

88  
2 Gen.

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**  
**FACULTAD DE INGENIERIA**



**ESTUDIO DEL EFECTO DEL BORADO SOBRE  
ALGUNAS PROPIEDADES DE DOS ACEROS  
COMERCIALES**

**T E S I S**  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO MECANICO  
ELECTRICISTA  
P R E S E N T A :  
JUAN MEZA DEL CARPIO

Direc. Ing. Arturo Barba



Universidad Nacional  
Autónoma de México

UNAM



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

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

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

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

# I N D I C E

	pag.
I.      Introducción	2
II.     Tratamiento termo-químico del acero	7
1.      Análisis de los diferentes tratamientos termo-químicos	7
2.      Clasificación de estos tratamientos termo-químicos	8
2.1    Cementación del acero	8
2.1.1. Características de la cementación	9
2.1.2. Tecnología y estructura de la capa cementada	9
2.1.3. Cementación con carburante sólido	12
2.1.4. Los principales inconvenientes de los cementantes sólidos	13
2.1.5. Cementación con gas	14
2.1.6. Cementación con líquido	15
2.2.1. Cianuración	17
2.2.2. Cianuración líquida	18
2.2.3. Ventajas en comparación con la cementación	19
2.2.4. Nitrocementación	20
2.2.5. Carbonitruración	21
2.3.    Nitruración del acero	22
2.3.1. Aceros para la nitruración	23
2.3.2. Tecnología del proceso de nitruración	24
2.3.3. Aplicaciones en aceros nitrurados	26

III.	Antecedentes previos del borizado	27
1.	Preparación del material	28
1.2	Elacción de horno a trabajar	28
1.3.	Precauciones en el tratamiento térmico	28
2.	Definición de borizado	29
3.	Principio del proceso	29
4.	Borado en otros países	31
4.1.	Agentes borantes y diversos procesos para borrar	32
4.1.1.	Proceso de borado con sustancias líquidas	33
4.1.2.	Salas fundidas con electrólisis	33
4.1.3.	Proceso de boruración con sustancias sólidas	34
4.1.4.	Proceso de borado con agