 \times 10^{-7}$  cm/s para el metanol-acetato en lugar de  $120 \times 10^{-7}$  cm/s para el gas endotérmico. En la figura se muestra el resultado práctico de este hecho: se han reportado para los dos métodos de cementación el crecimiento del espesor de cementación a  $930^{\circ}\text{C}$  para un acero aleado 0,15 C, 3,5 Ni, 0,75 Cr. Para una duración de cementación dada, la desviación entre los espesores está ligada a la desviación entre los coeficientes de transferencia de C.

Se subraya que la diferencia es más importante en valor relativo para los pequeños espesores que para los grandes; al contrario, su valor absoluto crece con el espesor cementado. Para un espesor de 0,51mm, el ahorro de tiempo usando CARBOMAAG es de 27%, o sea 30 minutos; y para 2,03mm se obtiene el 9%, o sea 95 minutos



Los tiempos de cementación más cortos constituyen una ventaja del proceso CARBOMAAG en relación al proceso clásico con el gas endotérmico. Se indican aquí las ganancias absolutas y relativas de tiempo para diversas combinaciones de profundidad de cementación-duración de la cementación.

Acero: 0,15C - 3,5 Ni - 0,75 Cr.

Cementación: temperatura = 930°C; potencial C = 1,15%

Ordenada: profundidad de cementación, mm por 550 HV.

Abcisa: duración de la cementación,  $\sqrt{h}$

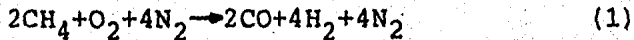
Línea continua: proceso con metanol-acetato de etilo

Línea delgada: proceso con gas endotérmico

(\*) Reducción de tiempo.

e) Comparación de las entradas y las salidas en el ciclo de cementación.

La entrada de agentes cementantes no importa bajo qué forma, la salida de carbono que es absorbida en la superficie del acero y la cantidad de humos que exigen un volumen correspondiente de aire de combustión pueden ser fácilmente comparadas por el análisis de la cantidad de C implicado en la cementación y de su reacción con la cantidad de C absorbido (o con la profundidad de cementación). Así, la proporción de gas endotérmico a partir del gas natural ( $\text{CH}_4$ ) y el efecto de gas enriquecido pueden ser representados de manera simple por:

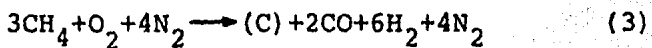


Sean dos moléculas de metano + 5 moléculas de aire quedan 10 moléculas de gas portador que contienen 6 moléculas de gas combustible.

La relación de los gases portador/enriquecedor es de 10 a 1:

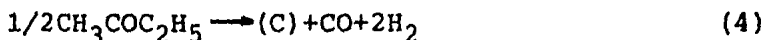


La suma de (1) y (2) da:



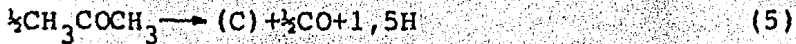
Entonces, para una molécula de gas absorbido por el acero, hace falta proveer 3 moléculas de  $\text{CH}_4$  y se pierden 8 moléculas de gases combustibles que exigen 20 moléculas de aire para la combustión.

La reacción con el acetato de etilo es la siguiente:



Entonces, se requieren de 2 moléculas de C, cuando una molécula de C es absorbida; se obtienen 3 moléculas de gases combustibles a condición de disponer de 7,5 moléculas de aire para la combustión.

La reacción con acetona es la siguiente:



1,5 moléculas son necesarias de C cuando sucede la absorción de una molécula de C; se obtienen 2 moléculas de gases combustibles a condición de disponer de 5 moléculas de aire para la combustión.

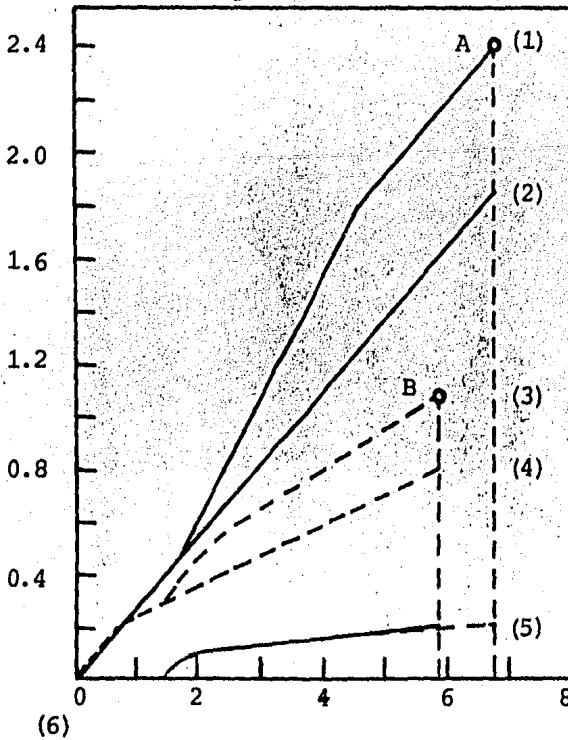
En el proceso CARBOMAAG, la cantidad de metanol por unidad de peso de C absorbida en la superficie es muy débil para una demanda elevada de líquido cementante (gran superficie) y relativamente importante para una demanda débil (pequeña superficie). Entonces toda comparación entre procesos debe tomar en cuenta las superficies para cementar.

#### EJEMPLO 1.

Sobre la siguiente figura, se ha partido de una superficie de  $4\text{m}^2$  con un espesor de 1,3mm para engranes de acero SAE 8620 (C=0,30%), con una cementación a  $925^\circ\text{C}$ .

Las curvas en trazos planos corresponden al proceso con gas endotérmico y se les ha obtenido a partir de una publicación de la ASM. Durante  $1\frac{1}{2}$  h se incrementa la temperatura paulatinamente, hasta llegar a la temperatura señalada (el proceso durará  $6\text{h } \frac{3}{4}$ ). Durante todo este ciclo el flujo de gas portador ha sido de  $2,8 \text{ m}^3$  por hora y

Peso de carbón, kg.



- (1) Peso total de C de gases portador y enriquecedor.  
 (2) Peso del carbón del gas portador.  
 (3) Peso total concernido en el proceso de metanol-acetona.  
 (4) Peso de C aportado por el metanol.  
 (5) Peso de C absorbido por la superficie.  
 (6) Duración de la cementación.  
 (7) Peso de carbón, Kilos.

Comparación de los pesos de carbono exigidos para cementar  $4 \text{ m}^2$  de acero SAE 8620 por el método de instilación y por el método clásico. (Para la comparación detallada de entradas y salidas, ver la tabla siguiente).

ENTRADAS Y SALIDAS LUEGO DE LA CEMENTACION DE UNA SUPERFICIE PEQUEÑA. (1)

Entradas/salidas	Gas endotérmico	Metanol-acetona
Entradas.....		
Gas portador.....	$19 \text{ m}^3$	-----
Gas natural.....	$1.0 \text{ m}^3$	-----
Metanol.....	-----	2.1 Kg
Acetona.....	-----	0.6 Kg
Carbón total concernido.....	2.6 Kg	1.1 Kg
Duración de la cementación....	2 h 45 mn.	5 h 55 mn
Salidas		
Carbón absorbido por la superficie.	0,2 Kg	0,2 Kg
$\text{H}_2$ .....	9,7 Kg	$3,6 \text{ m}^3$
$\text{CO}$ .....	3,8 Kg	$1,7 \text{ m}^3$
$\text{H}_2 + \text{CO}$ .....	$13 \text{ m}^3$	$5,3 \text{ m}^3$
Aire de combustión necesario..	$34 \text{ m}^3$	$13 \text{ m}^3$
Calor de combustión perdido...	164 MJ	64 MJ

(1) Superficie de  $4 \text{ m}^2$  con cementación a  $925^\circ\text{C}$  sobre un espesor de  $1.3 \text{ mm}$  o sea  $0,30\% \text{ C}$ ; acero SAE 8620.

el aporte de gas natural,  $0,3 \text{ m}^3/\text{h}$ , se ha empezado cuando se ha alcanzado la temperatura de cementación; se le ha detenido al fin de 3h. El punto "A" corresponde al C total implicado en el proceso, o sea 2,6 Kg (0,2 Kg de C absorbido). Las curvas con línea punteada corresponden al proceso CARBOMAAG. El ciclo completo ha durado menos de 6h con 1,1 Kg de C total implicado (punto "B").

La tabla de la página anterior nos permite comparar mejor los 2 procesos. Con el proceso de gas endotérmico se obtienen 2,5 veces más gases combustibles, es decir, que se pierde más calor de combustión y que es necesario consumir bastante más aire atmosférico.

No se ha tomado en cuenta la pérdida de gas portador partiendo de que no se emplean hornos de gas endotérmico.

En el proceso CARBOMAAG, se puede detener la llegada de los líquidos cementantes mientras el horno está detenido, con lo que se obtiene una economía suplementaria.

#### EJEMPLO 2

En la siguiente figura podemos comparar los ciclos de cementación para 10 engranes de motores de locomoción, de 0,9 mm de diámetro, con una superficie total de  $40 \text{ mm}^2$ .

Era necesario obtener un espesor cementado de 2,5 mm (0,30% de C) a  $920^\circ\text{C}$ ; se trataba de acero 16 Cr Ni6.

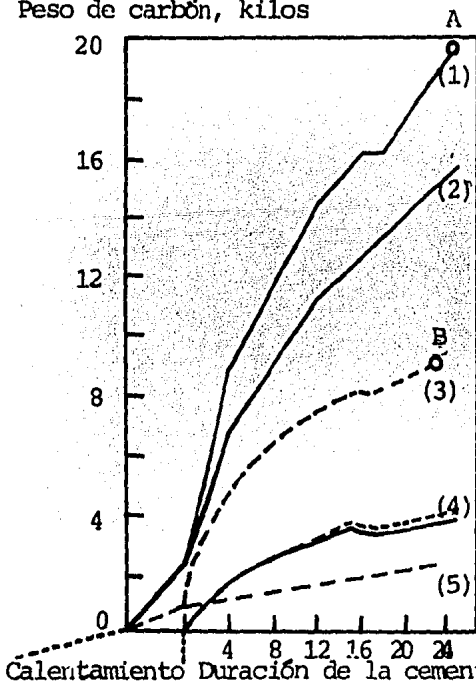
La duración de la cementación ha sido de 24 h. con el proceso metanol-acetona y de 25h 45 mm con el de gas endotérmico (elevaciones de temperatura no comprendidas).

En la siguiente tabla se provee más información. Además de una duración de cementación más corta, el proceso CARBOMAAG da menos de un tercio de gases combustibles que los obtenidos en el proceso de gas endotérmico.

Así el proceso CARBOMAAG es ventajoso desde el punto de vista de la economía de la energía y de protección al medio ambiente.

Se señalará, que por ejemplo (figura y tabla de la página siguiente) se ha mantenido a un nivel inhabitualmente bajo el flujo de gas portador en el proceso de gas endotérmico. Bajo condiciones normales, este flujo será bastante más elevado y el interés del CARBOMAAG será también mucho más significativo en materia de economía de energía y de protección al medio ambiente. Subrayamos así el hecho de que se puede detener enseguida la llegada de líquidos orgánicos desde el fin del ciclo, cuando los generadores endotérmicos suministran gas portador aunque no se les necesite.

Peso de carbón, kilos



- (1) Peso total de C de gases portador y enriquecedor.
- (2) Peso del carbón del gas portador.
- (3) Peso total concernido en el proceso de metanol-acetona.
- (4) Peso de C aportado por el metanol.
- (5) Peso de C absorbido por la superficie.
- (6) Duración de la cementación h.
- (7) Peso de carbón, kilos.

Comparación de los pesos de C necesitados por la cementación de 40 m<sup>2</sup> de acero 15Cr Ni6 (0.15C -1.5Cr - 1.5Ni) por el método por instilación y por el método clásico. (Para la comparación detallada de las entradas y salidas, ver la tabla siguiente).

ENTRADAS Y SALIDAS LUEGO DE LA CEMENTACION DE UNA SUPERFICIE GRANDE. (1)

Entradas/salidas	Gas endotérmico	Metanol-acetona
<b>Entradas</b>		
Gas portador.....	145 m <sup>3</sup>	-----
Gas natural.....	7.5 m <sup>3</sup>	-----
Metanol.....	-----	6.4 kg.
Acetona.....	-----	11 kg.
Carbón total concernido.....	20 kg.	9 kg.
Duración de la cementación.....	25 h 45 mn	24 h
<b>Salidas</b>		
Carbón absorbido por la superficie.....	3.9 kg	3.9 kg
H <sub>2</sub> .....	73 m <sup>3</sup>	21 m <sup>3</sup>
CO.....	29 m <sup>3</sup>	8.7 m <sup>3</sup>
H <sub>2</sub> + CO.....	102 m <sup>3</sup>	30 m <sup>3</sup>
Aire de combustión necesario.....	255 m <sup>3</sup>	75 m <sup>3</sup>
Calor de combustión perdido.....	1231 MJ	363 MJ

(1) Superficie de 40 m<sup>2</sup> con cementación a 920°C sobre una profundidad de 2.5 mm, o sea 0,30% de C; acero 15Cr Ni6 a 0,15 C - 1.5 Cr - 1.5 Ni.



f) Empleo de nitrógeno y de amoníaco en el proceso por instilación.

Se puede también combinar el proceso CARBOMAAG con el empleo de nitrógeno (100% de  $N_2$  para el templado o el recocido brillante) o amoníaco, para la carbonitruración.

El añadido de nitrógeno para la cementación constituirá normalmente una complicación inútil con un retorno a ciertos inconvenientes asociados al proceso con gas endotérmico. Sin embargo cuando se emplearon temperaturas bajas de templado (por debajo de  $840^\circ C$ ) con un potencial C regulado, es necesario prever una dilución de nitrógeno para abatir los puntos de rocío muy elevados que son exigidos por las mezclas no diluidas  $H_2$ -CO producidos por el metanol. Esto es especialmente cierto en el caso de que el gas debe estar en equilibrio con el carbono, en ciertos aceros bajos en carbono.

En el caso antes citado, es primordial tener una regulación precisa de los flujos de aporte de los líquidos orgánicos y de nitrógeno gaseoso si se desea mantener constante la composición del gas.

3) EVALUACION DE GASES PORTADORES DE CEMENTACION.

El análisis racional del mecanismo de cementación gaseosa permite definir las características que se exigen del gas portador. De esto resulta que un gas exotérmico rico constituye actualmente la mejor fórmula de reemplazo del gas endotérmico. Una serie de pruebas a escala del laboratorio o de

la producción ha demostrado la debilidad del proceso.

a) Introducción.

En el curso de los últimos años ha habido un considerable interés en diversos gases susceptibles de reemplazar el gas endotérmico como gas portador para la cementación gaseosa. La fabricación del gas endotérmico es un proceso que por un lado exige energía relativamente apreciable y por el otro la elevación continua del precio de combustibles en valor real, ha dado un nuevo impulso a esas investigaciones. En general, para esas atmósferas alternativas se han dedicado esfuerzos para utilizar los gases que entran en el horno y que no habiendo reaccionado, se cuenta con el horno mismo para producir las condiciones requeridas para la cementación.

Parece entonces interesante evaluar las características requeridas por un gas portador de cementación, a fin de formular criterios claros que permitan juzgar una alternativa cualquiera del gas endotérmico. Las siguientes preguntas se hacen entonces: ¿Cuales son las diversas reacciones de cementación y sus importancias relativas?, ¿Cual es el papel de cada uno de los constituyentes de una atmósfera de cementación controlada? ¿Cual es la importancia del metano que no ha reaccionado? ¿Cuales son los límites a partir de los que es razonable pensar que un horno desencadenará las reacciones necesarias?

Muchas de las respuestas a esas preguntas pueden ser de un análisis racional y las pruebas prácticas necesarias para de-

mostrar la validéz de la teoría son cortas y directas. En consecuencia, en la primera parte de este inciso se presentan las bases teóricas, y en la segunda, algunos de los numerosos resultados obtenidos luego de pruebas a escala de laboratorio.

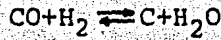
b) Reacción de carburación y de descarburación.

Existen esencialmente 3 reacciones que son capaces de transferir el carbono de la atmósfera al acero:



Las dos primeras son reacciones reversibles, ya que la reacción del metano no progresa más que de izquierda a derecha dentro de las condiciones encontradas en cementación. Es verdad que el hidrógeno puede descarburar, no así para el inverso de la reacción (3) sino por combinación con el oxígeno atmosférico seguido del inverso de la reacción (1). Un trabajo reciente de Kasperma y Jhay (A) en Air Products y Chemicals Inc. ha buscado determinar el papel relativo de cada una de estas reacciones a 925°C. Algunos de los resultados obtenidos figuran en la tabla de la siguiente página bajo la forma de las velocidades de reacción. La reacción más rápida es aquélla de la mezcla de  $\text{CO} + \text{H}_2$  teniendo la composición del gas endotérmico. Su velocidad de reacción es 9 veces más rápida que una velocidad de difusión en un metal típico.

## VELOCIDAD DE REACCION A 925°C DE LAS REACCIONES:



ATMOSFERA	VELOCIDAD DE REACCION SOBRE UNA MUESTRA DE ACERO EN $10^{-6}$ mol/cm <sup>2</sup> min	
	$\rightleftharpoons$	$\rightarrow$
20% CO 40% H <sub>2</sub>	9,4	
20% CH <sub>4</sub> 40% H <sub>2</sub>		4,1
10% CH <sub>4</sub> 40% H <sub>2</sub>		2,35
10% CO 20% H <sub>2</sub>	2,3	
10% CH <sub>4</sub> 20% H <sub>2</sub>		1,85
5% CH <sub>4</sub> 40% H <sub>2</sub>		1,23
5% CO 20% H <sub>2</sub>	1,2	
3% CH <sub>4</sub> 40% H <sub>2</sub>		0,65
20% CO	0,1	

\*Las velocidades de difusión en un metal están comprendidas entre 0,3 y 3:  $10^{-6}$  mol/cm<sup>2</sup> min, en general 1.  $10^{-6}$  mol/cm<sup>2</sup> min. Valores correspondientes a una proporción en carbono en el acero de 1%.

Es interesante notar que la reacción de CO tiene una velocidad mucho más lenta que la velocidad de difusión más lenta en un metal, incluso para una concentración de 20% CO. El punto importante es que la velocidad de reacción del metano se sitúa en general entre las velocidades de equilibrio de las dos otras reacciones, con 20% CH<sub>4</sub> y 40% H<sub>2</sub>

(presiones parciales encontradas en un horno de cementación bajo vacío), las velocidades de reacción son capaces de sostener una difusión rápida del carbono y de altas proporciones en carbono en la superficie cuando se realizan con 3%  $\text{CH}_4$  y 40%  $\text{H}_2$  (concentraciones típicas de la atmósfera controlada de un horno de templado con recipiente incorporado), la velocidad de reacción del metano es 15 veces más lenta que la velocidad de equilibrio de  $\text{CO}+\text{H}_2$ .

Es necesario comprender que estas velocidades elevadas no significan que la cementación es más y más rápida porque se trata de una reacción reversible y que en esas condiciones de equilibrio real, se tiene un número igual de reacciones de descarburación. En el caso práctico de la superficie de un metal en equilibrio con el potencial de carbono de una atmósfera proveniente de un gas endotérmico se tendrá  $9,4 \times 10^{-6}$  mol/cm<sup>2</sup> min. de reacciones de carburación y de descarburación se producirán en el mismo tiempo. Para que el gradiente de carbono en el acero sea de  $0,65 \times 10^{-6}$  mol/cm<sup>2</sup> min., será necesario 3%  $\text{CH}_4$  para mantener con certeza ese flujo de carbono.

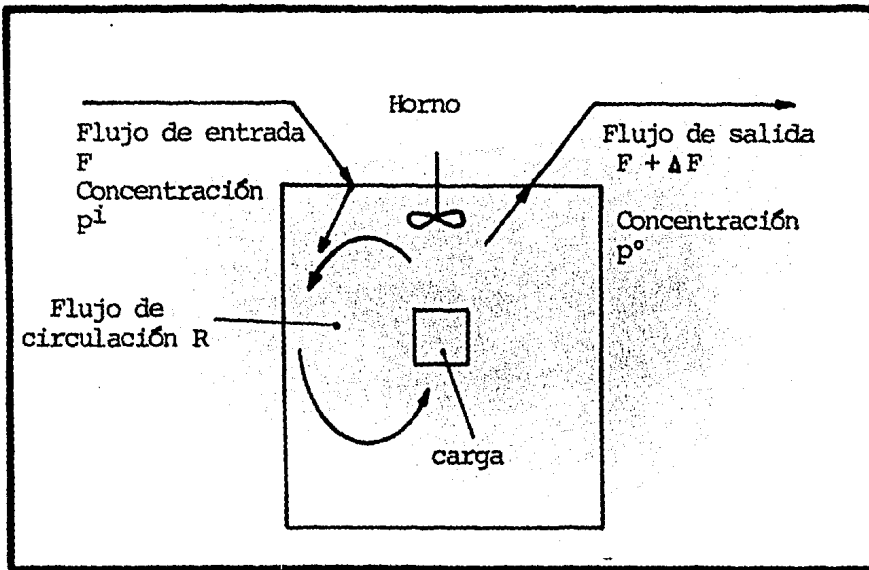
Todo aquí está en relación con la uniformidad de la cementación en atmósfera controlada. Es esencial para tener una buena uniformidad de la capa endurecida que las velocidades de las reacciones reversibles sean elevadas, esto supone, de hecho, fuertes concentraciones en  $\text{CO}$  y  $\text{H}_2$ , que deben ser

elevadas en relación simultánea con la velocidad de difusión requerida en el metal y la velocidad de reacción del carbono fuera de equilibrio proveniente de  $\text{CH}_4$  a fin de asegurar una alimentación adecuada en carbono "de equilibrio". Esto ha sido confirmado, por los autores en el curso de pruebas sobre la dilución de nitrógeno en un gas endotérmico. Para menos del 10% de CO la uniformidad de la capa endurecida se deteriora notablemente. Prácticamente esto significa que el producto de las presiones parciales de CO y  $\text{H}_2$  en el horno no debe ser inferior a  $0,02 \text{ bar}^2$  ( $0,02 \text{ atm}^2$ ), pero cuando ese producto sobrepasa  $0,04 \text{ bar}^2$  ( $0,04 \text{ atm}^2$ ) se vuelve difícil detectar mejoramientos o cambios en la uniformidad (\*).

c) Relación entre la atmósfera entrante en el horno y la atmósfera dentro del horno.

Hasta aquí hemos considerado sólo la atmósfera entrante al horno ¿Cuál es su relación con la atmósfera dentro del horno? Cada horno de cementación contiene un ventilador de gran rapidéz que sirve para agitar la atmósfera. Esto crea en interior del horno un flujo "R" de gas que pasa a través de la carga y sobre los tubos radiantes como se muestra en la figura de la siguiente página. "R" es al menos 100 veces superior al flujo "F" de entrada en el horno. Todas las reacciones químicas dependen de las concentraciones de los productos en reacción y para un constituyente particular de la atmósfera, eso significa que hay 3 presiones parcia-

(\*)En la tabla de la página 130 se muestra que para esta concentración la velocidad de reacción es del orden de las velocidades de difusión en los metales.



Representación simplificada de la influencia de la mezcla de entrada sobre la composición de la atmósfera interna del horno.

les diferentes que tienen interés:

- $p'$ , la concentración a la entrada del horno. Es interesante hacer notar que en todas las instalaciones prácticas de cementación, la atmósfera de entrada no ha reaccionado completamente.

- $p^o$ , la concentración de salida después de la reacción.

- $P$ , una concentración intermedia en el horno que está en función de  $p'$  y de  $p^o$  esta localizada justamente después de la entrada en el horno del gas entrante.

La relación entre ellas es la siguiente:

$$P = p^o + p' (F/R)$$

y establece los siguientes resultados:

-La composición de entrada no se encuentra en ninguna parte del horno y es un hecho que ninguna reacción química depende

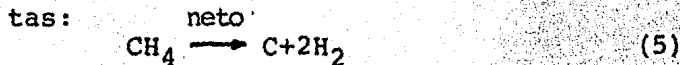
fundamentalmente de ella.

-La atmósfera entrante es primero diluida a una concentración  $p$  que es prácticamente la misma que  $p^\circ$  porque  $F/R$  es inferior a 0,01.

-Después de la dilución, el constituyente reacciona en el curso de su circulación en el horno y toma la concentración  $p^\circ$ .

No obstante que esto que precede sea un modelo cualquiera un poco simplificado, nos permite ver claramente los factores fundamentales ligando las composiciones de entrada y del interior del horno.

Para el conjunto del horno no hay más que 3 reacciones netas:



Hemos indicado ya que la diferencia entre  $P$  y  $p^\circ$  depende del producto de  $p'$  por  $F$ , flujo del constituyente

reaccionante. Es claro también que los valores absolutos de  $P$  y de  $p^\circ$  deben ser determinados por la velocidad de reacción requerida, que es también función del flujo de entrada ( $B$ ) de la concentración de  $\text{CH}_4$  en el horno y de la desviación de equilibrio de las concentraciones de  $\text{CO}_2$  y de  $\text{H}_2\text{O}$  en el horno deben ser probablemente dependientes esenciales también de los flujos de entrada y no de sus concentraciones.

Así concluimos de todo esto que la composición de la atmós-



fera del horno no depende fundamentalmente de la composición de entrada sino más bien del flujo de entrada de los constituyentes reaccionantes.

Esta idea es esencialmente para comprender el empleo de los gases portadores de reemplazo, porque ella permite un enlace entre el suministro y la composición. Un gas endotérmico conteniendo 1,5% de descarburantes para un suministro de 100 volúmenes/h puede ser reemplazado por un gas portador producido con la ayuda de una relación aire/combustible más débil a fin de obtener un suministro de 50 volúmenes/h con 3% de descarburantes. Si se mantiene el mismo suministro de  $\text{CH}_4$  de enriquecimiento (y por tanto una concentración 2 veces más fuerte), las 2 atmósferas del horno serán prácticamente las mismas bajo todos los conceptos se comprende ahí la concentración en  $\text{CH}_4$  en el horno.

Se notará que en general es indispensable reducir el suministro con gases portadores menos ricos. La alternativa es aumentar el flujo (en  $\text{CH}_4$ ) de enriquecimiento. Pero se puede esperar a que haya un límite en la velocidad a la que las reacciones pueden producirse durante o mientras transcurre el tiempo de permanencia dentro del horno.

d) Propiedades requeridas de un gas portador de cementación.

Somos ahora capaces de resumir todas las propiedades esenciales de un buen gas portador de cementación bajo una atmósfera controlada:

1. La composición de la atmósfera de entrada no es funda-

mentalmente importante: Como la atmósfera de entrada es primero diluida y sólo enseguida reacciona, éstos son los flujos de los constituyentes de entrada que tienen la importancia fundamental.

2- El flujo de entrada de los descarburantes debe ser también lo más débil posible. Esto asegura el mejor acercamiento del equilibrio, la obtención de potenciales de carbono elevados y una débil concentración de  $\text{CH}_4$  en el horno. Este último factor reducirá la formación de hollín en el horno y el suministro de carbono al acero "fuera de equilibrio". Ciertamente debe ser posible operar con menos de 5% de  $\text{CH}_4$  residual.

3- Es claro que es ventajoso, pero no indispensable, tener altas proporciones de  $\text{CO}$  y  $\text{H}_2$  en el gas portador. Esto permitirá el empleo de flujos fuertes de gas portador. En todo caso es esencial que las concentraciones resultantes de  $\text{CO}$  y  $\text{H}_2$  en el horno sean tales que el producto de sus presiones parciales sea superior a  $0,02 \text{ bar}^2$  ( $0,02 \text{ atm}^2$ ) y de preferencia menor a  $0,04 \text{ bar}^2$  ( $0,04 \text{ atm}^2$ ).

A la luz de estos criterios, es claro que pueden existir alternativas al gas endotérmico, según las posibilidades del horno para trabajar con flujos débiles. El aire es uno de esos gases portadores alternativos para el enriquecimiento de hidrocarburo, como lo han sugerido recientemente unos autores. (C,D)

Es claro que uno de los principales intereses en el empleo de aire es el aspecto financiero. Pero su proporción en descarbonantes es naturalmente de alrededor del 21% de oxígeno. A su entrada al horno, como ya hemos visto, este oxígeno será severamente diluido por una corriente de CO y H<sub>2</sub> con la que reaccionará inmediatamente para formar 42 volúmenes de (CO+H<sub>2</sub>O) por 100 volúmenes de gas portador de entrada.

En comparación con un gas endotérmico que contenga 1,5% (CO+H<sub>2</sub>O), es claro que es necesario una reducción muy importante del flujo de gas portador si el segundo de los criterios anteriormente descritos es respetado. Por otra parte, tal sistema no contribuye en nada a hacer entrar CO y H<sub>2</sub>. Aunque esto no sea esencial como lo indica el tercer criterio, si la totalidad de CO es creada por reacciones en el horno, su concentración variará considerablemente con las variaciones del potencial de carbono. Este hecho ha sido constatado.

Aunque el manual de metales (E), indica que las atmósferas exotérmicas no combienen como gases portadores de cementación, se ha concluido del análisis precedente que la mejor alternativa próxima al gas endotérmico debe ser un gas exotérmico. Se obtendrá con él considerables ahorros de dinero y de energía y un estudio anterior (F)\* ha mostrado que conviene igualmente para la carbonitruración, lo que permite efectuar con él to-

da una serie de tratamientos.

e) Gases portadores exotérmicos.

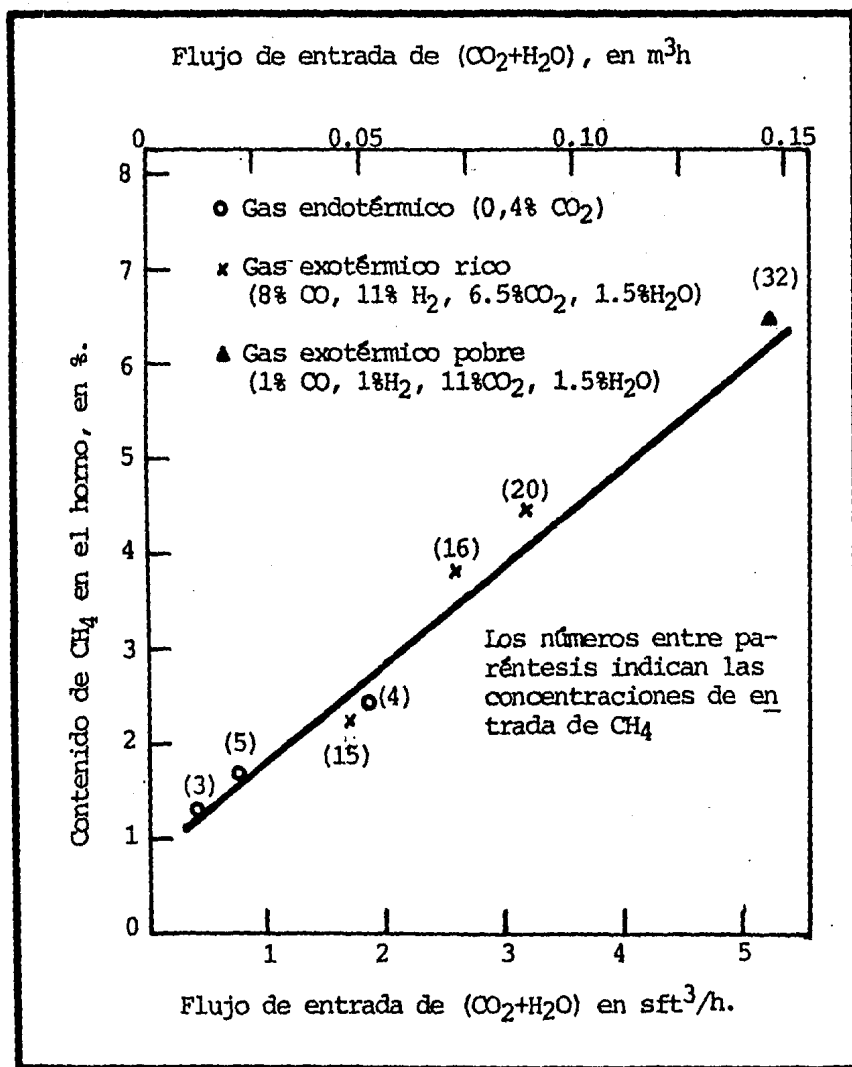
Mucho más de 100 pruebas se han efectuado con un gas portador exotérmico, sobre cargas, con la ayuda de un horno Ipsen RT 25 con cámara de  $0,11 \text{ m}^3$ . Un horno tan pequeño impone grandes exigencias a la atmósfera del horno porque los tiempos de permanencia son cortos. Queda claro pues, que esto sería una prueba severa de las posibilidades del nuevo sistema. Los objetivos de esas pruebas eran:

- 1) Estudiar la composición de la atmósfera a la luz de los parámetros ya discutidos;
- 2) Asegurar que el potencial de carbono de la atmósfera es dirigida por técnicas automáticas;
- 3) Asegurar un resultado metalúrgico que satisfaga los puntos de vista de profundidad de capa endurecida, de la uniformidad y velocidad de cementación.

La composición del gas exotérmico rico utilizado, con una relación aire/gas natural de 6,5:1 era de 8% CO, 11% H<sub>2</sub>, 6,5% CO<sub>2</sub>, 1,5% H<sub>2</sub>O ( punto de rocío de +13°C), el resto N<sub>2</sub>.

La figura de la siguiente página muestra la variación de la proporción en CH<sub>4</sub> en el horno en función del flujo de entrada de descarburantes. Todas las pruebas fueron reguladas con un potencial de carbono de 1,05%C con una "carga standard". Los análisis han confirmado que todas

las pruebas han sido efectuadas con una precisión de  $\pm 0,05\%$  sobre ese potencial.



Relación entre el flujo de entrada de descarbonantes y la concentración en  $\text{CH}_4$  en el horno. Todas las pruebas han sido efectuadas con un potencial de carbono de  $1,05 \pm 0,05\%$ .

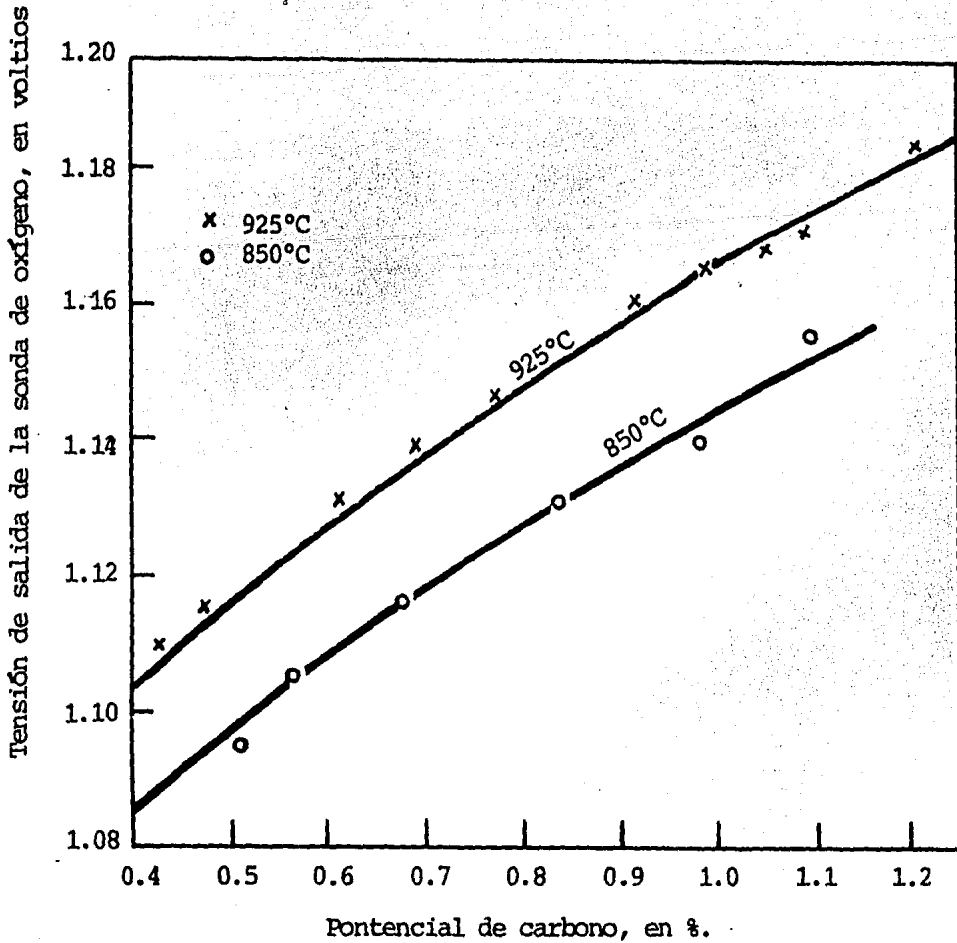
La figura lleva también algunos resultados obtenidos con un gas exotérmico pobre y destinados a mostrar claramente que la concentración en  $\text{CH}_4$  en el horno es determinada por el flujo de descarburantes y no por sus concentraciones. La concentración de entrada de  $\text{CH}_4$  esta indicada entre paréntesis. La línea trazada no pasa por el origen porque, como hemos señalado, una cierta cantidad de  $\text{CH}_4$  es necesaria para mantener con certeza un flujo de carbono.

Para obtener una atmósfera satisfactoria en el horno a partir de gases portadores menos ricos que un gas endotérmico, es necesario reducir el flujo. El horno RT 25 trabaja normalmente con un flujo de  $1,7 \text{ m}^3/\text{h}$ , pero se ha encontrado práctico reducirlo a  $0,6 \text{ m}^3/\text{h}$ .

En estas condiciones la composición del gas en el horno era en general 14-17%  $\text{CO}_2$ , 25-35%  $\text{H}_2$ , y 2-5%  $\text{CH}_4$ .

La proporción en CO en el horno era más elevada que los 8% iniciales en el gas portador en razón de la conversión de descarburantes en CO. Así, las concentraciones en CO y  $\text{H}_2$  en el horno son tales que aseguran una buena uniformidad de la capa endurecida y luego de pruebas a cargas plenas, no se ha detectado una variación notable de espesor de la capa endurecida.

La figura siguiente presenta los resultados de pruebas sobre las chapas en función de la tensión de salida de una sonda electrónica de oxígeno. Las líneas trazadas representan las curvas teóricas para 16% CO, de esto se extraen



Relación entre la tensión de salida de una sonda de oxígeno y el contenido de carbono de una lámina para un gas exotérmico enriquecido con gas natural.

2 conclusiones importantes tocando las posibilidades de atmósferas provenientes de gases exotérmicos. 1° la sonda de oxígeno indica el potencial de carbono con una gran precisión y en seguida se puede admitir una concentración constante en CO en el conjunto del dominio teniendo un interés práctico.

En la siguiente tabla se presentan los datos de un ensayo típico según un ciclo de cementación rápida-difusión. El resultado metalúrgico y la velocidad de cementación son los

TRATAMIENTO DE CEMENTACION EN UN HORNO DE  
LABORATORIO Ipsen RT 25 CON RECIPIENTE DE  
TEMPLADO INCORPORADO.

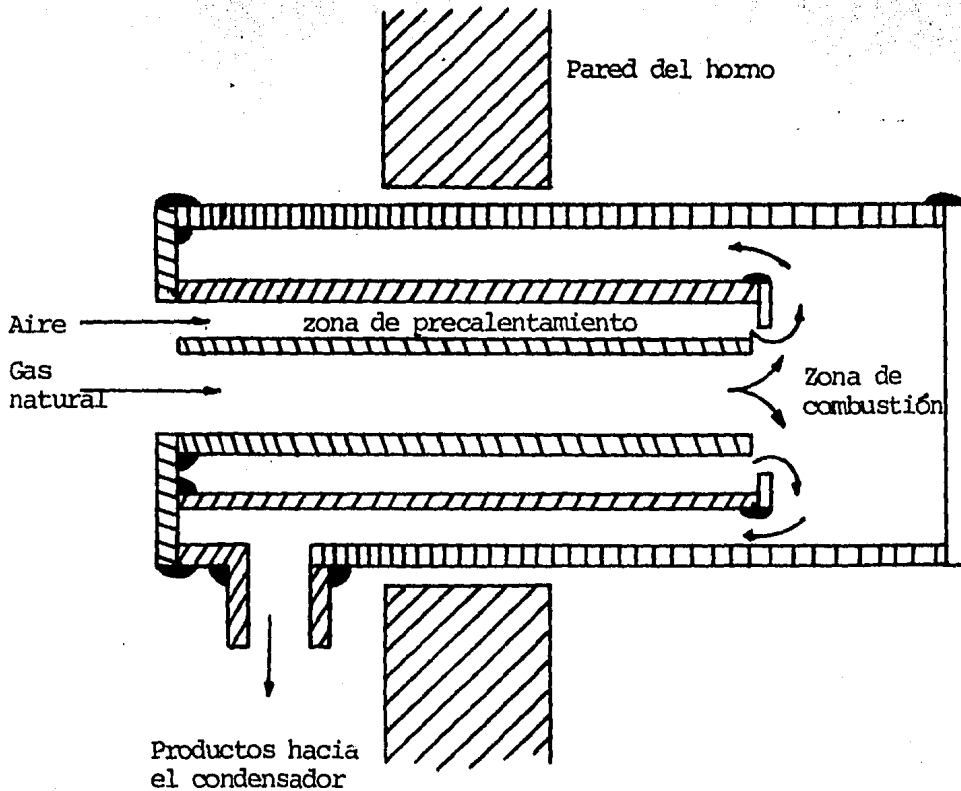
PARAMETRO	CEMENTACION RAPIDA	DIFUSION
Tiempo a 925°C,h	2 <sup>3</sup> / <sub>4</sub>	3 <sup>3</sup> / <sub>4</sub>
Potencial de carbono	1,2	0,75
Salida de la sonda de oxígeno,V	1,175	1,140
Gas portador	0,57 m <sup>3</sup> /h de gas exotérmico conteniendo 8% C, 11% H <sub>2</sub> y 6,5% CO <sub>2</sub> (I <sub>2</sub> )	
Adición	0,2 m <sup>3</sup> /h de gas natural durante el período de cementación rápida.	
Espesor de la capa endurecida hasta 550 HV.	0,8 mm (0,031 in)	

mismos que con un gas endotérmico. Los flujos de carburantes y de descarburantes son también, naturalmente, muy cercanos.

Un programa de pruebas basado sobre estos resultados ha sido establecido para un horno con recipiente de templado incorporado de 0,25 m<sup>3</sup> trabajando en condiciones de producción. Es claro de lo que precede que el gas exotérmico lo más rico posible permitirá usar el flujo más elevado posible de gas portador para el enriquecimiento de hidrocarburos. Se ha estimado que en condiciones de producción, esto será una característica interesante, permite una buena eliminación del aire y una muy grande uniformidad de la concentración de CO en el horno. Se ha construido



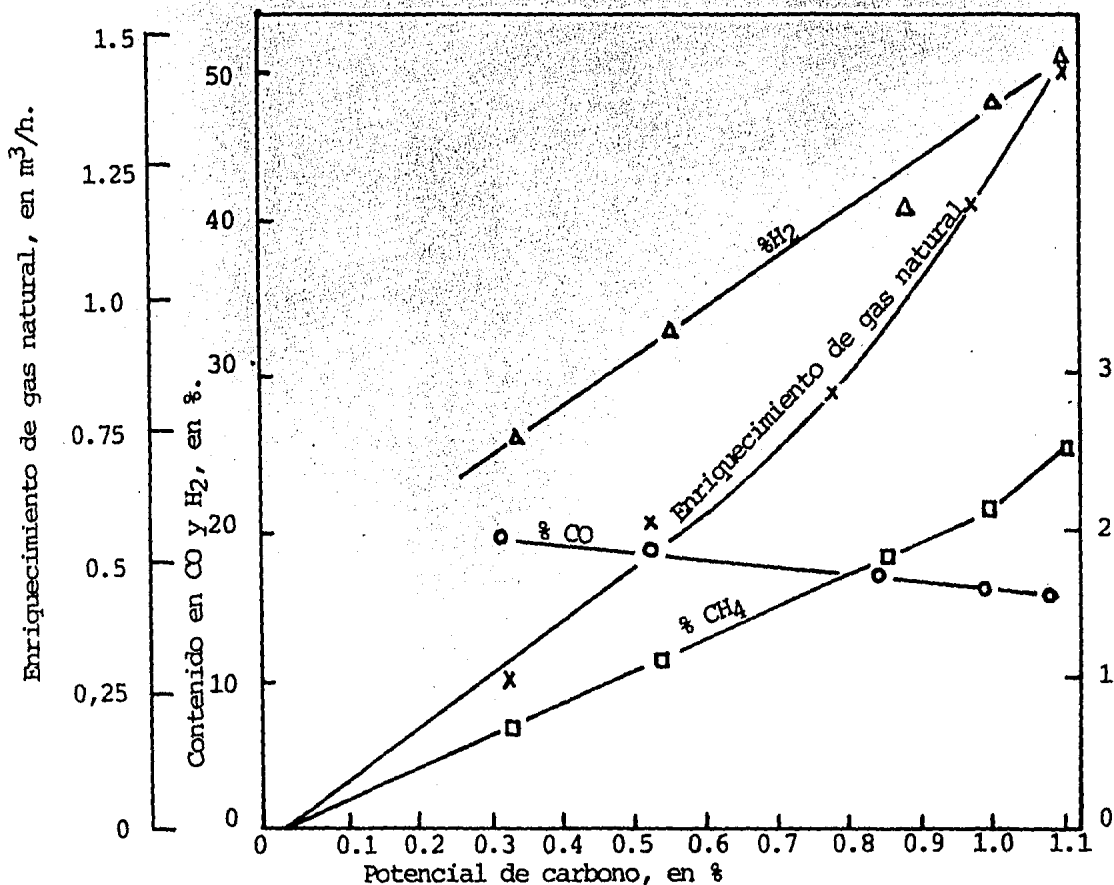
un generador de gas exotérmico especialmente concebido para este fin, destinado a ser colocado sobre el horno y capaz de precalentar el aire antes de la combustión. Como este generador debe trabajar en un medio a la temperatura del horno, la pérdida de calor por radiación será mínima. Esto ha permitido producir un gas exotérmico con una relación aire/gas natural de 4,5:1. La figura muestra el esquema del aparato. La atmósfera resultante después



Esquema del generador de gas portador exotérmico.

del enfriamiento con agua contiene 13%  $\text{CO}$ , 22%  $\text{H}_2$ , 3,5%  $\text{CO}_2$  un punto de rocío de  $+20^\circ\text{C}$  y el resto de  $\text{N}_2$ .

Con este sistema se han efectuado carbonitruraciones y cementaciones entre 820 y 925°C con duraciones de ciclo que va de 20 minutos a 5 horas. En la figura se muestra cómo



Parámetros de una atmósfera para una cementación a 925°C en un horno de recipiente de templado incorporado de 0,25 m<sup>3</sup> utilizando un flujo de 3,7 m<sup>3</sup>/h de gas portador exotérmico producido con una relación aire/gas natural de 4,5:1.

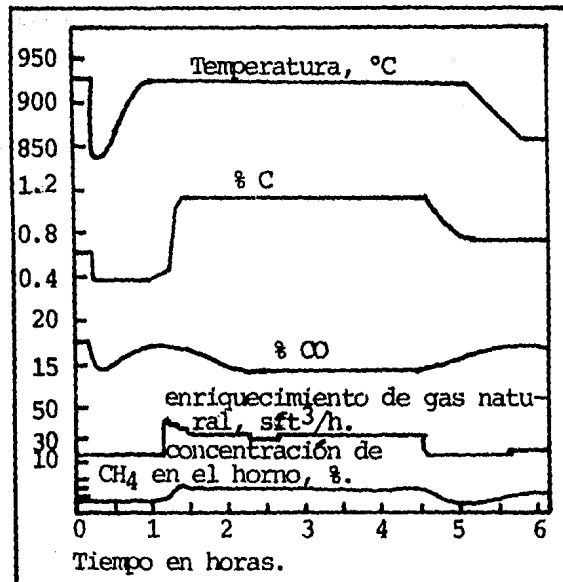
en el caso de una cementación a 925°C, la composición de la atmósfera del horno y el flujo de gas natural de enri-

quecimiento varía en función del potencial de carbono para condiciones de carga clásica. Se pueden extraer las conclusiones siguientes de esos resultados:

- 1° De nuevo, es posible admitir un nivel constante de 16% de CO para casos prácticos de cementación.
- 2° El nivel de  $\text{CH}_4$  residual es en general de 1-2%, lo que está de acuerdo con la práctica de gases endotérmicos. Es un poco más barato que dentro del horno RT 25 porque el volumen de la cámara y los recorridos de circulación de los gases son más grandes.
- 3° La concentración de hidrógeno es en general de 40-50%, esto es más que suficiente para una buena uniformidad de la capa endurecida. Aquí también es más elevada que aquella que se encuentra dentro del horno RT 25.
- 4° Como en la práctica del gas endotérmico, existe una fuerte correlación entre el potencial de carbono y el flujo de gas de enriquecimiento. No es, pues, obligatorio emplear técnicas de regulación automática. Es interesante notar que para los flujos de gas de enriquecimiento superiores a  $1,13 \text{ m}^3/\text{h}$ , se encuentra un límite del horno desde el punto de vista de reacción. Se admite que la sección lineal de la curva del flujo de gas de enriquecimiento, las reacciones entre  $\text{CH}_4$ - $\text{CO}_2$ - $\text{H}_2\text{O}$  se producen en la fase gaseosa. En el horno y a la medida que la velocidad requerida de reacción de  $\text{CH}_4$  aumenta y que las concentraciones de  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$  disminuyen, las

reacciones no tienen tiempo de producirse en la fase gaseosa durante el tiempo de permanencia en el horno y la reacción debe continuarse por una descomposición catalítica que produce carbono seguida de recombinación con  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ .

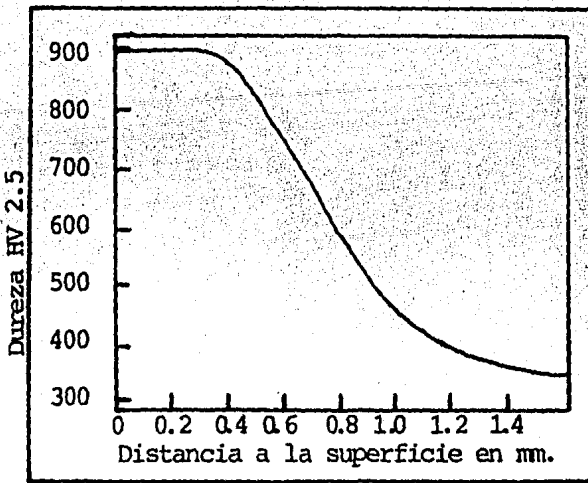
Las figuras siguientes muestran comportamientos típicos



Tratamiento típico de cementación rápida/difusión con un flujo de  $3,1 \text{ m}^3/\text{h}$  de gas portador exotérmico producido con una relación aire/gas natural de 4,5:1. (Peso de la carga: 55 Kg de acero débilmente aleado).

cos de un tratamiento de cementación de ciclo de cementación rápida-difusión, que permite también las conclusiones siguientes:

- 5° La respuesta a una variación de potencial de carbono es muy rápida.
- 6° La velocidad de cementación está en todo caso en relación con aquella de la práctica clásica.



Perfil de la dureza debida al carbono con el tratamiento de cementación descrito en la figura anterior.

El flujo de gas entrante en el horno para las condiciones de cementación es típicamente de  $4,25 \text{ m}^3/\text{h}$ . El vestíbulo del horno era sometido a una "sobrepurga" de nitrógeno cada vez que se abría la puerta del horno a fin de obtener una represurización suficientemente rápida del horno sin reducción de la seguridad de las operaciones.

Es siempre difícil comparar los costos y los consumos de energía entre un gas endotérmico y gases portadores de reemplazo porque, por las razones que hemos indicado, es siempre necesario reducir el flujo tan luego como el gas portador se convierte más descarburante.

Pero es claro que el proceso descrito permite tener el flujo lo más elevado posible en el reemplazo del gas endotérmico, haciendo pasar la relación aire/combusti-

ble de 2,5:1 a 4,5:1 y evitando tener un gas de calentamiento para una reacción adicional.

Los consumos de energía para la cementación por este gas así como con un gas endotérmico clásico están indicados en la siguiente tabla así como sus costos relativos, aunque no están comprendidos los problemas locales particulares de con-

CONSUMOS DE ENERGIA Y COSTOS COMPARADOS DE DIVERSOS SISTEMAS DE ATMOSFERAS PARA UN HORNO DE RECIPIENTE DE TEMPLADO INCORPORADO DE 0,25 m<sup>3</sup>.

SISTEMA	Consumo de energía therm/h (*)	Costo relativo
9,3 m <sup>3</sup> /h de gas endotérmico +0,65 m <sup>3</sup> /h de gas natural de enriquecimiento, 10,4 m <sup>3</sup> /h de gas saliente del horno. Alguna sobrepurga requerida	1,4	100
5,2 m <sup>3</sup> /h de gas endotérmico +0,33 m <sup>3</sup> /h de gas natural de enriquecimiento; 5,7 m <sup>3</sup> /h de gas saliente del horno. Sobrepurga requerida.	0,77	70
3,5 m <sup>3</sup> /h de gas exotérmico +1,05 m <sup>3</sup> /h de gas natural de enriquecimiento, 5,7 m <sup>3</sup> /h de gas saliente del horno. Sobrepurga requerida.	0,57	45

(\*) 1 therm = 10<sup>5</sup> B.T.U = 25,2 Kcal.

servación y otros casos especiales. Para un horno típico de recipiente de templado incorporado de 0,25 m<sup>3</sup>, es posible economizar anualmente 1000 - 2000 libras.

f) Conclusiones.

1° Las exigencias para un gas portador son:

- a) Que deben tener un débil flujo de descarburantes;
- b) y, se obtienen concentraciones llevadas de CO y H<sub>2</sub> en el horno.

2° En tanto que la alternativa de un gas endotérmico a un gas exotérmico rico da el flujo más elevado posible de todas las alternativas. Se ha mostrado que un generador especialmente concebido para este fin, adaptable al horno y exigiendo una alimentación de aire y gas que no ha reaccionado todavía, produce un gas exotérmico derivado del gas natural para una relación aire/combustible de 4,5/1.

3° Las pruebas en los hornos de laboratorio y de producción han mostrado que atendiendo a que el horno permite trabajar con un flujo la mitad de aquél de un gas endotérmico normal y atendiendo a que se puede efectuar una purga auxiliar, los gases portadores exotérmicos dan: una concentración de CO en el horno prácticamente constante de 16%, concentraciones de hidrógeno de 40-50%, débiles concentraciones de CH<sub>4</sub>, una buena aptitud a la regulación y una buena uniformidad de los resultados. Se tienen también ganancias de dinero y de energía muy interesantes.

- NOTAS: (A) Kasparsma, J.H. y Shay, R.H. Cementación del hierro por mezclas a base de CO en el nitrógeno a 925°C. Transacciones Metalúrgicas, marzo, 1981, vol. 128, N° 1, 77-83.
- (B) Paterson, A.J.F.- Empleo eficaz de atmósferas en los hornos de cementación. Exposición presentada en el simposio sobre los hornos 1980. "Tratamientos térmicos-una visión nueva de economías de energía"-11-12 de noviembre 1980, Birmingham, organizado por "Metalurgia".
- (C) Göhring W. y Lutien C.H.-Generación y regulación directas de la atmósfera de hornos de tratamiento térmico.-Tratamiento térmico de metales, 1980 4, vol 1, 79-82.
- (D) Stickels, A.C. y Mack, C.M.- Cementación gaseosa

del acero con la ayuda de atmósferas de horno formados in situ a partir de propano y de aire. Exposición presentada en el 5<sup>a</sup> congreso ASM tratamientos térmicos/seminario. 6-8 de mayo 1980, Detroit (confrontar:tratamiento térmico de metales, 1980,3,vol.7,56).

- (E) Manual de metales, vol.2,8<sup>a</sup> edición,Sociedad Americana para Metales, 1964.
- (F) Sawes C., Tranter D.F y Smith C.G.-Nitruración de piezas de acero no aleado-Tratamiento térmico de metales,1980, vol.7, 1-4.

\* De la redacción (E) ver igualmente la nueva edición de reciente publicación. Manual de metales, vol.4.Tratamiento Térmico, nov. 1981, p.136.



## VI. CAPA CEMENTADA

### 1) ESTUDIO DEL EFECTO DE ALGUNAS VARIABLES EN EL PROCESO DE CARBURACION.

La importancia de la relación existente entre la estructura y las propiedades de empleo, es bien conocida en la práctica y constituye el objeto de indicaciones precisas en los pliegos de condiciones. Desgraciadamente éstas no están siempre adaptadas al objetivo buscado a causa de la falta de datos en el control.

Una encuesta bibliográfica nos ha permitido precisar la influencia de parámetros microestructurales sobre las propiedades mecánicas de las piezas cementadas, en particular sobre la resistencia a la fatiga, la fatiga superficial y el desgaste.

La utilización de estos datos no es entonces posible más que si se posee el dominio de la obtención de la microestructura en un amplio sentido.

En la primera parte, vamos a mostrar en el caso de la cementación seguida de un templado directo, que se puede prever cuantitativamente esta microestructura, en casi su totalidad, si se conoce la sección de carbono de la capa cementada.

En una segunda parte presentamos una aproximación semi-empírica que permite evaluar simplemente esa sección con precisión, en función de condiciones de tratamiento, en el caso

bastante general de una cementación seguida de una difusión, ( 2 etapas).

El conjunto de estas aproximaciones ha sido realizado con el cuidado constante de proporcionar al practicante los medios a la vez precisos y simples de la puesta en obra permitiendo el control de la microestructura en vista de los objetivos buscados.

## 2) RELACION ENTRE PROPIEDADES DE EMPLEO Y ESTRUCTURA DE PIEZAS CEMENTADAS.

Teniendo en cuenta el importante papel de las superficies de piezas mecánicas (las propiedades de la superficie condicionan la proporción de las piezas en rozamiento, desgaste y fatiga); se busca a menudo lograr capas superficiales de propiedades particulares (especialmente de dureza elevada) apoyándose sobre un núcleo tenaz , ( por lo tanto menos -- duro) dando a la pieza en su conjunto una combinación excepcional de propiedades ( resistencia al rozamiento, al desgaste, a la fatiga y tenacidad).

Se encontrará en mecánica, frecuentemente, la microestructura siguiente:

-Una capa superficial presentando, en general, una dureza elevada ( $\sim 700\text{Hv}$  o más) en la que el material es sometido a tensiones residuales de compresión importante (varias centenas de MPa). El espesor de esta capa puede variar de  $1/10$  a varios milímetros.

-Un núcleo que constituye la parte restante de la pieza de dureza más baja, (inferior en general a 400HV).

Luego de la cementación el carbono que se introduce a la superficie de piezas cementadas tiene la propiedad de aumentar en manera considerable la dureza de la estructura martensítica (típicamente 35-62HRC). Por otra parte las variaciones de volúmen asociados a la transformación de la capa cementada provocan la aparición de tensiones residuales de compresión, (ver inciso 3.f) y por consiguiente, la microestructura de la capa cementada corresponde en primera aproximación a la estructura ideal descrita anteriormente.

En la práctica en el estado martensítico cierto número de otros constituyentes pueden estar presentes en las capas cementadas éstos son esencialmente:

- La perlita y la bainita cuya presencia en la superficie se debe a un mecanismo llamado oxidación interna.
- La cementita: constituyente cuyo dominio de existencia está provisto por el diagrama de equilibrio Hierro-Carbono (ver anexo 2).
- La austenita residual de constitución blanda ( $\sim 150$ HV) cuya presencia se debe esencialmente a la acción del carbono que reporta sobre las bajas temperaturas el inicio de la transformación martensítica y que así permite conservar una cierta cantidad de austenita no transformada después del enfriamiento al ambiente.

La proporción de estas diferentes fases intervendrá eviden-

PARAMETROS	DUREZA H	FATIGA	FATIGA SUPERFICIAL	ESFUERZO DE FISURACION (FRACTURA)
<p>Esesor tratamiento g</p>	<p>Ladureza es por convención superior a 550 HV sobre todo esesor tratado. Puede alcanzar unos valores de superficie de 700 a 900 HV.</p>	<p>g debe ser superior a una profundidad función de: las tensiones aplicadas, de la resistencia del núcleo, del tamaño de la pieza. <math>\sigma_f</math> parece máxima por la relación:</p> <p><math>\sigma_f</math> cementada <math>\sim 0,06</math> a <math>0,07</math> espesor de la pieza</p> <p>Relación determinada sobre una probeta en flexión rotativa. A partir de DAWES y COOKSEY (0,08), TRUSCHER (0,014 a 0,21), WEIGAND y TOLASH (0,07 a 0,075). La gran dispersión de los resultados puede ser atribuida a las tensiones residuales, a la resistencia del núcleo y a la oxidación interna, que varía de una prueba a otra. Parece que el valor óptimo de la relación esesor cementado/esesor de la pieza, conduce valores de <math>\sigma_f</math> máximo, sea de 0,06 a 0,07 para una resistencia del núcleo de 1080 N/mm<sup>2</sup></p>	<p><math>\sigma_f</math> mínimo debe ser superior a la profundidad de la zona de cisallamiento máximo (<math>\sigma_{f1}</math>)</p> <p><math>\sigma_f \sim 2 (\sigma_{f1})</math></p>	<p>Disminuye cuando la profundidad cementada aumenta.</p> <p>El esfuerzo de fractura depende de numerosos parámetros: naturaleza del acero de base, profundidad cementada.</p> <p>El esfuerzo de fractura medido sobre probetas cementadas puede variar de 30 000 a 50 000 N. Los parámetros que conducen a un esfuerzo de fractura elevado son los siguientes:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>* Contenido en níquel del acero de base: el aumento en el contenido de níquel es favorable.</li> <li>* Sentido de las fibras: sentido longitudinal en relación al sentido transversal.</li> <li>* Baja profundidad de cementación.</li> <li>* Temple al aceite caliente (80°C, 160°C).</li> <li>* Revenido después de cementación-templado.</li> </ul>
<p>Resistencia del núcleo</p>	<p>--</p>	<p>Lo óptimo parece estar hacia 1080-1240 N/mm<sup>2</sup></p>	<p>Lo óptimo parece estar hacia 850-1080 N/mm<sup>2</sup></p>	<p>Disminuye cuando la resistencia del núcleo aumenta.</p>
<p>Estructura: 1) Austenita residual <math>\gamma_f</math></p>	<p>Si <math>\gamma_f</math> aumenta H disminuye</p>	<p><math>\gamma_f</math> desfavorable; tolerancia <math>\sim 25\%</math></p> <p>La influencia de la austenita residual en las capas cementadas sobre la tendencia a la fatiga es controvertida. Ciertos autores han encontrado un mejoramiento del límite de fatiga con el porcentaje de austenita residual para los contenidos comprendidos entre 10 y 30%. Otros trabajos han mostrado la influencia perjudicial de <math>\gamma_f</math> sobre <math>\sigma_f</math>.</p> <p>Los contenidos en <math>\gamma_f</math> de 80 a 85% provocan una baja de <math>\sigma_f</math> de 25 a 30% aproximadamente. A partir de esos resultados parece que los contenidos en austenita residual aceptables sean, según los autores, del orden de 15 a 25%, 6 20 a 30%.</p>	<p><math>\gamma_f</math> favorable, también para los contenidos de 50%</p> <p>Diferentes trabajos han mostrado que la austenita residual tiene una influencia favorable sobre el límite de fatiga en rodamiento o en rodamiento-deslizamiento.</p>	<p>Poca influencia.</p>
<p>2) Carburos</p>	<p>Poco sensible</p>	<p>- Si forman una red continua: <math>\sigma_f</math> disminuye. - Si son nodulares o parcialmente en red: poca influencia.</p> <p>La formación de una red continua de carburo provoca una disminución del límite de fatiga. La presencia de carburos finamente dispersados o de una red parcial de carburo no tiene no tiene influencia perjudicial.</p>	<p>En red o en nódulos, poca influencia o favorable.</p> <p>En el cuadro de la fatiga superficial, la presencia de carburo nodular parece favorable.</p>	<p>--</p>
<p>3) Oxidación interna</p>	<p>H disminuye</p>	<p><math>\sigma_f</math> disminuye cuando el esesor de la zona de oxidación interna aumenta.</p> <p>La caída de <math>\sigma_f</math> es proporcional al esesor de oxidación interna. Dicha caída es poco sensible para profundidades de 6 a 10 <math>\mu\text{m}</math> aproximadamente, para las profundidades de 13 <math>\mu\text{m}</math>, la reducción del límite de fatiga puede alcanzar 20 - 25% y 45% para una profundidad de 30 <math>\mu\text{m}</math>.</p>	<p>Poca influencia.</p>	<p>--</p>
<p>Enfriamiento.</p>	<p>Favorable</p>	<p>Desfavorable</p>	<p>Desfavorable.</p>	<p>Desfavorable</p>

temente sobre la repartición y sobre la intensidad de las tensiones residuales y de una manera más general sobre las propiedades de las piezas cementadas.

Las relación entre la estructura de las piezas cementadas y las propiedades mecánicas obtenidas para este tratamiento ha dado lugar a numerosas publicaciones. Así se muestra en la tabla I, que presenta la síntesis de los principales de estos estudios; las relaciones estructura-propiedades son relativamente bien conocidas. En el caso de la austenita residual, por ejemplo, se sabe para las solicitudes de fatiga, cada porcentaje de 30% de austenita hace caer el límite de fatiga (flexión, torsión) de alrededor de 10% aproximadamente; en cuanto a la fatiga superficial (rotamiento, deslizamiento) que constituyen una acción favorable hasta el 50% y es tolerable hasta el 80%.

La aparente precisión de estas tendencias generales debe de todas formas ser moderada, porque un cierto número de desconocidas tendencias subsisten todavía sobre la función exacta de la autenita residual. Se sabe, por ejemplo, que para un porcentaje dado de austenita, las características en funcionamiento son muy diferentes si esta es obtenida activando sobre la temperatura de interrupción del templado (tratamiento en frío) o si se obtiene por una acción sobre los otros parámetros de tratamiento (contenido de carbono, etc). Ciertos autores explican estas diferencias de comportamiento por la influencia de tensiones propias de las fases.\*2\*

Existen igualmente diferencias notables entre los diversos trabajos concernientes al comportamiento en la fatiga para contenidos de austenita residual inferiores al 30% que son juzgados favorables.\*3\*. porque ellas permiten una acomodación de la estructura o bien desfavorables a causa de la disminución de resistencia de la capa que provocan \*2\*,\*4\*,\*5\*. Hemos visto luego de un estudio realizado en CETIM \*6\*, que existían relaciones entre el contenido de austenita y las tensiones residuales; o se encuentra esta incertidumbre concerniente a la acción de tensiones residuales de compresión sobre el comportamiento en la fatiga que es reportado como benéfico \*7\*,\*8\* ó sin acción notable \*9\*.

Parece pues que los progresos en el dominio del conocimiento de la relación austenita residual-propiedades en servicio, no podrá ser adquirido más que aislando la acción propia de las tensiones de aquéllas de los constituyentes micrográficos y en particular de la austenita residual.

Esta influencia del perfil de las estructuras sobre las propiedades de empleo es conocida por los practicantes \*10\*, pero ella ha sido poco estudiada en el caso de la cementación teniendo en cuenta las dificultades encontradas para la realización de perfiles perfectamente controlados en las condiciones industriales comunes.

### 3) OBTENCION DE LA ESTRUCTURA.

El control de la estructura de una capa cementada puede ser realizado por la elección apropiada del tipo del acero y de

las condiciones del tratamiento térmico. Vamos a mostrar los principales parámetros que permiten durante una cementación seguida de un templeado directo, controlar la estructura.

a) Control del espesor.

El espesor de la capa de cementación por convención, es definida por la profundidad a la cual se obtiene una dureza dada, generalmente 550HV (NF AO4-202). El valor del espesor depende pues esencialmente del perfil de los contenidos de martensita de los diversos puntos de la capa cementada (fig.1).

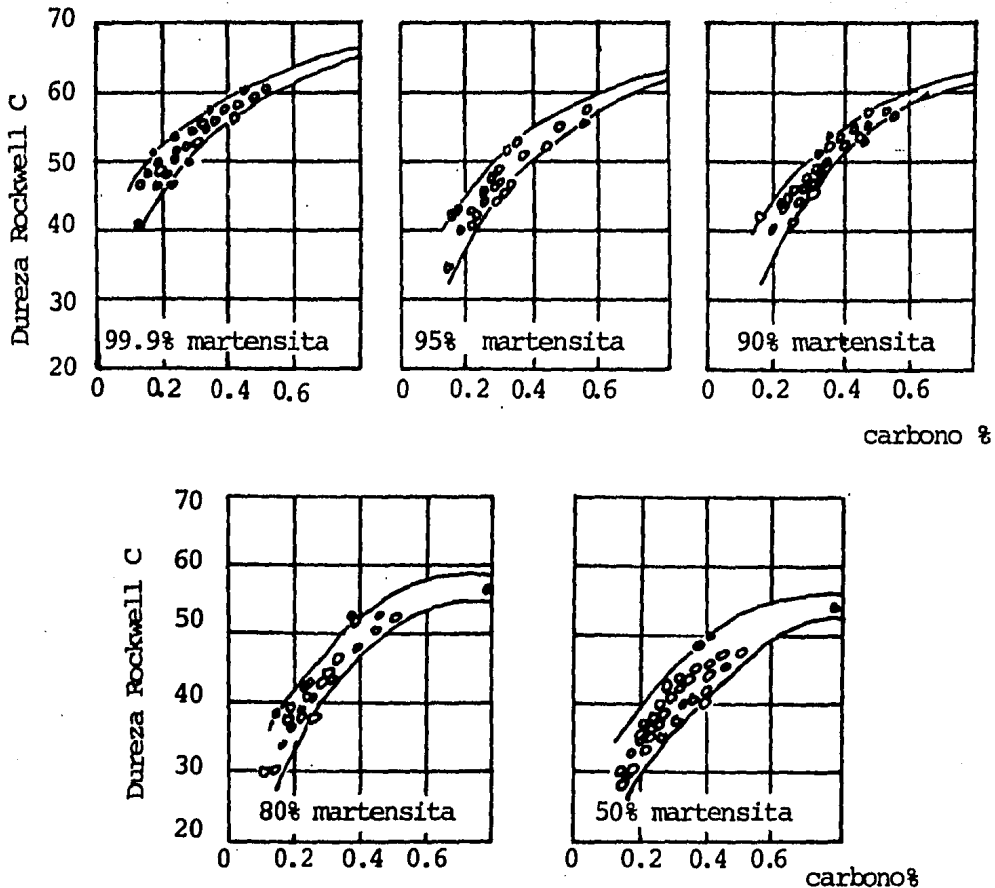


Fig.1 - Dureza en función del porcentaje de carbono para diversos porcentajes de martensita. \*11\*.

Los parámetros importantes serán entonces para el acero su templabilidad que podrá modificar ligeramente el porcentaje de martensita obtenida en un porcentaje de carbono dado.

Y para el tratamiento: el perfil de carbono que condiciona el perfil de dureza que se puede obtener y que por este hecho es el parámetro esencial del control del espesor cementado. A un grado mínimo se notará igualmente la influencia de condiciones del enfriamiento que como la templabilidad del acero actúan sobre el grado de transformación de la austenita.

b) Control de la resistencia en el núcleo.

Las características obtenidas bajo la capa cementada dependen únicamente del tipo del acero utilizado y de las condiciones de enfriamiento impuestas a la pieza; diversos métodos \*12\*, \*13\* permiten teniendo en cuenta esos elementos obtener una previsión cuantitativa de este parámetro.

c) Control de la oxidación interna.

Este fenómeno es debido a la reacción de la atmósfera con ciertos elementos de aleación (Cr, Mn en particular) conduce a la formación de óxidos de esos elementos que así no pueden desempeñar su papel sobre la templabilidad superficial. Actualmente no se conocen reglas que permitan tener en cuenta este fenómeno al nivel de la operación de cementación y la acción principal que puede realizarse para evitar este fenómeno consiste en actuar sobre la elec



ción del tipo del acero disminuyendo los elementos de aleación sensibles a éste fenómeno tales como el manganeso, el cromo y el silicio.

Se observará igualmente que las microestructuras perlíticas y bauniticas creadas por oxidación interna están muy localizadas en la superficie ( espesor, el espesor raramente sobrepasa algunas decenas de  $\mu\text{m}$ ), y por consecuencia la operación de rectificación que sigue a la mayor parte de los tratamientos de cementación templado, permite librar los inconvenientes debidos a sus constituyentes.

d) Control de carburos.

Los carburos pueden aparecer en una capa cementada desde que se libra la línea Ac<sub>m</sub> (fig 2) del diagrama de equilibrio. Los parámetros importantes para controlar la aparición de los carburos serán pues los contenidos de carbono introducidos en el momento de la cementación, la temperatura de mantenimiento antes del templado y los elementos de aleación del acero que actuarán sobre la posición de Ac<sub>m</sub>. Se encuentra en la literatura los datos prácticos que indican para las diversas familias de aceros de cementación, los puntos Ac<sub>m</sub> en función de contenidos de carbono de las capas cementadas,\*14\*. La fórmula siguiente deducida de \*15\*, \*16\*, \*17\*. permiten igualmente evaluar el riesgo de aparición de carburos:

$$\text{Ac}_m = \frac{4798,6}{\ln \frac{1-19,6 C}{(1+u) C}}$$

Con Ac<sub>m</sub>: temperatura de inicio de precipitación de carburos;  
C: Contenido de carbono;  
u: coeficiente dependiendo de elementos de aleación del acero.

$$\begin{aligned}
 u = & (\text{Si}\%) (0,15 + 0,33 \text{ Si}\%) - (\text{Mn}\% 0,0365) - (\text{Cr}\%) (0,13 - 0,055 \text{ Cr}\%) \\
 & + (\text{Ni}\%) (0,03 + 0,00365 \text{ Ni}\%) - (\text{Mo}\%) (0,025 + 0,01 \text{ Mo}\%) - \\
 & (\text{Al}\%) (0,03 + 0,02 \text{ Al}\%) - (\text{Cu}\%) (0,016 + 0,014 \text{ Cu}\%) - (\text{V}\%) (0,22 - 0,01 \text{ V}\%)
 \end{aligned}$$

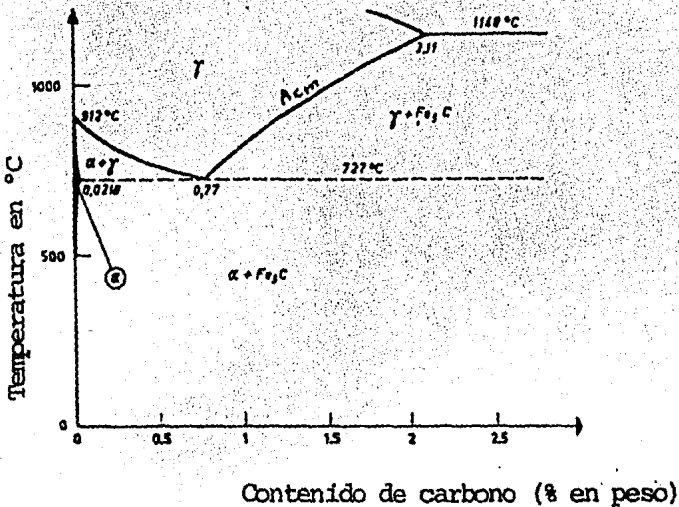


FIG. 2.- Diagrama de equilibrio Fe C (a partir de \*11\*).

Se observará que otros factores tales como la velocidad de enfriamiento entre la temperatura de cementación y la temperatura de templado, los tiempos de conservación ... pueden igualmente tener una influencia sobre la presencia de carburos. De todas formas se notará que el riesgo de aparición de carburos apreciado a partir de las condiciones de equilibrio, es pesimista por analogía a la realidad y en consecuencia los datos indicados más arriba son válidos para la práctica del tratamiento térmico.

e) Control de la austenita residual.

Entre los parámetros que influyen sobre la austenita residual \*18\*, en un ciclo de cementación y templado directo, figuran:

la temperatura de interrupción del templado, la velocidad de enfriamiento y los parámetros que pueden actuar sobre la composición de la austenita antes del templado ( tipo del acero contenido de carbono de la capa, temperatura de templado, tiempo y temperatura de cementación).

Un estudio sistemático, realizado en CETIM apoyándose sobre los resultados obtenidos de la literatura, ha permitido evaluar la influencia de esos diversos parámetros.

#### e.1) Influencia del contenido en carbono.

El aumento del contenido superficial en carbono conduce a un aumento del porcentaje de austenita residual. Esta influencia es muy pronunciada, así lo denotan los trabajos de Koistinen y Marburger \*18\*.

En efecto, a partir de estas investigaciones, la cantidad de austenita residual que se puede obtener sobre un acero es dada por la fórmula:  $\gamma = \exp(-m(Ms-T))$

con m: constante cuyo valor depende de la velocidad de enfriamiento (se toma generalmente 0,011) \*18\*, \*19\*;

otros autores han medido 0,008 a 0,013, \*20\*;

T: temperatura de interrupción del templado;

Ms: temperatura del inicio de la transformación martensítica.

Para un acero de composición dada, se puede admitir en primera aproximación que Ms varía linealmente con el contenido de carbono (para  $C \leq 0,6$ ).

Todos los otros elementos permanecen iguales, se tiene

una relación exponencial entre el contenido de carbono y austenita residual.

La importancia de éste parámetro sobre el contenido de austenita residual más ha conducido a examinar la validez de la previsión de la austenita residual por la fórmula de Koistinen. El principal obstáculo en la aplicación de esta fórmula en el caso de las capas cementadas provienen de la dificultad de apreciar el punto Ms.

Diversas fórmulas permiten en efecto evaluar la temperatura Ms en particular la fórmula desarrollada por Andrews \*21\*.

$$*Ms=539-423(C)-30,4(Mn)-17,7(Ni)-12,1(Cr)-7,5(Mo) \dots (1)$$

y su variante con los términos producidos que permitan obtener a partir de éste autor una mayor precisión:

$$Ms=512-453(C)-16,9(Ni)+15(Cr)-9,5(Mo)+217(C)^2-71,5(C)(Mn) \\ -67,5(C)(Cr) \dots (2)$$

así que aquélla propuesta por Steven y Haynes \*22\*:

$$Ms=561-474(C)-33(Mn)-17(Ni)-17(Cr)-21(Mo) \dots (3)$$

De todas formas estas fórmulas son dadas por sus autores para ser utilizadas en los casos donde el contenido de carbono de aceros es inferior a 0,6% y por lo consiguiente, ellas no convienen por la apreciación de Ms en las capas cementadas por las que los contenidos de carbono son frecuentemente superiores a éste valor. Para mitigar este inconveniente, Steven y Haynes han propuesto aplicar para las proporciones de C superiores a este límite

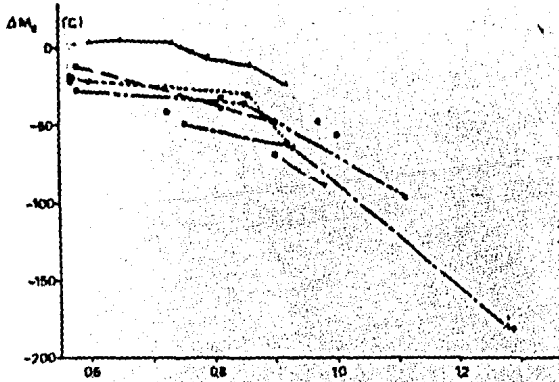
\* Temperatura Ms en °C.

una corrección, como resultado de su fórmula, cuyo valor ha sido determinado experimentalmente sobre los aceros a 3% de níquel. Este método, a partir de los autores conviene para otros aceros aparte de los estudiados; ha sido igualmente propuesto para ser aplicado de forma general a los aceros de cementación. \*4\*

A fin de considerar las posibilidades de estos diversos métodos los han aplicado a los resultados experimentales de la literatura \*23\*, \*24\*, relativo a aceros cementados de alto contenido de carbono \*14\*.

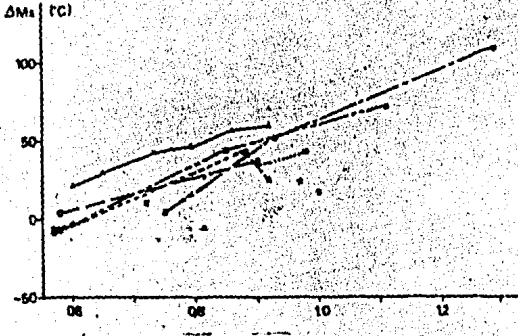
Las figuras 3,4,5 muestran la evolución de  $\Delta Ms$  (es decir, la diferencia  $Ms$  calculada menos  $Ms$  medida) para las diversas fórmulas permiten constatar una dispersión ligeramente menor sobre los resultados obtenidos a partir de la fórmula de Steven y Haynes. Esta fórmula conduce igualmente a los  $\Delta Ms$  más importantes lo que permite una mayor sensibilidad cuando se utilizan estas curvas para corrección de valores calculados. Se observará igualmente que la curva postulada por Haynes corresponde a un extremo sobre la figura 5.

El resultado de este trabajo es que se pueden preveer los datos de  $Ms$  para los valores superiores a 0,6% C utilizando la fórmula de Steven y Haynes, y corrigiendo los valores obtenidos de una cantidad  $\Delta Ms$  deducida del experimento (fig.5). La aplicación de estos resultados para la previsión de contenidos de austenita residual ha per --



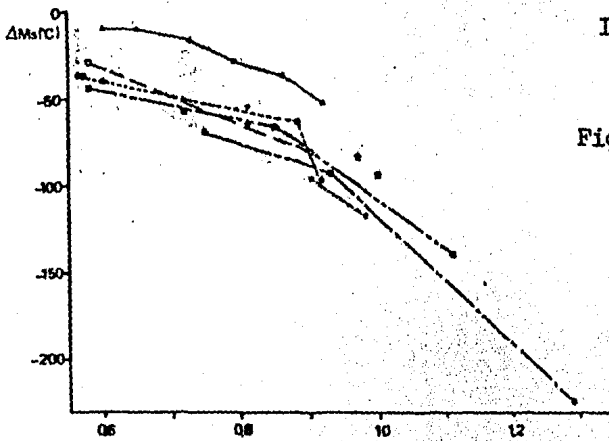
3% Ni	60 NCD 11
20 Ni Cr Mo8	14Ni Cr 14
20/25 Mo Cr4	70 C 1
20 Mo5	90 MV 8
Ck 15	15 Cr Ni 16
16 Mn Cr 5	XC70/Y90/Y130

Fig. 3 -  $\Delta Ms$  ( $Ms$  medida -  $Ms$  calculada) en función del contenido de carbono. Cálculo para la fórmula de Andrews (a partir de \*6\*)



Idem símbolos fig. 3

Fig. 4 -  $\Delta Ms$  ( $Ms$  medido -  $Ms$  calculado) en función del contenido de carbono. Cálculo de  $Ms$  para la fórmula de Andrews con los términos producidos (a partir de \*6\*).



Idem símbolos fig. 3.

Fig. 5 -  $\Delta Ms$  ( $Ms$  medida -  $Ms$  calculada) en función del contenido de carbono. Cálculo de  $Ms$  por la fórmula de Haynes y Steven. Los aceros estudiados por Haynes están marcados con 3% Ni sobre la figura, (a partir de \*6\*).

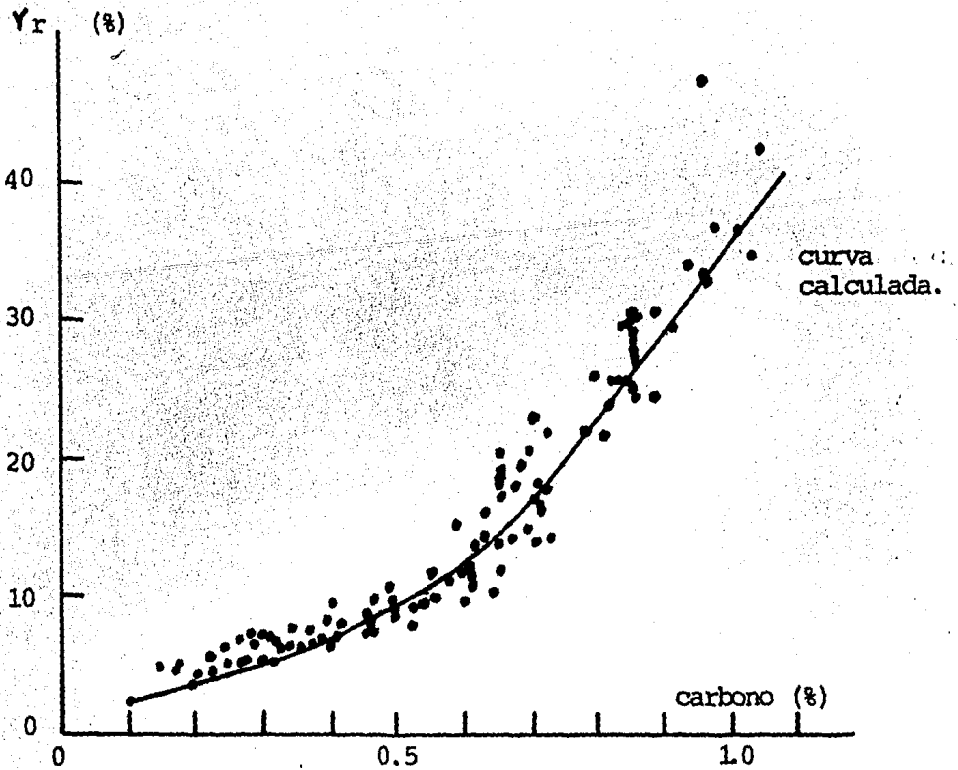


Fig. 6.- Comparación de los contenidos de austenita residual calculados y medidos experimentalmente en acero 16 N 6 (a partir de \*6\*).

mitido durante un estudio sobre la cementación de acero 16 NC 6 y 20 NCD 2, ha permitido darnos cuenta de resultados experimentales figura 6.

#### e.2) Influencia del tiempo de cementación.

Ciertos autores \*24\* encontraron para espesores importantes de cementación que para un mismo contenido de carbono el valor de austenita residual es más bajo en la superficie que en la capa. No se ha constatado este fenómeno en el dominio de espesor estudiado (0,4 a 1,2 mm) y así la aplicación de la relación de Koistinien al cálculo del perfil de austenita permite obtener un acuerdo

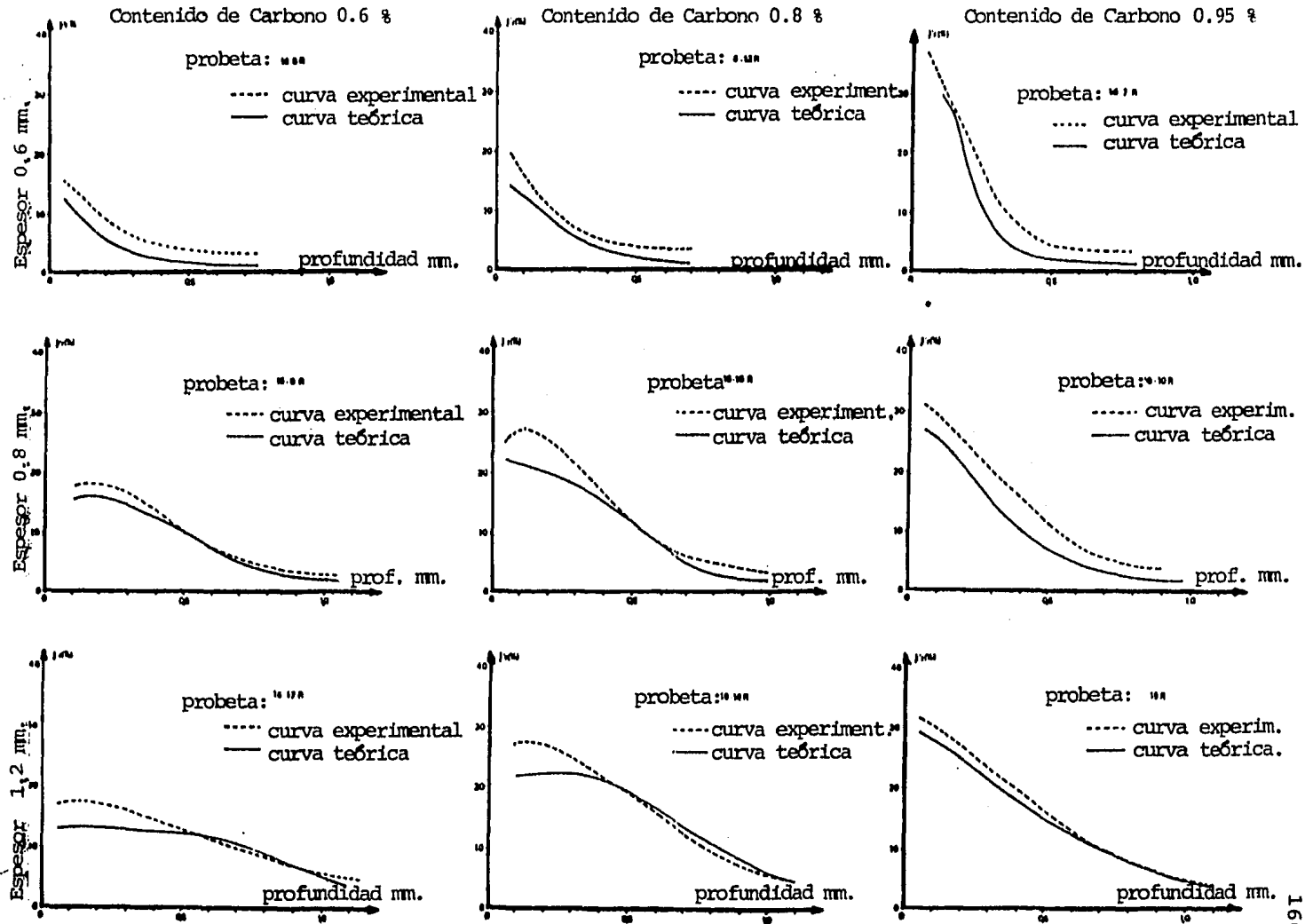


fig. 7 Comparación de perfiles de austenita residual experimentales y calculados a partir del perfil de carbono en el caso del acero 16 NC 6 (a partir de \*6\*).



satisfactorio entre los valores calculados y los resultados experimentales así como lo muestra la figura No. 7.

e.3) Influencia de la temperatura de interrupción del templado.

La relación de Koistinen permite determinar la influencia de la temperatura de interrupción del templado. Para una disminución de la temperatura del fluido de temple de  $T_0$  a  $T_1$  se tiene una disminución de la austenita residual dada por la relación:

$$\frac{\chi_0}{\chi_1} = \exp (-0,011 (T_1 - T_0)) -$$

En condiciones experimentales reportadas la comparación de probetas templadas al aceite a  $30^\circ\text{C}$  y de aquellas tratadas en nitrógeno líquido a  $-196^\circ\text{C}$  debía de conducir a una disminución de la tasa de austenita en una relación de 12.

Las medidas efectuadas sobre una capa de carbono elevado (0,95%) y sobre una capa de bajo carbono (0,6%), mostraron que en los dos casos (fig. 8 y 9) se observa una disminución de la austenita en una relación de 3.

Esta diferencia en los valores calculados y los resultados experimentales será debida a la estabilización de la austenita \*25\*, \*26\*. La aplicación de la relación de Koistinen muestra que los valores experimentales obteni

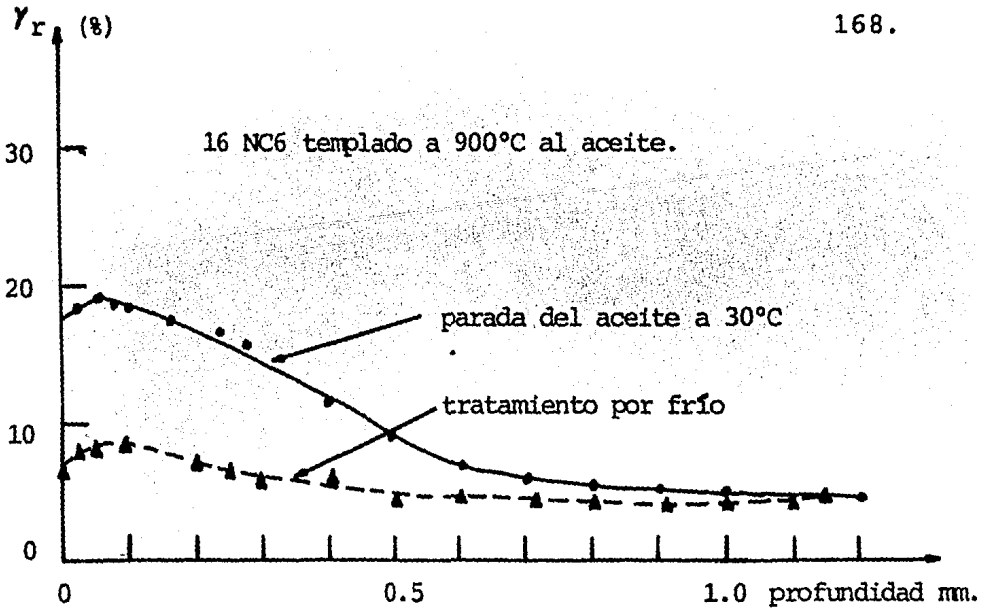


Fig. 8.- Influencia del enfriamiento antes del revenido sobre el contenido de austenita residual para un contenido de carbono superficial de 0,6% (a partir de \*6\*)

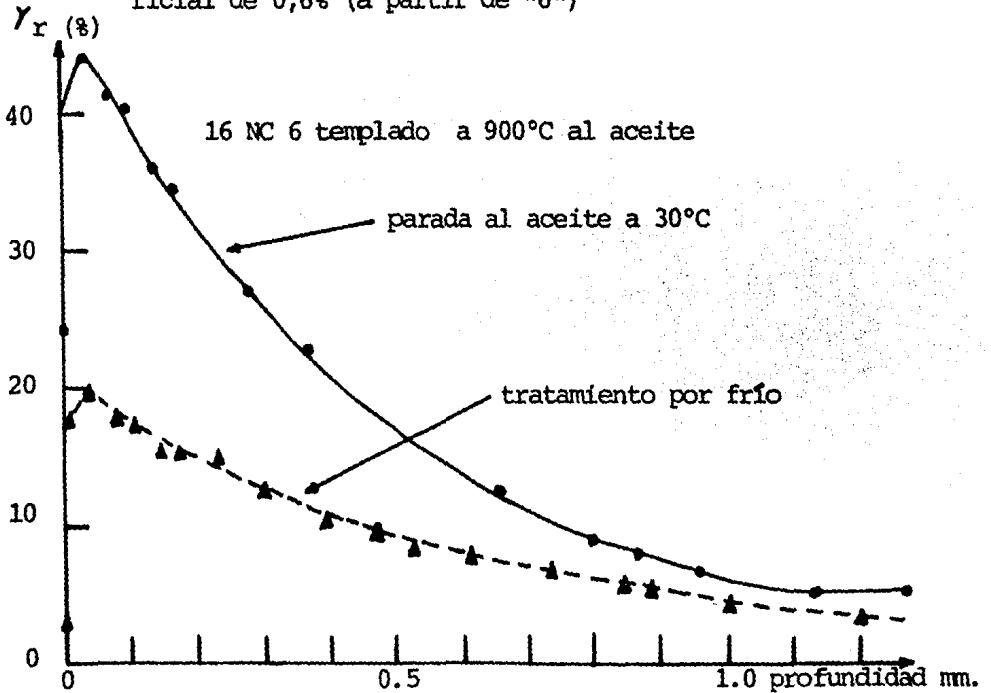


Fig. 9.- Influencia del enfriamiento antes del revenido sobre el contenido de austenita residual para un contenido de carbono superficial de 0,95% (a partir de \*6\*)

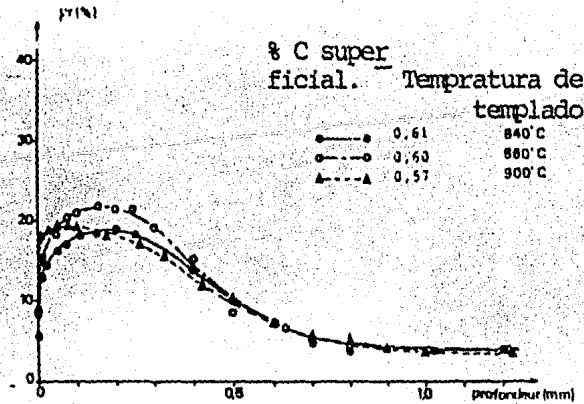


Fig. 11.-Influencia de la temperatura de temple sobre el contenido de austenita residual para un contenido en carbono superficial próximo a 0,6%. (a partir de \*6\*).

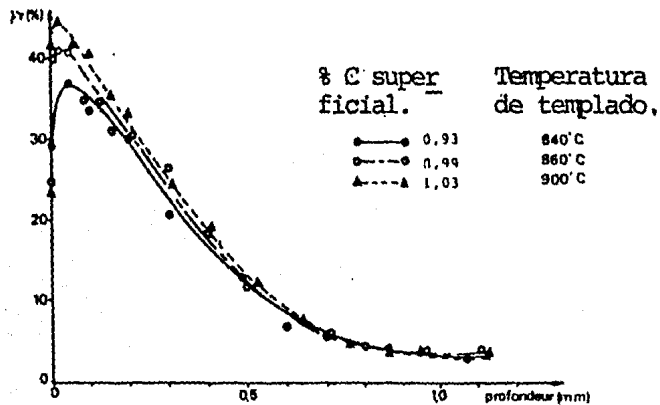


Fig. 12.-Influencia de la temperatura de temple sobre el contenido de austenita residual para una proporción de carbono superficial próxima a 0,95% (a partir de \*6\*).

igualmente que los contenidos de carbono superficial de probetas tratadas a 840°C y 900°C difieren ligeramente: la disminución del contenido en austenita medida es pues, ligeramente superior a aquella debida únicamente a la influencia de la temperatura del temple.

dos corresponden a una disminución de la temperatura de  $90^{\circ}\text{C}$ , o sea una temperatura final de  $-60^{\circ}\text{C}$ .

Los ensayos realizados por Balder \*27\* que ha comparado los enfriamientos a  $-120^{\circ}\text{C}$  con los tratamientos efectuados al ambiente, conducen a las relaciones de disminución de la tasa de austenita residual igualmente próxima de tres. Estos resultados parecen confirmar que en el mejor de los casos se puede prever los porcentajes de austenita residual a partir del enfriamiento -- por la fórmula de Koistinen que por las temperaturas superiores a  $-60^{\circ}\text{C}$  más allá de ésta temperatura, las disminuciones de austenita residual son débiles.

e.4) Influencia de matiz del acero.

La composición química del acero actúa así como lo vimos anteriormente sobre la temperatura  $M_s$  y por consecuencia sobre el contenido de austenita residual obtenido después del templado.

Las fórmulas utilizadas para el cálculo de  $M_s$  toman en cuenta esta influencia de los elementos de aleación del acero. Hemos mostrado en el párrafo e.1 que los contenidos de austenita calculados y experimentales eran correctos.

e.5) Influencia de la velocidad de enfriamiento.

La relación de Koistinen y Marburger ha sido establecida para templados rápidos de acero. Meyzaud y Sauzay \*28\*, han mostrado que se puede prever el efecto de un enfria-

miento continuo más lento teniendo a el

$\Delta t$  entre  $700^\circ$  y  $300^\circ\text{C}$  en la relación de Koistinen y Marburger. Si en el transcurso del enfriamiento lento se forma una fracción  $X$  de otro constituyente antes de la martensita (bainita o perlita) y si  $M's$  es la temperatura a la cual comienza la transformación martensítica de austenita no descompuesta anteriormente, la cantidad de austenita residual puede estar dada a partir de \*23\*, \*28\* por:

$$Y_r = (1-X) (\exp(-0,011(M's-20)(1-))$$

siendo  $= 0,41(1-\exp(-0,03 \Delta t^{\frac{1}{2}}))$ .

El ábaco presentado en la figura 10 es establecido para

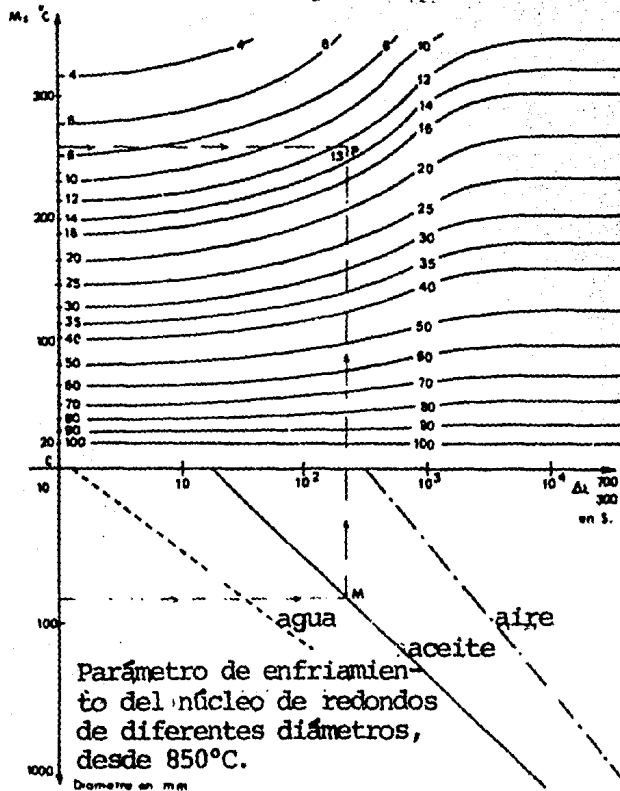


Fig. 10.- Abaco de previsión de porcentaje de austenita residual sobre piezas templadas (a partir de \*23\*).

los templados martensíticos interrumpidos a 20°C. Las informaciones necesarias para su utilización son:

- El criterio de enfriamiento  $\Delta t$ , de la pieza portada en abcisa (la relación con este criterio con el diámetro de un redondo es presentada bajo el ábaco principal);
- La temperatura  $M_s$  del acero considerado y eventualmente la formación de bainita y perlita antes de la transformación martensítica se puede utilizar el ábaco después de tener lugar "X" y M's sobre una curva TRC.

e.6) Influencia de la temperatura de templado.

La temperatura de templado es importante en la medida que es capaz de provocar una precipitación de carburos, e influenciar la cantidad de austenita residual.

En el caso del templado directo donde se intenta generalmente evitar la aparición de carburos, se puede considerar que este parámetro es de débil influencia. Así, las medidas realizadas sobre un acero 16 NC 6, han mostrado que para los contenidos de carbono entre 0,6 a 0,8% no se constata la influencia de la temperatura de templado sobre el contenido de austenita residual es el rango estudiado (840°C a 900°C). Ver figura 11. Por el contrario para los contenidos en carbono más elevados ~0.95% se nota una diferencia de cerca del 8% entre 840 y 900°C que es el reflejo de una modificación de la composición química de la austenita antes del templado, por precipitación de carburos (ver fig. 12). Es necesario observar

A las temperaturas habitualmente utilizadas para el temple del acero 16 NC 6 de 840 a 860°C \*29\* la influencia de éste parámetro permanece débil ~4% y solamente es sensible sobre las capas cementadas con porcentajes de carbono superiores a 0,9%.

f) Relación entre estructura y tensiones residuales en las capas cementadas.

Tan luego como un material sufre alargamientos de amplitud variable de una dirección a otra, hay la aparición de tensiones que son la consecuencia del "esfuerzo" que hace el material para igualar esas diferencias de longitud.

Estos alargamientos pueden ser provocados por la acción de una fuerza exterior que por la dilatación térmica o por cambios de estructuras que indican la aparición de fases de volúmenes específicos diferentes.

En el caso de la dilatación térmica, es la diferencia de temperatura entre la superficie y el núcleo la que induce esas tensiones. Si son muy fuertes hay una deformación plástica del material que subsiste a la temperatura ambiente y conduce a la presencia de tensiones residuales, si estas deformaciones plásticas son heterogéneas (por ejemplo, alargamientos de la superficie, contracción del núcleo).

Para simplificar, supondremos que éstas tensiones permanecen en el dominio elástico y que desaparecen con la igualación de temperaturas.

Los cambios de fases que conducen a una estructura homogénea

no provocan más deformaciones residuales heterogéneas, ni entonces la aparición de tensiones residuales. Por el contrario, en el caso particular de la cementación, estamos en presencia de una mezcla de fases que varían fuertemente en las primeras décimas de mm bajo la superficie.

En particular se encuentra en proporción variable la austenita residual y martensita, como lo hemos visto en los párrafos anteriores; el alargamiento residual del material va a ser muy variable en la capa cementada y el equilibrio del material es realizado por la presencia de tensiones residuales. En una primera aproximación, estas serán proporcionales a la diferencia de densidad del material en la dirección considerada con relación al núcleo de la pieza.

La densidad del material en un punto dado está directamente ligado a la proporción de las fases presentes y en su densidad respectiva, por una ley de mezcla del tipo:

$$V = \alpha_1 V_1 + \alpha_2 V_2 + \dots$$

$V$  = volumen específico medio.

$V_1$  = volumen específico fase 1, en proporción  $\alpha_1$

$V_2$  = volumen específico fase 2, en proporción  $\alpha_2$ ;

$\alpha_1$  y  $\alpha_2$  están directamente asociados al contenido de carbono del acero. Las fases presentes son esencialmente de austenita y de martensita.

Por otro lado, los volúmenes específicos  $V_1$   $V_2$  ... están también asociados en una relación lineal al contenido de carbono del acero. Citamos para recordar las relaciones clásicas



sicas de Lement \*37\*, que da el orden de magnitud de esas variaciones.

En definitiva las tensiones residuales pueden ser consideradas como una función del contenido de carbono de la capa. Un cálculo simple desarrollado sobre estas bases ha -- permitido encontrar el comportamiento de perfiles de tensiones residuales que se han medido por otro lado sobre las provetas. (ver figura 13).

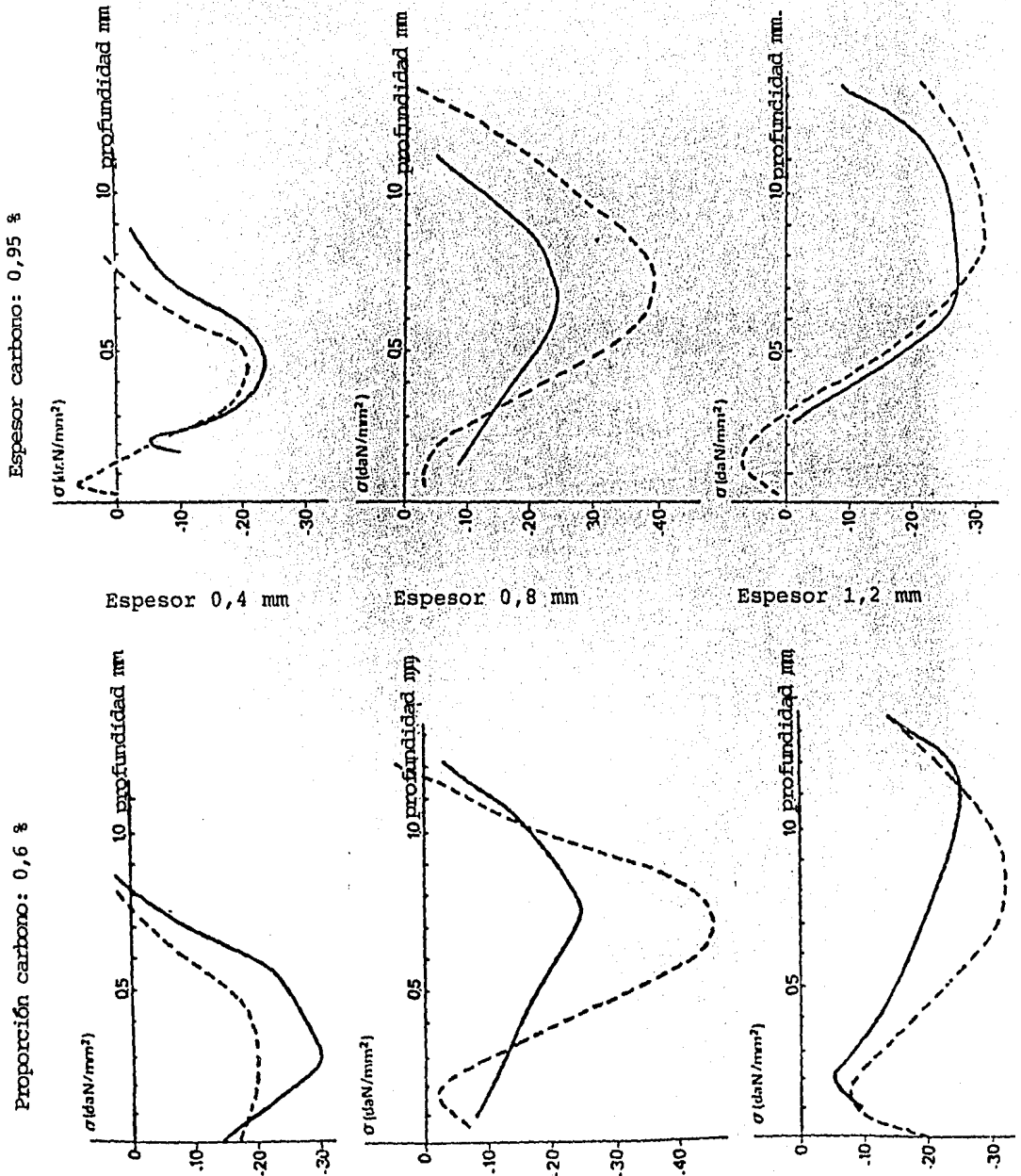
Estos resultados prueban el efecto preponderante de la estructura, del perfil de carbono sobre la aparición de tensiones residuales en las capas cementadas.

g) Conclusión.

Los elementos desarrollados en este párrafo permiten constatar que el practicante dispone en el caso del temple directo después de la cementación, y dentro de los límites indicados arriba, de medios de previsión cuantitativa de la estructura y también del perfil de la estructura con la condición de controlar el perfil de los contenidos de carbono introducidos luego de la cementación.

En esto que sigue se desarrolla un medio original de previsión de este perfil que sea utilizable simplemente en un taller de tratamiento térmico.

Fig. 13.- Comparación de perfiles de tensiones calculadas y experimentales para tres espesores cementados y dos contenidos superficiales de carbono (a partir de \*6\*).



4) PREVISION DE LOS PERFILES DE CARBONO A PARTIR DE LAS LEYES DE LA DIFUSION.

a) Caso general

La determinación del perfil de carbono, es decir, el conocimiento de la concentración de carbono de una capa cementada en función de la profundidad, para un ciclo de tratamiento dado, se efectúa por la investigación de soluciones de ecuaciones de derivadas parciales que rigen las leyes de la difusión.

Tomemos el caso donde la profundidad de la capa cementada es débil ante el espesor de la pieza, y que la superficie concernida es plana, situada lejos del borde o discontinua geométricamente; el flujo de carbono al interior del material puede entonces ser considerado como unidireccional.

El contenido de carbono del acero  $c(x,t)$  no depende en consecuencia más que de la profundidad,  $x$ , bajo la superficie y del tiempo,  $t$ , medido desde el comienzo de la cementación.

La ecuación simplificada se escribe así:

$$\frac{c(x,t)}{t} = \frac{d}{x} \left[ D \cdot \frac{dc(x,t)}{dx} \right]$$

$D$ : es el coeficiente de difusión del carbono en el material. Depende esencialmente de la temperatura pero también del contenido de carbono y en una menor medida de la composición química del acero.

En el caso general donde el coeficiente de difusión depende del contenido de carbono, la resolución de la ecuación no puede ser realizada más que con la ayuda de técnicas de cálculo numérico, necesitando el empleo de un ordenador.

Este método es riguroso, en la medida en que las condiciones de los límites (lo que pasa en la superficie de la pieza) son bien conocidas.

Por el contrario este método es poco flexible de utilizarse y se le reserva más bien a trabajos de investigación que a una utilización cotidiana en un taller de tratamiento térmico. Puede ser interesante disponer -- de una herramienta simple y eficaz de previsión de los perfiles de carbono, tanto más que los medios de la micro-informática, así como las calculadoras programables comienzan a penetrar en los talleres.

Tal herramienta puede ser provista por los resultados de una aproximación analítica del problema, es decir, que dispone de una función matemática que relaciona la concentración de carbono con la profundidad y el tiempo.

Esta solución no puede ser determinante más que si las condiciones de límites son suficientemente simplificadas. Vamos a presentar sucesivamente las soluciones analíticas que proporcionan actualmente el mejor servicio para una programación fácil del cálculo provisional del perfil de carbono.

b) Aproximaciones simplificadas de la solución

La primera simplificación, indispensable a toda aproximación analítica del problema, es de aceptar que el coeficiente de difusión es constante en el curso del ensayo. En este caso, la ecuación de difusión puede escribirse:

$$\frac{\partial c(x,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c(x,t)}{\partial x^2}$$

Donde "D" "término" de la forma  $D = D_0 \exp\left(-\frac{H}{T}\right)$  que no depende más que de la temperatura de tratamiento, porque  $D_0$  y  $K$  son las constantes.

Esto debe ser por consiguiente estable (o no variar más que por paso) en el transcurso del tiempo. En seguida, es conveniente fijar las condiciones de los límites. Se admite, para simplificar, que el flujo de carbono en la superficie de la pieza es proporcional a la desviación entre el potencial carbono ( $C_g$ ) de atmósfera (corrige la influencia de los elementos de aleación) y el contenido de carbono ( $C_s$ ) de la superficie del acero en un instante dado sea:

$$\phi = K(C_g - C_s)$$

y esto lo podríamos escribir que la superficie ( $x=0$ )

$$\left[ \frac{c(x,t)}{x} \right]_{x=0} = \frac{K}{D} (C_g - C_s)$$

$K$  es el coeficiente de cambio que describe la interacción atmósfera - pieza.

Para simplificar aún más, se considerará  $K$  suficientemen-

te grande para que, a cada instante, se pueda admitir  $C_g = C_s$ .

b.1) Tratamiento en un solo paso.

En este caso particular, la temperatura y el potencial de carbono son fijados y mantenidos constantes durante toda la duración del tratamiento.

- La concentración de carbono en superficie es constante.

La solución más simple a la ecuación de la difusión es obtenida considerando que el contenido de carbono en la superficie es constantemente igual al potencial carbono de la atmósfera,  $C_g$ .

Sea  $C_g = C_s$  (lo que corresponde a  $k$  muy grande)

La solución se escribe:

$$C(x,t) = C_0 + (C_g - C_0) \cdot C_1(x,t)$$

con  $C_1(x,t) = \operatorname{erfc}^* \left[ \frac{x}{2 \sqrt{D \cdot t}} \right]$

$C_0$ : es el contenido de base de carbono del acero;

$t$ : es la duración del tratamiento;

$D$ : el coeficiente de difusión que no depende más que de la temperatura;

$\operatorname{erfc}(X)$  es definido por

$$\operatorname{erfc}(X) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^X e^{-y^2} \cdot dy$$

Esta función toma el valor 1 para  $x=0$  y el valor cero para  $x$  muy grande.

$\operatorname{erfc}^*$ : ver anexo 4.

En la práctica las condiciones de los límites ( $C_s=C_g$ ) utilizadas no son respetadas más que para un tiempo muy grande. También, una solución tal no puede ser retenida más que cuando los tratamientos son de duración suficiente (muchas horas). El interés de una fórmula tal es su simplicidad de utilización y hacer que no depende más que de una constante,  $D$ , siempre posible de estimar por una prueba simple sobre la cual volveremos más adelante.

Ella permite así una buena aproximación del perfil. Para los tiempos más cortos, esta solución no es realista y es necesario entonces tomar en cuenta la resistencia que se opone al paso del flujo de carbono a la superficie de la pieza, es decir, un valor débil de  $k$ .

- Tomar en cuenta la resistencia en el paso del flujo de carbono a la superficie.

Las condiciones de los límites retenidos son aquellas ya mencionadas en b).

$$\left[ \frac{\partial c(x,t)}{\partial x} \right]_{x=0} = \frac{K}{D} [C_g - C_s(t)]$$

La solución al problema, siempre con  $D=C$ , se escribe:

$$C(x,t) = C_0 + (C_g - C_0) \cdot C_2(x,t)$$

con

$$C_2(x,t) = \operatorname{erfc} \left[ \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right] - \exp \left[ \frac{Kx}{D} + \frac{K^2 t}{D} \right] \operatorname{erfc} \left[ \frac{x}{2\sqrt{Dt}} + \frac{K\sqrt{t}}{\sqrt{D}} \right]$$

Esta solución es válida también para tiempos cortos, toma en cuenta el cambio de carbono en la superficie de la pieza, por el intermedio de K.

La determinación de esta constante es indispensable pero es delicada pues depende de muchos parámetros, en particular de la composición de atmósfera cementante y de la temperatura.

b.2) Solución del caso de tratamientos en dos etapas.

Se conocen las formas analíticas de soluciones para otras condiciones de los límites. Es el caso, por ejemplo, cuando se imponen las variaciones de  $C_g$  en el transcurso del tiempo \*35\*, esas soluciones bastante complejas, quedan sin embargo a la capacidad de pequeñas calculadoras.

Uno de los casos más interesante a tratar fuera de los dos casos presentados anteriormente, es este donde el tratamiento es realizado en varias etapas, durante las cuales la temperatura y el potencial carbono se mantienen constantes. El caso más práctico es el que corresponde a dos etapas: la primera durante la cual se efectúa la cementación propiamente dicha, con un fuerte contenido de carbono en la superficie, y la segunda, que permite la difusión de este carbono de la superficie hacia el núcleo para disminuir su contenido.

- La temperatura no varía

Es el caso más simple a tratar, pues ahora D no varía



en el curso del tiempo.

La llamaremos  $C_{g_1}$  y  $C_{g_2}$  respectivamente a los potenciales de carbono de la atmósfera mantenidos constantes durante los tiempos  $t_1$  y  $t_2$ . La duración del tratamiento será ahora  $t = t_1 + t_2$ .

En el caso donde  $t_2 = 0$  (una sola etapa) la solución es conocida. Esta es  $C(x, t) = C_0 + (C_g - C_0) \cdot \text{Ci} \left[ \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right]$

Si  $t_2 \neq 0$ , la solución se escribe:

$$C(x, t) = C_0 + (C_{g_1} - C_0) \cdot \text{Ci} \left[ \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right] + (C_{g_2} - C_{g_1}) \cdot \text{Ci} \left[ \frac{x}{2\sqrt{(t-t_1)D}} \right]$$

$C_i = C_1$  o  $C_2$  según la hipótesis retenida.

- El potencial de carbono y la temperatura varían simultáneamente.

Este caso ha sido tratado por Pavlossoglou \*30\*. Cuando la temperatura pasa del valor  $T_1$  y  $T_2$  en tiempo  $t_1$ , el coeficiente de difusión varía del valor  $D_1$  al  $D_2$ , así como el coeficiente de cambio que depende también de la temperatura. Sean  $k_1$  y  $k_2$  estos dos valores.

$$C(x, t) = C_0 + (C_{g_1} - C_0) \cdot C_2(x, Dt, k_1) + (C_{g_2} - C_{g_1}) \cdot C_2(D_1, t_1, k_1) + (C_{g_1} - C_0) \cdot \phi(x, D_1 \cdot t_1, D_2 \cdot t_2, k_1, k_2)$$

$C_2(x, t)$  siendo la solución ya presentada y  $\phi$  una expresión que depende de las condiciones de tratamiento y de los dos coeficientes de cambio  $k_1$  y  $k_2$ .

Además de la complejidad del término  $\phi$ , esta solución hace intervenir los dos coeficientes de cambio que dependen de numerosos factores. Además el coeficiente de

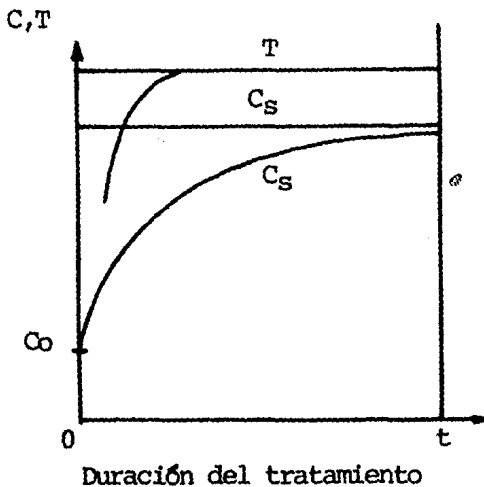
difusión se ha mantenido constante en el caso simple donde  $t_2=0$  no se encuentra la inflexión de la curva experimental observada.

#### 5) INVESTIGACION DE UNA SOLUCION EMPIRICA SIMPLE Y GENERAL.

No obstante la complejidad de ciertas hipótesis retenidas en la investigación de una solución analítica, sin embargo no se toma nunca en cuenta la variabilidad del coeficiente de difusión con el contenido de carbono. Además las condiciones de los límites son mezcladas íntimamente en los términos de la expresión analítica encontrada, por intermedio del coeficiente de cambio.

Hemos preferido investigar una solución empírica aún más próxima a la realidad experimental, de ser posible, simple en su expresión y suficientemente general para englobar todos los casos expuestos anteriormente. Para esto hemos procedido por analogía, con las expresiones analíticas rigurosas.

##### a) Solución para un sólo paso de tratamiento.



Si se supone que  $C_g=C_s$ , cualquiera que sea  $t$ , es indiferente tomar uno u otro valor en el cálculo de la solución explicada anteriormente (Donde la concentración en la superficie es constante). Es necesario por el contrario utilizar el valor de  $C_g$  si se coloca en la hi-

hipótesis más realista del párrafo mencionado anteriormente con el título de "Tomar en cuenta la resistencia al paso de flujo de carbono en la superficie", que exige además el conocimiento del valor de K.

Ha n disociado el problema e investigado si la solución en el 2° caso no podía ser correctamente aproximada por la solución del 1° caso, en la cual  $C_g$  es reemplazada por  $C_s$ . Se hace entonces la hipótesis que ha de determinar  $C_s$  en función del tiempo y de las condiciones de tratamiento.

(Se supone que todo esto es posible), con lo que:

$$C(x,t) = C_0 + (C_s - C_0) \cdot \operatorname{erfc} \left[ \frac{x}{2 \sqrt{Dt}} \right]$$

Sin embargo esta solución no presenta la curvatura deseada a causa del valor fijo de D.

Ha n investigado entonces una solución haciendo intervenir un coeficiente de difusión variable con  $C(x,t)$ .

El coeficiente conservado ha sido dado por Azimov \*31\*, a una constante multiplicada cercana; Do sea:

$$D = D_0 : D(C, T)$$

$$\text{con } D(C, T) = (1 - 0,232C) \exp \left[ \frac{19900}{T} \right] + 0,00242C \exp \left[ \frac{6790}{T} \right]$$

donde C es la concentración en carbono expresada en % y T, la temperatura absoluta.

Por analogía con la expresión dada, ha n investigado si existía una relación biunívoca  $Y = F(X)$

$$\text{entre } X = \frac{x}{2\sqrt{D(C,T) \cdot t}} \quad \text{y} \quad Y = \frac{C(x,t) - (C_0)}{C_s - C_0}$$

Para los experimentos que hemos realizado la figura 14 muestra que existe, con cierto margen de error, tal rela-

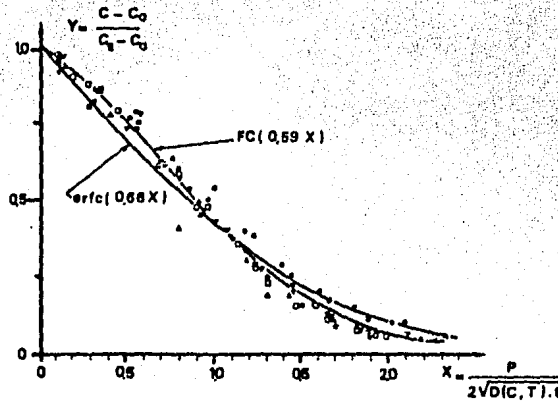


Fig. 14.-Evolución de Y en función de X para los tratamientos siguientes, sobre un acero 20 N C D 2. La función FC(0,59X) es trazada por  $\lambda = 0,38$  ( $a = 0,6 \cdot 36^*$ ).

	Temperatura (°C)	Duración (h)	Cg (%)	Cs (%)
□	900	4	1,150	1,050
●	-	3	0,805	0,785
★	-	-	1,150	1,055
▼	-	-	.	1,117
■	-	-	0,645	0,630
○	-	1	1,150	0,990
△	-	0,5	1,150	0,810
▽	880	3	1,150	1,055
▲	860	-	1,078	0,905

ción, y la función "erfc" podría ser ésta. Sin embargo no toma en cuenta la inflexión residual de la curva observada. Para calcular la función  $\text{erfc}(x)$ , hemos utilizado una expresión analítica que hemos establecido y que se presenta bajo la forma:

$$\text{erfc}(x) \approx \frac{1 - \exp\{-\sqrt{\pi}x + (2-\pi/2)x^2 + \sqrt{\pi} \cdot (1-\pi/3)x^3\}}{\sqrt{\pi}x \cdot e^{x^2}}$$

La diferencia entre ésta función y la función  $\text{erfc}(x)$  que da siempre comprendida entre 0 y  $4 \times 10^{-4}$  cualquiera que sea el valor de  $x$  variando entre cero e infinito.

Consideremos la función siguiente:

$$FC(x) = \frac{1 - \exp(-\sqrt{\pi}x - 0,6 \cdot x^2)}{\sqrt{\pi}x e^{x^2}}$$

Es próxima a la función  $\text{erfc}(x)$ , pero presenta una curvatura para ciertos valores de "a". Para que  $FC(x)$  tenga un sentido físico, es necesario que  $-\frac{\pi}{2} \leq a \leq 0$

(pendiente  $\leq 0$  al origen y  $FC(x) \geq 0$ , cualquiera que sea  $x$ )  
o proponiendo  $\lambda = -\frac{2a}{\pi}$ ;  $1 \geq \lambda \geq 0$

Escribiremos en lo sucesivo:

$$FC(x, \lambda) = \frac{1 - \exp\{-\sqrt{\pi}x(1 + \frac{\lambda}{2\pi}x)\}}{\sqrt{\pi}x e^{x^2}}$$

(Ver figura 15)

La figura 14 muestra que para  $\lambda = 0,38$  (o  $a = 0,6$ ), es sensible encontrar un Do cuyos puntos experimentales forman una curva lisa (perfectamente) con un solo palier será pues

$$C = C_0 + (C_s - C_0) \cdot FC(x, 0,38)$$

$$\text{con } x = \frac{P}{2\sqrt{D_0 \cdot D(c, T) t}} \quad ; \quad P = \text{profundidad en mm.}$$

La profundidad  $P$  está expresada en mm, y  $t$  en segundos;  
 $b = 2\sqrt{D_0}$  toma el valor de 30,332.

La figura 16 muestra algunos ejemplos de cálculos realizados con la ayuda de ésta relación.

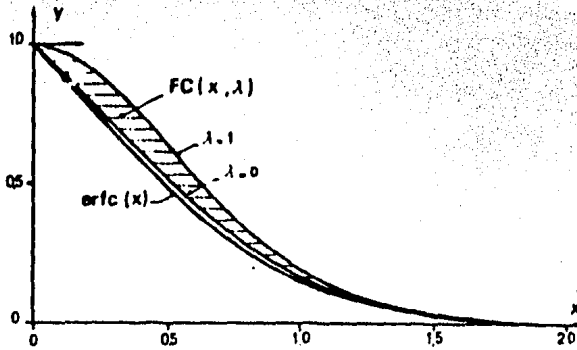


Fig. 15.-La zona ashurada define el dominio de la existencia de  $FC(x, \lambda)$  cuando  $\lambda$  varía de 0 a 1.

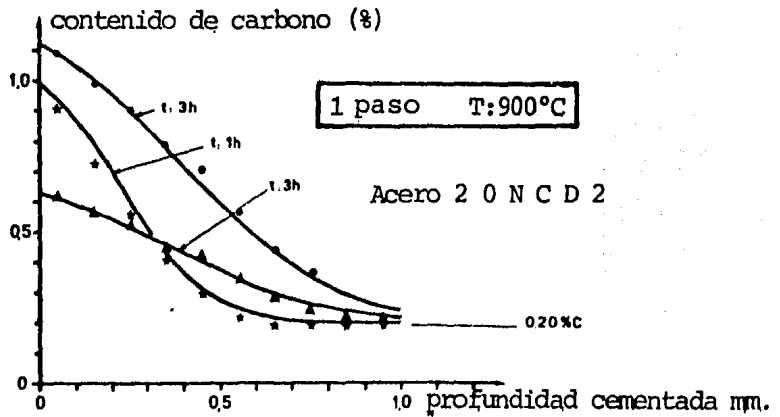


Fig. 16.- Ejemplo de cálculos realizados utilizando las condiciones de tratamiento (a partir de \*36\*) indicado sobre la figura y  $b_0 = 30,332$ .

b) Observaciones sobre la solución propuesta.

Esta solución que da perfectamente cuenta de los resultados experimentales, cualquiera que sean los valores de  $T$ ,  $t$  y  $C_s$ ; es más simple de calcular que la función  $\text{erfc}(x)$  que necesita el cálculo de una integral, y que  $c(x,t)$  intervienen en los dos miembros de la expresión. En efecto, partiendo de un valor inicial de  $C(x,t)$  que permite calcular un primer valor de  $D(x,t)$  el cálculo converge muy rápidamente hacia la solución (1 o 2 iteraciones).

El valor medio encontrado por  $\lambda$  conviene en todos los casos prácticos habituales (1 a 4h para nuestras pruebas). Para los tiempos más cortos (menes de una hora),  $\lambda = 0$  convendría más, pero la desviación es ahora mínima

con la experiencia de que es inútil modificar  $\lambda$ . Para los tiempos superiores a 4 horas es posible que  $\lambda$  tienda hacia 1 (sólo de muy largos ensayos podrían ponerse en evidencia).

Sin embargo en la industria, donde los tratamientos son frecuentemente en dos etapas, el error sobre el valor de  $\lambda$ , si ella existe, introduce una desviación sobre el trazo de la curva que pasa totalmente inadvertido. Pues existen sus orígenes de errores más importantes en esos casos como veremos posteriormente.

Por consecuencia, consideramos  $\lambda = 0,38$  como una constante que hace parte de la estructura de la función  $FC(x,\lambda)$  que en adelante escribiremos  $FC(X)$  para simplificar, sea:

$$FC(x) = \frac{1 - \exp(-\sqrt{\pi}x + ax^2)}{\sqrt{\pi}xe^{x^2}}$$

El valor de  $C_s$  utilizado en nuestros cálculos es el valor final del contenido de carbono de la superficie al finalizar el tratamiento, sin preocuparse de saber si  $C_s$  es próxima o no al valor asintótico,  $C_g$ , obtenido para un tiempo muy largo. En práctica si ese tiempo es efectivamente suficiente,  $C_s$  puede ser tomado igual al potencial carbono de la atmósfera. En otros casos, retornamos a la dificultad de saber eso que pasa en la interfase y por consiguiente al conocimiento del coeficiente de cambio. Sin embargo vamos así disociando las dificultades.

c) Solución para un tratamiento de 2 etapas.

Conservaremos en esto la utilización de coeficiente de difusión variable  $D(T,C)$  así como el de la función  $FC(X)$ . Las soluciones investigadas serán encontradas por analogía con los casos expuestos en el inciso 4).

c.1) El potencial carbono de la atmósfera varía sólo.

Supongamos que la temperatura del tratamiento es mantenida constante en el transcurso del tiempo y que el potencial carbono varía del valor  $C_{g_1}$  a  $C_{g_2}$  al tiempo  $t_1$  y  $C_{s_2}$  al tiempo  $t = t_1 + t_2$ ,  $t_1$  y  $t_2$  siendo la duración del 1° y 2° palier. (Ver figura 17).

Por analogía en el caso donde la temperatura no varía y teniendo en cuenta los resultados del inciso 5.a hemos investigado una solución de la forma:



$$C_p = C_o + (C_{s_1} - C_o) \cdot FC \frac{P_o}{b_o D(C_p, T_1)t_1 + D(C_p, T_2)t_2} + (C_{s_2} - C_{s_1}) \cdot FC \frac{P_o}{b_o D(C_p, T_2)t_2}$$

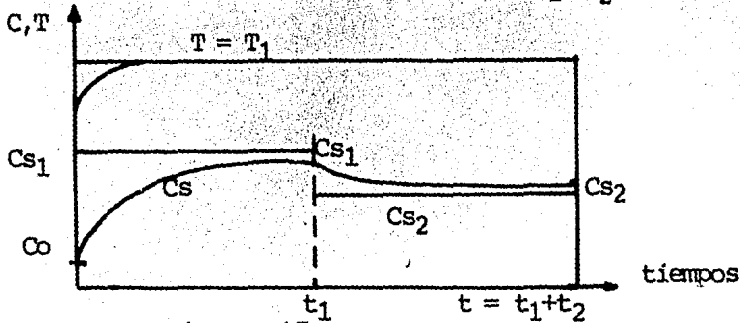


Figura 17.

La figura 18 muestra que utilizando el mismo valor  $b=30,33$  que le precede , las curvas ajustan correctamente los perfiles experimentales.

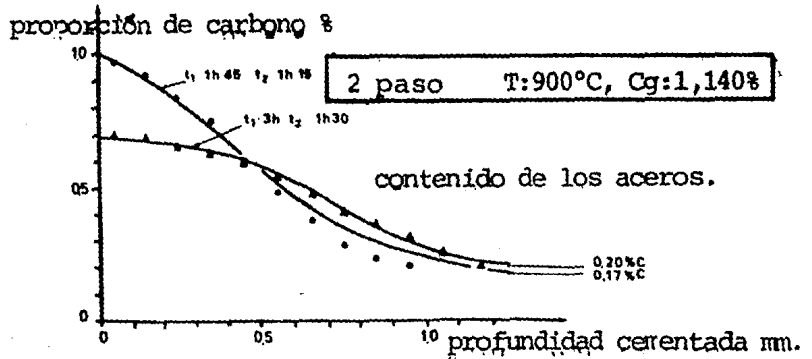


Fig. 18.- Perfiles experimentales y cálculos para un tratamiento a temperatura constante y un valor de  $C_{s_2} \neq C_{s_1}$ .

c.2) El potencial carbono y la temperatura varían simultáneamente.

Nos colocamos en las mismas condiciones que preceden, pero además, la temperatura toma un valor  $T_1$  durante la duración  $t_1$  y el valor  $T_2$  durante el tiempo  $t_2$ .

Los coeficientes de difusión serán entonces:

$$D_1 = D(C, T_1) \text{ y } D_2 = D(C, T_2)$$

En el caso particular donde  $Cs_1 = Cs_2$  la solución un perfil comprendido entre 2 perfiles límites  $C_1$  y  $C_{11}$  calculados tomando para la temperatura respectivamente el valor  $T_1$  y  $T_2$  durante el tiempo  $t$ , son:

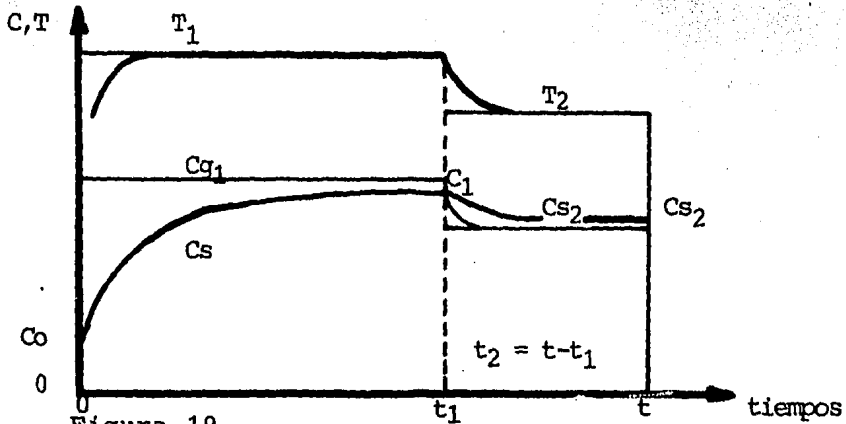


Figura 19.

$C_1 < C < C_{11}$  cualesquiera que sean  $P$  y  $t$ .

Se supone que la solución es ahora de la forma:

$C = Co + (Cs_1 - Co) FC \left[ \frac{P}{b\sqrt{D\bar{t}}} \right]$ ; donde  $D_2 < \bar{D} < D_1$ ; si  $T_1 \neq T_2$   
Nosotros hemos entonces escogido para  $D$  el valor:

$$\bar{D} = \frac{t_1 D_1 + t_2 D_2}{t_1 + t_2} \Rightarrow (t_1 + t_2) \bar{D} = t \cdot \bar{D} = D_1 t_1 + D_2 t_2$$

Esto que nos ha conducido a adoptar la solución siguiente:

$$C(P, t) = Co + (Cs_1 - Co) FC \left[ \frac{P}{b\sqrt{D_1 t_1 + D_2 t_2}} \right] + (Cs_2 - Cs_1) FC \left[ \frac{P}{b\sqrt{D_2 t_2}} \right]$$

Se podrá notar que esta solución engloba todos los casos particulares precedentes.

Es pues la solución empírica la más general del problema de la cementación realizada en 1 ó 2 pasos

sucesivos.

La figura 20 dá algunos ejemplos de la comparación con las pruebas que hemos realizado utilizando el mismo valor de  $Db^*$

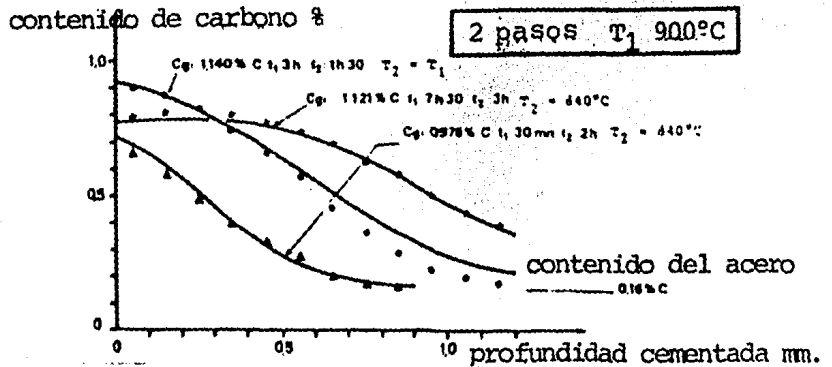


Fig. 20.- Caso general: perfiles experimentales y cálculos con  $T_2 \neq T_1$ ; y  $Cs_2 \neq Cs_1$

NOTA: la buena concordancia de los resultados experimentales y de la fórmula proveniente de elegir atina damente del término  $Dt = D_1t_1 + D_2t_2$ , que se ha encontrado por otra parte en la solución propuesta por Pavlóssoglou mostrada en el parágrafo "El potencial carbono y la temperatura varían simultáneamente y en el cual la analogía con la forma que hemos retenido es evidente en termino cerca  $\phi$ . Esto es pues una justificación suplementaria de la elección que hemos hecho.

d) Utilización práctica de la expresión.

Recordemos que en la mayoría de los casos sabemos que podemos determinar  $Cs$ , es siempre posible, en efecto, realizar una determinación experimental de éste valor, para una atmósfera dada en función del tiempo.

\* Ver fórmula págs. 194 y 195.

Pero para un tiempo suficiente, el conocimiento del potencial carbono puede ser suficiente, ya que es éste el que hemos hecho para conocer el valor de  $Cs_1$  de nuestro ensayo. De todas formas supondremos éste problema resuelto. El sólo parámetro a ajustar es ahora la constante  $b$ . En efecto, el valor retenido no conviene más que para los aceros estudiados.

Además si se sitúa en la cercanía de la discontinuidad, sobre una superficie no plana, o con una rugosidad muy diferente del caso estudiado, se podrá constatar una variación en la profundidad cementada, ya sea que el coeficiente de difusión no es el mismo, ya porque el flujo de carbono no depende más que de la profundidad como también de la zona de cambio en la superficie. Asimilamos éste efecto para, simplificar a una variación del coeficiente de difusión, es decir, que se supone que escogiendo otro valor de  $b$ , la fórmula presentada dará cuenta de los resultados experimentales.

Queda ahora encontrar el valor de  $b$  que ajustará mejor la curva experimental para el caso considerado. Sea  $b_0$  el valor "standard" determinado en nuestras pruebas. A una profundidad  $P_0$ , obtendremos una concentración en carbono calculada igual a  $C_p$  y tal que:

$$C_p = C_0 + (C_{s1} - C_0) \text{FC} \left[ \frac{P}{b \sqrt{D(C_p, T_1) t_1 + D(C_p, T_2) t_2}} \right] + \text{FC} \left[ \frac{P}{b_0 \sqrt{D(C_p, T_2) t_2}} \right]$$

Determinamos ahora experimentalmente a que profundidad  $P$  obtendremos el contenido  $C_p$ . Esto puede hacerse por un en

sayo preliminar de medida de microdureza. Si se conoce la relación entre esta dureza y el contenido de carbono (por ejemplo 0,4% C corresponde aproximadamente a 550 HV), es posible conocer un par de valores (Cp,P).

La curva que pasa por este punto debe entonces satisfacer la relación:

$$C_p = C_0 + (C_{s_1} - C_0) FC \left[ \frac{P}{b \sqrt{D(C_p, T_1) t_1 + D(C_p, T_2) t_2}} \right] + \left[ \frac{P}{b \sqrt{D(C_p, T_2) t_2}} \right] FC$$

Esta implica pues, que:  $\frac{P}{b} = \frac{P_0}{b_0}$

Por consecuencia:

$$b = \frac{P}{P_0} \cdot b_0$$

Es el verdadero valor de b para el caso considerado.

Ejemplo: Los ensayos presentados han sido válidos para las piezas torneadas. Cuando la pieza es arenosa (gran rugosidad), o rectificada, la profundidad cementada varía. Determinamos b en estos 2 casos (ver figura 21).

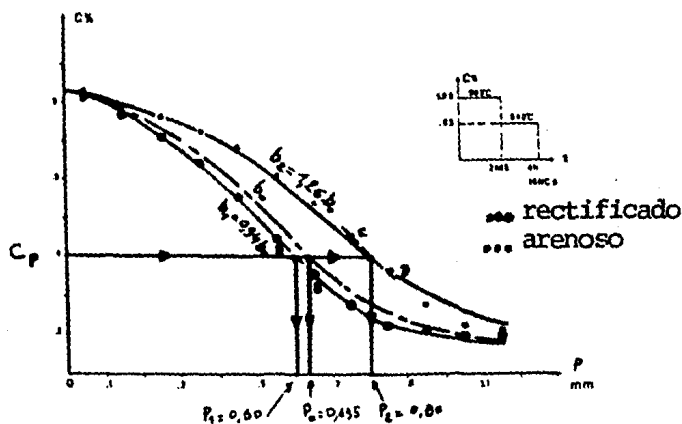


Fig. 21.- Determinación de la constante "b" por 2 probetas de acero 16 NC 6 respectivamente rectificadas y sin rectificar (arenosa)\*36\*

- La curva central se obtiene para el cálculo con  $b = b_0$  para  $C_p = 0,4\%$ , se determina  $p_0 = 0,635$ .  
 -Por interpolación lineal, entre los puntos experimentales A y B, C y D se determina la intersección con la horizontal  $C_p$  queda  $p_1 = 0,60$  y  $p_2 = 0,80$  de donde se deduce:

$$\frac{b_2}{b_0} \frac{p_2}{p_0} = 1,26 \text{ y } \frac{b_1}{b_0} \frac{p_1}{p_0} = 0,94;$$

- Las curvas extremas están calculadas con estos 2 valores.

Nota: los perfiles presentados pueden sorprender; la diferencia importante entre los 2 casos debe confirmada pero ésta no eleva nada el valor del ejemplo de aplicación expuesto.

#### e) Comparación de cálculo con otras pruebas.

Hemos comparado nuestros cálculos con los resultados de tratamiento de la literatura que se pueden asimilar en 1 o 2 pasos.

Los datos que han ayudado al trazo de perfiles carbono son los citados por los autores salvo en casos particulares que serán precisados. Notablemente, el contenido de carbono de la superficie al fin del tratamiento se supone conocido, hemos evidentemente conservado el valor exacto proporcionado por los resultados experimentales. Nuestro fin es en efecto mostrar que, en la medida donde al evolución del contenido en la superficie es bien conocido al fin del 1° y 2° palier, el perfil carbono puede entonces ser correctamente previsto.

##### e.1) Tratamiento en un sólo paso.

Los 3 puntos experimentales obtenidos de \*34\* son perfectamente lisos por la fórmula analítica presentada anteriormente utilizando rigurosamente el mismo valor

$b_0 = 30,33$ . Los parámetros de tratamiento están indicados sobre la figura 22.

Para poder ajustar correctamente los puntos con el cálculo, en el caso del perfil determinado por \*32\* figura 23, ha sido necesario escoger otro valor.

$b = 0,86b_0$  (coeficiente de difusión más débil). Se constata entonces que la forma del perfil está bien prevista por el cálculo teórico.

e.2) Tratamiento de dos etapas.

La dificultad esencial para trazar las curvas teóricas es la de conocer precisamente el contenido de carbono  $Cs_1$  al fin del primera etapa. Este valor puede ser determinado gráficamente como en el caso de la figura 24, por extrapolación. En efecto, durante el segundo palier muy corto, sólo el contenido de la superficie varía mucho, esto nos lleva a elegir  $Cs = 1,11\%$  que es por otro lado el valor definido por los autores. \*33\*

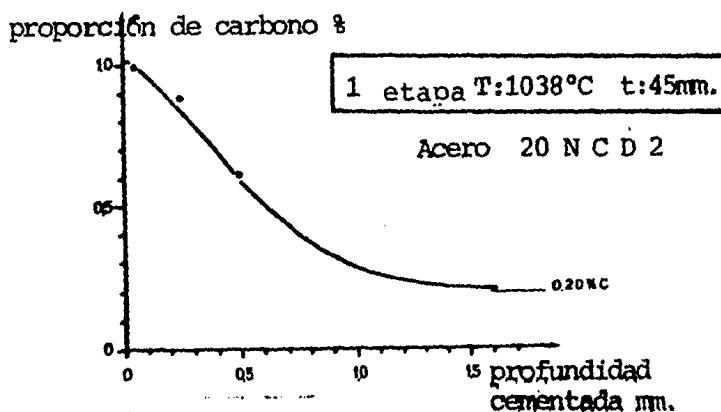


Fig. 22.- El perfil calculado es prácticamente confundido con el perfil determinado por los autores y no está representado aquí.

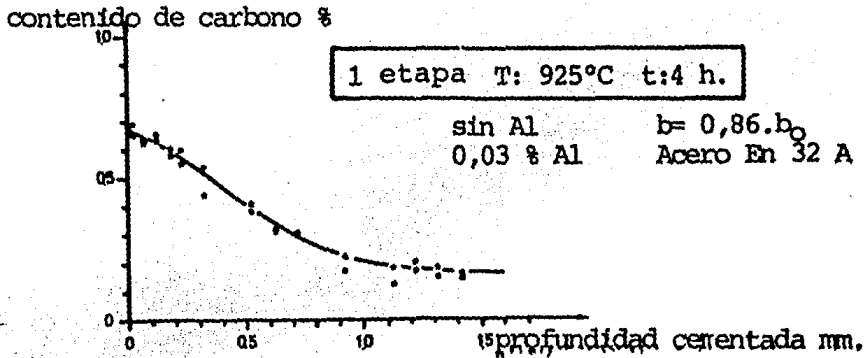


Fig. 23.- El valor "b" ha sido modificado según el principio de la figura 22.

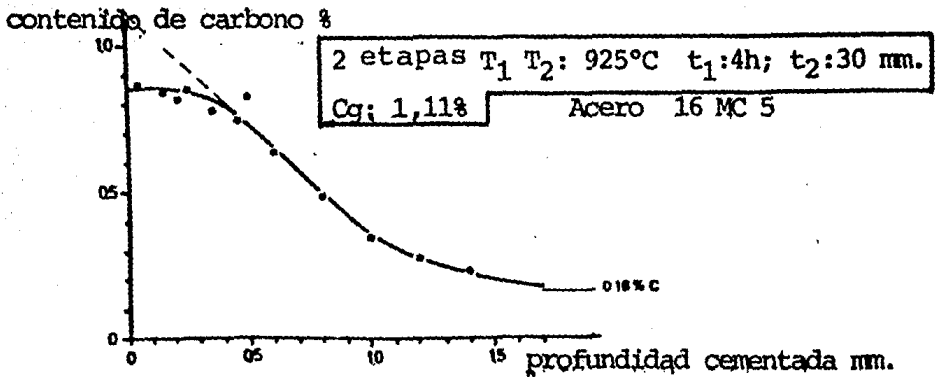


Fig. 24.- La extrapolación conduce a tomar para  $C_{s1}$  el valor 1,11%;  $b_0$  no es modificado.

Se puede constatar entonces que el perfil teórico se adapta perfectamente a los puntos experimentales. Los errores sobre  $C_{s1}$  son la fuente principal de errores de previsión. Sobre el esquema siguiente hemos reportado las condiciones experimentales previstas por los autores \*34\* del tratamiento de la figura 23, que se puede fácilmente asimilar a un tratamiento en dos etapas.



Para ajustar correctamente los puntos, conservando el valor  $b_0 = 30,33$  hemos debido utilizar el valor  $Cs_1 = 1,10\%$  en lugar de  $1,27\%$ , valor estimado.

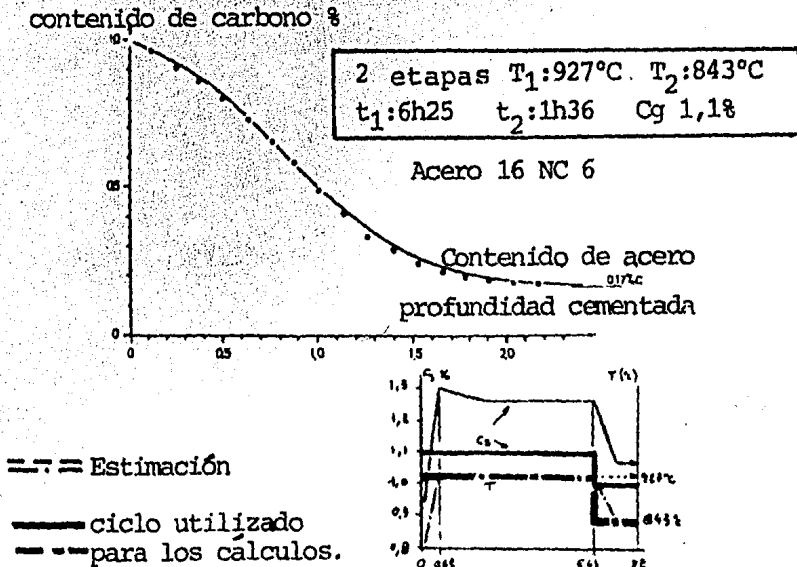


Fig. 25.- Aquí el esquema representativo de tratamiento.

Hemos reutilizado los mismos datos para prever el perfil en el caso del tratamiento cuyas condiciones son reportadas sobre el esquema de la figura 26 \*34\* Hemos, por otra parte, asimilado el tratamiento en un ciclo en dos etapas como se indica sobre la figura 26. Se ve que esta aproximación no nos conduce a los valores erróneos. Habría sido el caso si hubiéramos retenido para  $C_s$  el valor estimado a  $1,3\%$ .

f) Balance de los resultados

Los ejemplos citados muestran que las curvas experimentales están perfectamente ajustadas por la función relativamente simple que hemos presentado, a condición que los valores de  $Cs_1$  y  $Cs_2$  pudieran ser convenientemente estimados.

La ventaja de dicha aproximación, es precisamente dissociar los problemas, y después dar una fórmula que se adapte a todos los casos de tratamiento en dos etapas, mediante la determinación del coeficiente de difusión (real o ficticio) por un ensayo preliminar simple, para el caso examinado.

En muchos casos el valor de  $b_0$  es suficiente para dar una profundidad cementada correcta de 15%, en el peor de los casos.

La fórmula utilizada es simple de calcular. Constituye pues un medio más fácil de utilizar para investigar las condiciones óptimas de tratamiento, o la influencia de variaciones de tal o tal parámetro sobre el perfil final de la cementación.

Vamos pues a alcanzar nuestra meta que era poner a disposición del practicante una herramienta que puede ser fácilmente empleada en el mayoría de los casos prácticos que él encuentra, y con la ayuda de pequeños medios de cálculo como la programación sobre calculadoras de bolsillo, como la han realizado en Europa (CETIM)

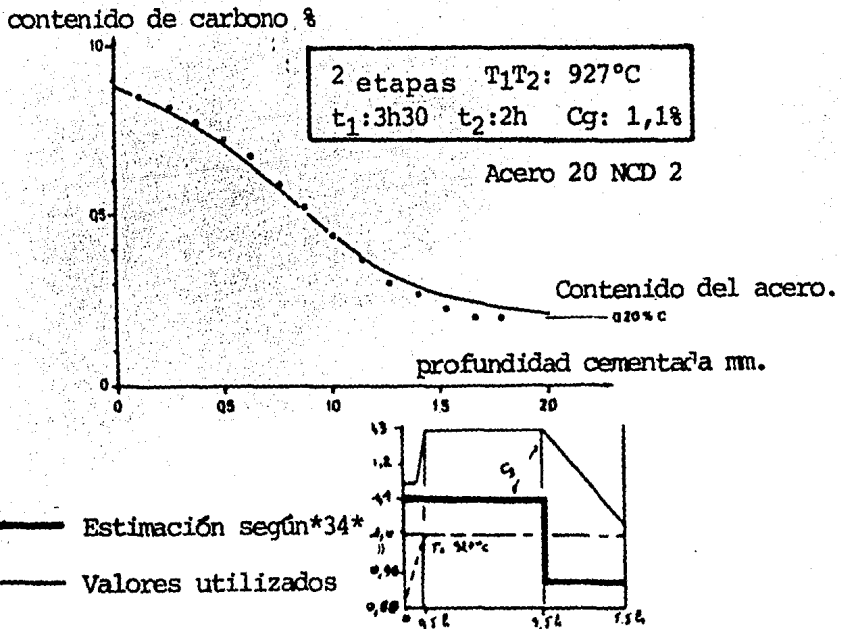


Fig. 26.- Aquí el esquema representativo del ciclo de tratamiento.

No es menos cierto que el éxito de tal aproximación está condicionado por la precisión de las medidas de control de la atmósfera de tratamiento que conducen a la determinación del potencial carbono (y luego indirectamente al valor del contenido de carbono en la superficie necesaria al cálculo). Conviene que cada quien realice su propia experiencia sobre la previsión del contenido de carbono en la superficie, en el caso preciso que le interese, esto es sin duda en la actualidad, el obstáculo mayor a franquear para llegar a una precisión suficiente en el conocimiento de los perfiles de carbono.

## 6) CONCLUSION

Inicialmente, hemos mostrado que la microestructura y las propiedades de piezas cementadas, estaban condicionadas en gran parte por el perfil del carbono introducido luego de la operación de cementación.

Por otra parte, se pueden calcular los principales parámetros de la microestructura a partir de este perfil en los límites indicados.

Pertenece al práctico del tratamiento térmico, realizar el perfil de carbono impuesto por las exigencias de funcionamiento de la pieza. Para eso se han desarrollado medios de cálculo de utilización simple que le permite escoger un ciclo de tratamiento mejor adaptado.

## 7) CARACTERISTICAS MECANICAS DE LA CAPA CEMENTADA

Las características de la capa cementada son casi siempre independientes de las del núcleo. Generalmente interesa que la dureza superficial sea superior a 60 Rockwell-C. aunque para algunas piezas que sufren poco rozamiento son suficientes durezas comprendidas entre 52 y 60 Rockwell-C.

Se consideran durezas muy buenas las mayores de 63 Rockwell-C; buenas las comprendidas entre 62 y 63 Rockwell-C y aceptables entre 60 y 62 Rockwell-C.

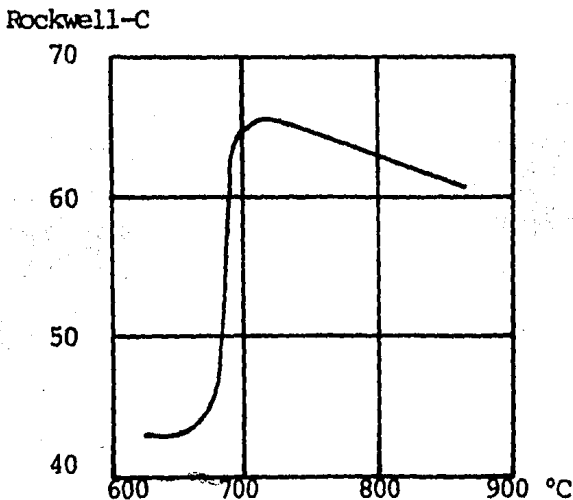
En piezas pequeñas estas durezas se consiguen lo mismo con los aceros al carbono (templados en agua) que con los aceros aleados (templados en aceite), siendo ventajosa la utilización de estos últimos, porque al templar en aceite disminuyen las deformaciones y se obtiene una gran uniformidad en los resultados. Con los aceros aleados con cromo y molibdeno se obtienen durezas ligeramente superiores a las que se consiguen con otros aceros y mayor resistencia al desgaste, debido a la formación de carburos complejos en la zona periférica.

Para comprobar la dureza de la capa cementada, además de las máquinas de dureza Rockwell y Vickers, es muy útil el uso de la lima, que, empleada con precaución y cuidado, rinde muy buenos servicios. Utilizando una lima fina y nueva, se pueden distinguir las piezas que tienen una dureza inferior a 60 Rockwell, que son rayadas con la lima, de las de mayor dureza que no son rayadas. Empleando este procedimiento, se puede controlar rápida y eficazmente la marcha de la fabricaca

ción de piezas que por su forma complicada no pueden ser ensayadas con las máquinas de dureza ordinarias.

En algunas ocasiones, generalmente no muy frecuente, no se llega a alcanzar en el temple de las piezas cementadas la dureza conveniente, debido a que en el calentamiento realizado para templar las piezas se descarbura la capa periférica y entonces la zona superficial queda con dureza baja. También suele ocurrir a veces en los aceros de alta aleación cromo níquel o cromo-níquel-molibdeno que después del temple de las piezas cementadas se obtienen durezas relativamente bajas de 60 a 61 RockwellC, inferiores a las que normalmente interesa obtener sin dificultad cuando esas piezas se fabrican con aceros de cementación al carbono o de baja aleación. Esta baja dureza suele ser debida a la presencia de austenita retenida en la capa cementada como consecuencia del empleo de temperaturas de temple demasiado elevadas. En estos casos la presencia de un elevado porcentaje de níquel en un acero de alto porcentaje en carbono y el empleo de altas temperaturas de temple, bajan las temperaturas  $M_s$  y  $M_f$  correspondientes al comienzo y al fin de las transformaciones de austenita en martensita. Este problema se suele solucionar fácilmente templando a temperaturas inferiores a las que dieron durezas bajas. El problema se suele presentar también en parte porque al ser las temperaturas de temple de la capa cementada de estos aceros relativamente bajas,  $740^\circ$  a  $770^\circ\text{C}$ , inferiores a las que normalmente se emplean para los demás aceros

de cementación, hay una tendencia natural en todos los talleres a emplear temperaturas de temple demasiado altas.



Influencia de la temperatura de temple en la dureza de la capa cementada de un acero de cementación cromo-níquel de la sig. composición: C=0,08%; Cr=0,76% y Ni=3,10%.

#### 8) MEDIDA DEL ESPESOR DE LA CAPA CEMENTADA Y DE LA CAPA DURA

Para conocer en los procesos de cementación la penetración del carbono, se pueden emplear varios procedimientos.

El más sencillo consiste en cementar junto con las piezas, dos o tres varillas, del mismo material, de 6 a 12 mm. de diámetro. Después de montadas se tiemplan a 800° en agua y se rompen, pudiendo observarse en la fractura una capa periférica dura, que presenta un grano mucho más fino que el núcleo y que señala con bastante aproximación la penetración del carbono. Al mismo tiempo, se puede conocer si ha crecido o no el grano del núcleo durante la cementación.

Otro método consiste en cortar las varillas después de cementadas, pulir las secciones transversales y atacarlas durante

treinta segundos con ácido nítrico al 5%. Las zonas cementadas se ennegrecen y se pueden medir con más precisión que en el caso anterior el espesor de esas zonas, que tienen un contenido de carbono superior a 0,50%.

El examen microscópico sirve para estudiar con gran claridad el avance de la cementación. Un procedimiento muy empleado consiste en cortar las piezas o probetas cementadas, después de la cementación y antes del temple final, rectificando y puliendo luego la sección transversal. Se ataca con Nital-5 y se mide el espesor del anillo periférico de color negro, que corresponde a la carga cementada, con un microscopio de retícula graduada, empleando 10 a 50 aumentos. Las estructuras recocidas de los aceros cementados, que son de tipo perlitico, son las que dan mejor idea del proceso y son también las más claras y más fáciles de observar. Para estudiar el avance de la cementación, basta en general con pocos aumentos (es suficiente con 10 a 100 aumentos).

El análisis químico da también una idea muy exacta de la operación. Para realizarlo, conviene utilizar unos cilindros del acero que se quiere estudiar, de 15 a 20 mm. de diámetro y 100 a 200 mm. de longitud, que después de cementados con el resto de las piezas son torneados con ligeras pasadas de 1/10 de mm. (Recogiendo y analizando el contenido de carbono en la viruta de acero).

A continuación explicamos un método para determinar la profundidad de la capa dura. Este ensayo se hace cementando y tem-



plando una varilla cilíndrica de 100 mm. de longitud y de 10 a 30 mm. de diámetro, de la misma clase de acero con que se han fabricado las piezas, a la que se hace un rectificado ligeramente cónico, de forma que en uno de los extremos se conserve el diámetro inicial, y en el otro desaparezca completamente la capa cementada. Se hacen durezas a lo largo de toda la generatriz y se anotan los resultados. Se observará que la dureza varía de un extremo al otro, existiendo una zona de máxima dureza, en la que los resultados son casi constantes. El espesor de esa zona señala la profundidad de la capa dura.

Los resultados que se obtienen al hacer el ensayo en la forma señalada variarán según sea la máquina de dureza empleada. Si se emplea máquina Vickers, el espesor que se obtiene para la capa, con dureza superior a 700 Vickers, por ejemplo, será mayor cuanto menor sea la carga empleada. Esto es debido a que al emplear las mayores cargas la punta de diamante llega antes a la zona blanda que cuando se emplean cargas pequeñas. Para piezas cementadas destinadas a la fabricación de automóviles y máquinas ligeras, es muy utilizada la dureza Rockwell-C y se consideran aceptables los espesores que con la carga de 150 Kg. dan cifras Rockwell-C superiores a 62. Otro método para determinar el espesor de la capa dura, es el microscópico. Se cortan transversalmente las piezas a ensayar y se hacen ensayos de microdurezas, observando a partir de

qué punto la dureza del material es inferior a 700 ó 750 Vickers, por ejemplo.

En los ensayos de microdureza suelen emplearse cargas variables de 10 a 150 gramos.

## VII. INVESTIGACION EMPIRICA DE LA CEMENTACION.

### 1) DESCRIPCION DEL PROCESO.

El tratamiento termoquímico se realizó con cementante sólido y cuyo procedimiento fué:

Se cortaron redondos de 1" x 16 de acero 1018, se limpiaron de grasa, polvo, óxido, ó posible humedad.

Las cajas para cementar redondos huecos de 40 y 3/16" de espesor a estos se les soldó una tapa de 5x5" y 3/16" de espesor y la otra sellará herméticamente sujeta con alambres y material refractario.

Para impedir que el gas producido no se fuera hacia la pared de la caja, ésta se cubrió con cristobalita, material refractario, que además de sellar las cajas, conservará una temperatura homogénea en el interior, semejante a un termo.

El cementante usado es el llamado CARON: 15% de carbonato de bario y carbón vegetal bien molido, mezclandose perfectamente.

Se llenan las cajas hasta un tercio de su capacidad, compactando el cementante, entonces se introducen los redondos a cementar, llenando entonces totalmente la caja con el cementante; además se le colocarán unos trocitos de cartón para que el oxígeno existente en la caja sea eliminado cuando la temperatura se eleve durante el tratamiento quemandose éstos.

La hermeticidad se logrará sujetando fuertemente la tapa con alambre y sellandola con cristobalita, que es el material refractario, anteriormente aludido. Este refractario se dejará secar (se dejará secar por 24 horas la cristobalita al aire, con el fin de que no sufra contracturas que rompan la hermeticidad del sellado). Ya realizado esto, se meterán las cajas al horno duran

te una hora a 100°C para eliminar totalmente cualquier rastro de humedad.

Ya hecho estos se procederá a realizar la cementación, teniendo en cuenta los siguientes parámetros:

La temperatura se varió entre 900 y 950°C y el tiempo entre 8, 10 y 12 horas de permanencia, a partir de que las cajas llegaran a la temperatura.

Ya cumplidos estos parámetros, cada caja es sacada y dejada enfriar al aire durante 15 minutos sin destaparla, posteriormente se cortarán los alambres y se romperá el sello extrayendo las muestras y templándolas al agua, siendo así lo más estricto y obtener la mayor dureza.

Las durezas se tomaron sin tratamiento térmico, con el tratamiento termoquímico y después del temple. (TABLA I).

Las durezas tomadas fueron del tipo Rockwell-B (con bola de acero de 1/16", en la escala roja con 100 Kg), del tipo macroscópica del extremo al centro y la microdureza tomada en Vickers (HV), con punta de diamante en forma piramidal con 200 gr de presión.

Con el microscopio se pudo ver las diferentes huellas dejadas y las variaciones que tuvo la capa cementada con respecto a la temperatura y al tiempo de permanencia, que lamentablemente variaron en forma significativa en la misma pieza por defectos de la cementación.

Cuando las cajas no fueron selladas absolutamente, la cementación no fué la deseada por lo que aparecieron puntos blancos, oxidación ó la superficie carbonizada.

Las desventajas encontradas en este proceso fueron: muchas ho-

ras para cada tratamiento, un excesivo consumo de energía, que las cajas deben estar perfectamente selladas, muy sucio y no se pudo garantizar la homogeneidad en el interior de la caja. Por lo que en la actualidad este método ha sido sustituido por la cementación con gases que es rápido, limpio y más seguro, además de que no contamina el ambiente.

## 2) COMENTARIOS Y CONCLUSIONES.

Con lo anterior se pudo constatar que la cementación realmente se realiza y que tanto la dureza como el espesor de la capa varían con los parámetros antes considerados.

Se pudo observar y tomar fotografías de las diferentes muestras, constatando realmente que la estructura del acero varía de forma definitiva durante el proceso y de la penetración del carbono en la superficie del acero. También se observó que los aceros de más alto contenido de carbono en vez de ganarlo lo pierden durante el proceso, siendo al menos por este proceso la cementación muy irregular en estos aceros tendiendo principalmente a la descarburación.

Este procedimiento es bueno para constatar que la cementación se realiza pero realmente para obtener una buena cementación lo mejor es usar cementantes gaseosos, como se pudo constatar no sólo por la experimentación hecha sino por todo el trabajo anteriormente realizado.

## 3) TABLA DE RESULTADOS.

ACERO 1018

VICKERS 200 grs PIRAMIDE DE DIAMANTE					ROCKWELL-B ESC. ROJA 100Kg B.ACERO 1/16"
CARBURADAS SIN TEMPLE		CARBURADAS CON TEMPLE			SIN TRATAMIENTO TERMICO
900°C	micras	VHN	micras	VHN	RcB
8 Hrs	31,8	367	15,3	1399	77,5
	31,3	379	16,9	1238	76,5
	29,3	432	18,0	1128	75,7
	29,7	420	18,0	1128	73,0
	28,9	457	18,2	1117	72,2
12 Hrs	32,3	355	17,0	1229	80,8
	31,8	367	20,0	927	82,5
	29,4	429	23,7	660	81,0
	31,6	371	24,0	644	81,4
	31,9	364	24,5	618	74,5
16 Hrs	28,1	470	16,4	1288	76,3
	29,5	426	16,7	1257	78,3
	30,3	404	18,7	1055	71,0
	28,6	453	19,0	1027	76,6
	26,1	544	20,0	927	78,8
950°C	micras	VHN	micras	VHN	
8 Hrs	28,8	447	18,5	1075	
	29,0	441	18,8	1045	
	29,1	438	19,1	1017	
	28,5	457	19,7	955	
	30,0	412	20,4	903	
12 Hrs	38,1	255	18,5	1075	
	36,8	274	18,0	1128	
	34,6	310	18,0	1128	
	35,7	291	20,0	927	
	36,8	274	18,5	1075	
16 Hrs	29,8	418	18,4	1086	
	29,0	441	18,2	1117	
	28,8	447	17,8	1146	
	29,5	426	18,1	1117	
	30,4	401	18,4	1086	

\* Temperatura de temple 875°C

\* Las lecturas fueron tomadas del extremo al centro cada 4 micras.

## ACERO 1045

		VICKERS 200 grs PIRAMIDE DE DIAMANTE				ROCKWELL-B ESC. ROJA 100KG B.ACERO 1/16"	
		CARBURADAS SIN TEMPLE		CARBURADAS CON TEMPLE		SIN TRATAMIENTO TERMICO	
900°C		micras	VHN	micras	VHN	RcB	
8 Hrs	33,1	339	26,8	516		88,5	
	36,4	280	27,4	494		89,0	
	41,5	215	27,7	483		87,5	
			29,0	441		89,3	
			21,3	817		87,5	
12 Hrs	30,3	404	21,2	825		88,1	
	33,3	334	20,9	849		87,6	
	36,2	283	20,0	927		90,3	
			22,4	739		88,0	
			36,3	281		88,5	
16 Hrs	28,2	466	17,7	1156		89,2	
	32,0	362	18,2	1177		89,6	
	34,0	321	17,6	1166		90,2	
			19,3	996		89,0	
			32,1	360		89,6	
950°C		micras	VHN	micras	VHN		
8 Hrs	29,0	441	15,3	1399			
	29,7	420	17,8	1146			
	35,5	294	18,6	1045			
			33,2	336			
			34,9	304			
12 Hrs	29,0	441	16,2	1309			
	33,6	329	18,6	1065			
	34,4	313	19,4	985			
			40,0	232			
			33,6	329			
16 Hrs	29,1	438	18,7	1055			
	32,5	351	19,7	955			
	32,0	362	19,5	975			
			32,6	349			
			41,8	212			

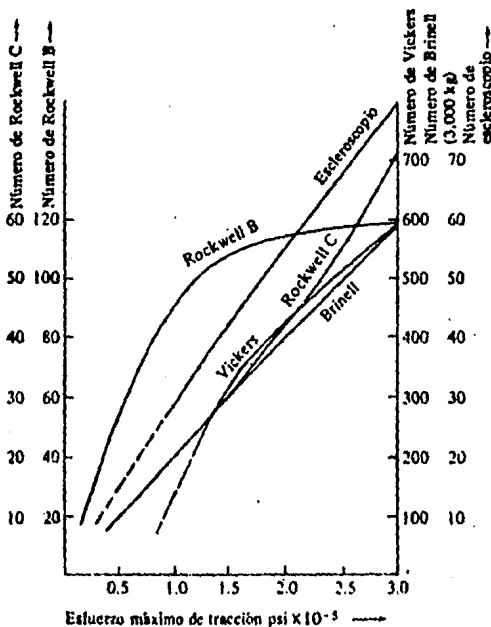
\* Temperatura de temple 800°C

\* Las lecturas fueron tomadas del extremo al centro cada 4 micras.

## ANEXO 1

Número de dureza Vickers (VHN).

Este constituye una mejora al ensayo de Brinell. Se presiona una pirámide de diamante contra la probeta, bajo cargas más livianas que las utilizadas en el ensayo Brinell. Se mide la diagonal de la impresión cuadrada y se localiza en una gráfica el número de dureza Vickers (VHN). Como nos lo muestra la siguiente figura, el VHN es similar al BHN en el intervalo de 250-600. Esta figura no muestra que el VHN aumenta a la par con la resistencia en los valores más altos, mientras que el BHN no se utiliza más allá de 750. Las ventajas del ensayo de Vickers está en su capacidad de obtener medidas de dureza en niveles más altos y para medir la dureza de zonas pequeñas. Por otro lado, el BHN nos da un mejor efecto promedio debido a que su impresión es más grande.



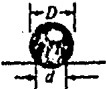

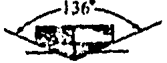







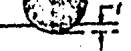

Valores para convertir ensayos  
Brinell, Vickers y Rockwell.



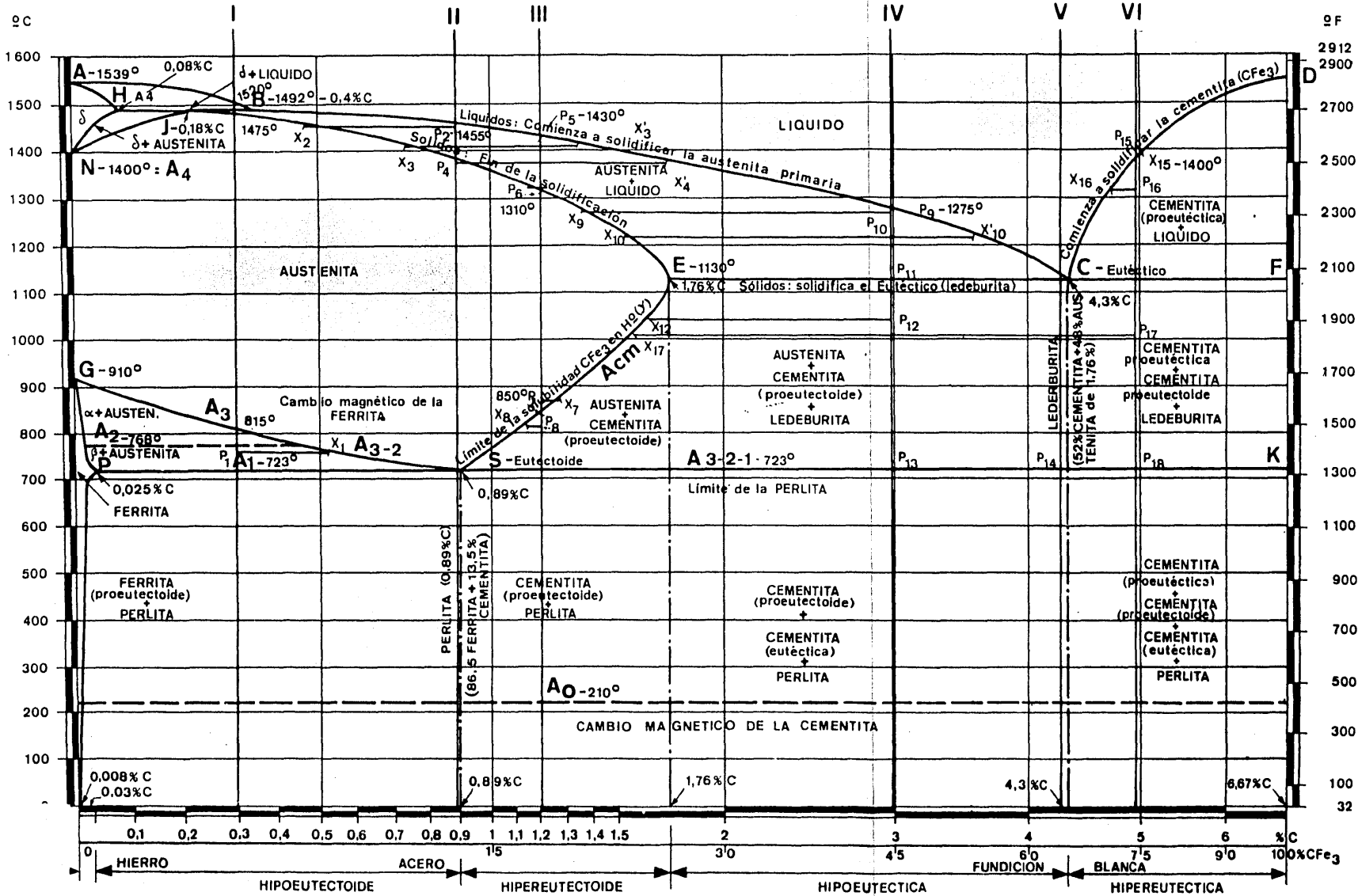
Ensayo de dureza Rockwell (RcA , RcB, etc).

La principal ventaja del ensayo del Rockwell está en que la dureza se lee directamente en una escala. El indentador para el ensayo RcC es un cono de diamante "brale" debidamente montado en un soporte. El observador primero acciona una palanca que presiona el cono de diamante a una pequeña distancia establecida dentro de la probeta. Esto se conoce como la "pre-carga". En seguida se deja actuar la carga RcC normalizada de 150 Kg (ver siguiente figura), que presiona aún más el diamante dentro de la probeta, Luego con la misma palanca se quita la carga. En este momento se lee la dureza RcC en la escala y, luego se descarga la probeta. El principio de este ensayo está en que a través de un sistema de palancas se registra en la escala la profundidad de penetración entre la precarga y la carga de 150 Kg y se lee directamente en RcC. El RcC es aproximadamente  $1/10$  BHN(ver siguiente figura). La escala RcB se utiliza para materiales más blandos, emplea una esfera de  $1/16$  de pulgada de diámetro a una carga de 100 Kg y también es la lectura directa. Existen asimismo, máquinas de ensayo Brinell que dan una lectura directa.

Forma de la indentación

Ensayo	Indentador	Vista lateral	Vista superior	Carga	Fórmula del número de dureza
Brinell	Esfera de acero o carburo de tungsteno de 10 mm de diámetro			P	$BHN = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$
Vickers	Pirámide de diamante			P	$VHN = 1.72 P/d_1^2$
Microdureza de Knoop	Pirámide de diamante	 $l/t = 7.11$ $b/t = 4.00$		P	$KHN = 14.2 P/l^2$
Rockwell					
A C D	Cono de diamante			60 kg 150 kg 100 kg	$R_A =$ $R_C =$ $R_D =$ } 100 - 500t
B F G	Esfera de acero de 1/8 pulgadas de diámetro			100 kg 60 kg 150 kg	$R_B =$ $R_F =$ $R_G =$ } 130 - 500t
E	Esfera de acero de 1/4 pulgadas de diámetro			100 kg	$R_E =$

# DIAGRAMA HIERRO ~ CARBONO



## A N E X O 3

## GRUPO F-150-F-160.—ACEROS PARA CEMENTAR

GR.A.	Designación común	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	V
F-151	Aceros para cementación al C .....	0,08-0,12	0,30-0,40	0,15-0,35	< 0,04	< 0,04	—	—	—	—
F-152	Aceros para cementación al Ni, de 75 kilos por mm <sup>2</sup> .....	0,10-0,15	0,30-0,60	0,10-0,35	< 0,04	< 0,04	3,00-3,50	—	—	—
F-153	Aceros para cementación al Cr-Ni de 125 Kg./mm <sup>2</sup> .....	0,10-0,15	0,30-0,60	0,10-0,35	< 0,04	< 0,04	3,80-4,50	0,90-1,10	—	—
F-154	Aceros para cementación al Cr-Ni, de 95 Kg./mm <sup>2</sup> .....	0,10-0,15	0,30-0,60	0,10-0,35	< 0,04	< 0,04	2,25-3,00	0,50-0,80	—	—
F-155	Aceros para cementación al Cr-Mo, de 95 Kg./mm <sup>2</sup> .....	0,12-0,15	0,30-0,60	0,10-0,35	< 0,04	< 0,04	—	1,00-1,30	0,15-0,35	—
F-156	Aceros para cementación al Cr-Ni-Mo, de 135 Kg./mm <sup>2</sup> .....	0,12-0,18	< 0,50	0,10-0,35	< 0,04	< 0,04	3,80-4,50	0,90-1,10	0,15-0,35	—
F-157	Aceros para cementación al Cr-Ni-Mo, de 105 Kg./mm <sup>2</sup> .....	0,12-0,18	< 0,50	0,10-0,35	< 0,04	< 0,04	2,50-3,50	0,50-0,80	0,25-0,35	—
F-158	Aceros para cementación de baja aleación, de 185 kilos por mm <sup>2</sup> .....	0,15-0,20	0,40-0,70	0,10-0,35	< 0,04	< 0,04	1,80-2,20	1,80-2,20	0,15-0,20	—
F-159	Aceros para cementación de baja aleación, de 90 kilos por mm <sup>2</sup> .....	0,15-0,20	0,40-0,70	0,10-0,35	< 0,04	< 0,04	1,50-2,00	0,40-0,60	0,15-0,25	—

TEMPERATURAS M<sub>s</sub> DE TRANSFORMACION DE LA AUSTENITA EN MARTENSITA.  
Y DIAMETROS CRITICOS IDEALES Y PRACTICOS PARA TEMPLE EN AGUA Y ACEITE  
DE LOS ACEROS PARA CEMENTAR (CALVO RODES)

Acero	M <sub>s</sub> °C	Diámetro crítico ideal, en pul- gadas	Diámetro crítico práctico. Temple en agua (H=1) en mm.	Diámetro crítico práctico. Temple en aceite, agita- ción moderada (H=0,4) en mm.
F-151	501			
F-152	435	0,75	6,3	8,3
F-153	399	3,0	54,0	36,0
F-154	433	1,65	23,6	14,9
F-155	458	1,4	18,5	10,5
F-156	381	4,3	87,0	64,0
F-157	411	2,8	48,8	34,7
F-158	393	5,44	114,0	89,0
F-159	427	2,2	35,0	23,3

## A N E X O 4

Segunda ley de Fick.

Si deseamos un contenido de carbono  $C_x$  a una profundidad  $X$  para dar resistencia adecuada al desgaste y resistencia, necesitamos esperar un tiempo  $t$  de acuerdo con la temperatura del horno que estemos usando.

La relación que gobierna estas condiciones es una solución de la segunda ley de Fick:

$$\frac{C_s - C_x}{C_s - C_o} = \text{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$$

en donde:

- $C_s$  = concentración superficial de carbono producida en forma inmediata por la atmósfera (una constante).
- $C_o$  = concentración uniforme inicial de carbono a través del acero.
- $C_x$  = concentración de carbono a una distancia  $X$  de la superficie a un tiempo  $t$ .
- $X$  = distancia de la superficie.
- $D$  = difusividad, (como se describirá en el siguiente inciso)
- $t$  = tiempo.

La cantidad  $\text{erfc}$  se llama "función error" y puede en la siguiente tabla normalizada. En otras palabras, sustituimos valores numéricos para  $X$  y  $Dt$  y luego encontramos la función de error del resultado.

Un punto clave es que si  $C_o=0$ , entonces

$$\frac{C_x}{C_s} = 1 - \text{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$$

Entonces a medida que aumenta  $D$  o  $t$ , la expresión  $\text{erfc}$  se vuelve más pequeña y  $C_x/C_s$  se acerca a 1. En otras palabras,  $C_x$  se aproxima a la concentración superficial.

TABLA DE LA FUNCION ERROR

Z	erfc Z	Z	erfc Z	Z	erfc Z
0	0	0,50	0,521	1,30	0,934
0,025	0,028	0,60	0,604	1,40	0,952
0,05	0,056	0,70	0,678	1,50	0,966
0,10	0,113	0,80	0,742	1,60	0,976
0,15	0,168	0,90	0,797	1,80	0,989
0,20	0,223	1,00	0,843	2,00	0,995
0,30	0,329	1,10	0,880	2,40	0,999
0,40	0,428	1,20	0,910	∞	1,0

Nota. Ver ejemplo página 114, Materiales de ingeniería y sus aplicaciones Richard A. Flinn y Paul K. Trojan.

Efectos de la temperatura.

En las leyes de Fick (primera y segunda), vimos que el movimiento del material que se está difundiendo es proporcional a la difusividad D. Con lo que se espera que D aumente con la temperatura, ya que el movimiento atómico y el número de vacantes aumentan. La relación obedece a la ecuación:

$$D = Ae^{-Q/(RT)}$$

donde A = constante

Q = constante para la sustancia que se está difundiendo y el solvente involucrado.

R = constante de los gases (1,987 cal/mol-K)

T = temperatura absoluta (K)

Entonces, tomando log<sub>e</sub> en ambos lados, tenemos

$$\ln D = \ln A - \frac{Q}{RT}$$

que es una ecuación de una línea recta si hacemos una gráfica de lnD contra 1/T.

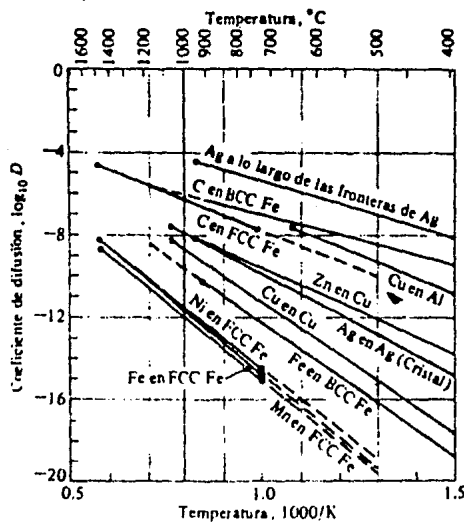
La importancia de este enfoque es que si determinamos D solamente para 2 temperaturas podemos resolver A y Q y obtener una relación general para cualquier temperatura. En un caso práctico, si deseamos estimar el efecto que tiene el cambio de temperatura del horno para carburizar una pieza de acero,

podemos calcular el tiempo requerido a la nueva temperatura para obtener resultados equivalentes.

Nota. Ver ejemplo página 115, Materiales de Ingeniería y sus aplicaciones, Richard A. Flinn y Paul K. Trojan.

Otros efectos de la difusión.

Es interesante analizar el valor de  $D$  para diversas combinaciones de materiales (ver figura). Nótese en particular que los de pequeño diámetro que forman las soluciones sólidas intersticiales se difunden más rápidamente. La tasa de difusión más rápida del carbono en el hierro BCC comparada con la del hierro FCC es paradójica hasta que recordamos que la celda BCC es una estructura menos densa. Por lo tanto, a pesar de que hay más espacio en los centros de las celdas FCC para los átomos de carbono, los pasadizos para el movimiento de carbono a través de la celda unitaria más angostos.



Variación de la difusividad  $D$  como función de la temperatura para varios materiales.

El papel que juegan las dislocaciones y los límites de los granos es también importante. El empaquetamiento menos compacto conduce a un movimiento más rápido de la sustancia que se está difundiendo y esto puede llevar a un factor de penetración, a lo largo de los límites de los granos, tan alto como 10:1.



BLIBLIOGRAFIA GENERAL

- 1) APRAIZ BARREIRO, José, Aceros especiales y otras aleaciones, Ed. Dossat, 4<sup>a</sup> Edición, 1977, Madrid.
- 2) APRAIZ BARREIRO, José, Fabricación de hierro, acero y fundiciones, Ed, Urmo S.A, de Ediciones Espartero, 10 Bilbao-9 (España).
- 3) APRAIZ BARREIRO, José, Tratamientos térmicos de los aceros, Ed, Dossat, 7<sup>a</sup> Edición, 1971, Madrid.
- 4) COMPILADO POR EL DEPARTAMENTO DE: TECNIPRESS INGENIEROS ED., Aceros productos y derivados, Ed. Tecnipress, C.A, Villarías 10-2° Bilbao-1 (España).
- 5) CALVO RODES, Metales y aleaciones, Tomos I, II, Int.Nac. Técnica Aeronáutica.
- 6) KULKARNI, A.G, Cementation Technique for Coating Fibres, Natl Aeronaut Lab, Bangalore, India.
- 7) Dr. Ing. LASHERAS ESTEBAN, José María, Prof. SANCHEZ-MARIN PIZARRO, José María, Tecnología de los materiales industriales, Ed. CEDEL, 3<sup>a</sup> Edición, 1971, Barcelona, España.
- 8) A. HIGGINS, Raymond, Ingeniería Metalúrgica, Ed. CECSA, Tomo II.
- 9) IZU VYSSH UCHEBN ZAVED, Chern Metall, 1977.
- 10) DE GARMO, E. Paul, Materiales y procesos de fabricación, Ed. Reverté, España.
- 11) L. BEGEMAN, Myron, AMSTEAD, B.H., Procesos de fabricación, Ed. CECSA.
- 12) SABEUR, Albert, The Metallography and Heat Treatment of Iron and Steel, Ed. Mc Graw Hill Book Co. Inc. México.

BIBLIOGRAFIA ESPECIFICA

## V.4) CEMENTACION POR INSTILACION DE LIQUIDOS.

- \*1\* Patente US n° 3.201.290 del 17 de agosto de 1965. Depositados en Suiza el 27 de junio de 1960.
- \*2\* WYSS, U., Bases de la cementación gaseosa y de recocido bajo atmósfera protectora con un nuevo método de instilación de líquido: Hart, Techn. Mitt., octubre 1962, 17, n° 3, p. 160.
- \*3\* Ibidem. Revista Metalúrgica, junio 1963, 60, n° 6, p. 557.
- \*4\* WYSS, U., Cementación gaseosa para el proceso de gota a gota en Suiza. Progreso Metálico, enero 1963, p. 86-89.
- \*5\* NEUMANN, F.; WYSS, U., El efecto cementante de mezclas gaseosas del sistema  $H_2/CH_4/H_2O-CO/CO_2-N_2$ . Hart, Tech. Mitt., diciembre de 1970, 25, n° 4, p.253.
- \*6\* Cementación gaseosa. Monografías ASM sobre el tratamiento técnico, ASM, 1964, p. 108-109.

## VI.1) DOMINIO DE LA MICROESTRUCTURA EN LA CEMENTACION POR LA PREVISION DE LA SECCION DE CARBONO EN VISTA A OBTENER LAS PROPIEDADES DE EMPLEO DESEADAS.

- \*1\* TOURNIER, C.; PEYRE, J.P.; LECROISEY, F.; SECHAUD, R., Selección de un tratamiento superficial: la cementación. CETIM Informe n° 55.
- \*2\* BEUMELBURG, W., Comportamiento de probetas cementadas presentando diversos estados superficiales, contenidos de carbono variables en superficie luego de pruebas de flexión rotativa, flexión estática y resiliencia. Exposición presentada en la reunión AIT del 26 de marzo de 1976.
- \*3\* WYSZKOWSKI, H.; PREIGNITZ, E.; GOZDZIK, A.; RATLIEWCS. Influencia de la austenita residual sobre algunas propiedades del acero cementado. Revista Metalúrgica, Vol. 68, n° 6 junio 1971.

- \*4\* PARRISH, G., La influencia de la microestructura en las propiedades en el caso de componentes cementantes. Heat Treatment of Metals, 1976, 4.
- \*5\* RAZIM., Influencia de la austenita residual sobre la resistencia mecánica de probetas cementadas sometidas a esfuerzos alternados. Revista de metalúrgica, febrero, 1969.
- \*6\* TOURNIER, C.; BRUCELLE, A; LECROISEY, F., Influencia de las condiciones de cementación sobre la presencia de austenita residual antes del templado. Papel de esta austenita en el comportamiento en servicio de piezas mecánicas. Reporte CETIM, estudio 12G 080, abril 1979.
- \*7\* SAGARADZE, V.S., Efectos del contenido de carbono en la fuerza del acero cementado. Ciencia metálica y tratamientos de calor, marzo 1970, n°3.
- \*8\* EBERT, L.J., El papel de tensiones residuales en el comportamiento mecánico en el caso de aceros cementados. Transacción metalúrgica, vol. 9A, noviembre 1978.
- \*9\* ODORICO, J., BLONDEL, J., SERTOUR, G., Tensiones superficiales y tendencia a la fatiga sobre acero cementado. Entropía n° 36, nov-dic., 1970.
- \*10\* A.T.T.T. Los tratamientos térmicos de los aceros bajo atmósferas. PYC, edición 1980.
- \*11\* A.S.M. Manual metálico, vol. 1. 8a. edición, 1961.
- \*12\* TOURNIER, C.; PEYRE, J.P., Elección de los aceros y de sus tratamientos térmicos. CETIM, Informe n° 70.
- \*13\* MURRY, G., Método práctico de previsión de la respuesta de un acero a los tratamientos térmicos. Colección ATS OTUA, 1976.
- \*14\* ROSE, A; HOUARDY. Atlas sobre tratamientos del acero. Max Planck Für Eisenforschung. Verlag Stahleisen MBH. Düsseldorf 1972.
- \*15\* COLLIN, R.; GUNNARSON, S.; THULIN, D. Ein Mathematisches Model zur Berechnung von Aufkohlungs-Profilen bei der Gasaufkohlung. Härterei Techn. Mitt. 25/1970, Heft 1.
- \*16\* ELLIS. Algunas propiedades termodinámicas del carbono en austenita. JISI Inst. 201 (1963) S582.

- \*17\* NEUMANN, B. PERSON, Beitrag zur Metallurgie der Gasaufkohlung. Hart. Techn. Mitt, 23 (1968) Heft 4.
- \*18\* KOISTINEN, D.P., MARBURGER, R.E. Una ecuaci3n general que describe la extensi3n de la transformaci3n de austenita martensita en acero puro, aleaciones de carbono y aceros sencillos. Acta metal3rgica 1959, vol. 7.
- \*19\* HARRIS, W.J.; COHEN. Trans ASME 180, 1949, p. 447.
- \*20\* BROOK, R.; Entwistle, A.R.; IBRAHIM, E.F.; JISI 195, 1960, p. 292.
- \*21\* ANDREWS, K.W.; F3rmula emp3rica para el cálculo de algunas temperaturas transformadas. JISI julio, 1965.
- \*22\* HAYNES, A.G., Influencia de temperaturas iguales y enfriamiento continuos en tratamientos de calor en aceros de baja aleaci3n y su significancia práctica. Reporte sobre tratamientos t3rmicos en metales especiales 95-13-23 JISI, 1966.
- \*23\* IRSID. Atlas de las curvas de transformaci3n de los aceros de fabricaci3n francesa, Edici3n 1974.
- \*24\* PARRISH. La influencia de la microestructura en las propiedades en el caso de componentes cementantes: austenita retenida. Tratamientos calorificos 1977/3.
- \*25\* PARRISH. La influencia de la microestructura en las propiedades en el caso de componentes cementantes: tratamientos t3rmicos de post-endurecimiento, Tratamientos calorificos 1977/3.
- \*26\* MURRY, G; SAUZAY. Estabilidad dimensional de aceros de cementaci3n y de aceros para 3tiles para trabajo en calor. Documento IRSID P 203, mayo 1973.
- \*27\* BALTER, M.A.; DUKAREVICH, I., La relaci3n entre las propiedades de aceros sujetos a tratamientos qu3mico-t3rmico y el l3mite de fatiga. Ciencia Metálica y tratamientos calorificos, n3 9, septiembre 1971, vol. 13.
- \*28\* MEYZAUD, Y; SAUZAY, C. Previsi3n de los porcentajes de austenita residual con la ayuda de curvas de transformaci3n en enfriamiento continuo de aceros. Memorias cientificas de la Revista Metal3rgica, LXIX, n3 11, 1972.

- \*29\* INTERNATIONAL NICKEL, Aceros aleados al níquel de cementación y de tratamiento. Níquel internacional, 1970.
- \*30\* PAVLOSSOGLOU, J., Optimierungsmodell einer Zweistufen Boost/Diffusions-behandlung (Zweistufen-Gasaufkohlungs Steuerung). HTM, vol. 31, n°6, 1976.
- \*31\* COLLIN, R.; GUNNARSON, S; THULIN, D., Un modelo matemático para predecir perfiles de concentración de carbono de acero cementado con gas. Periódico del Instituto de Hierro y Acero, 7210, vol. 210, n° 10.
- \*32\* STILL, F.S.; CILD, H.C. Datos predictorios de cementación. Tratamiento calorífico de metales, 1978, 3, p. 67-72.
- \*33\* WUNNING, J., Weiterentwicklung des Gasaufkohlungstechnik; Härtereitechn. Mitt., 23, 1968, Heft 2.
- \*34\* GOLDSTEIN, J.F.; MOREN, A.E. Modelo de difusión del proceso de cementación. Metallurgical Trans., vol. 9A, nov. 1978, 1515.
- \*35\* COUSINOU, P., Contribución al estudio de la cinética de los tratamientos termoquímicos superficiales de los metales en atmósfera gaseosa reactivada. Tesis de Doctorado en Ingeniería, 1977.
- \*36\* DUMONT, D., Aproximación de los perfiles de carbono, con una calculadora de bolsillo, obtenidos luego de una cementación gaseosa. Reporte de CETIM, 1978.
- \*37\* LEMENT. B.S., Distorsiones en herramientas de acero. ASM. Park Novelty Ohio, 1959.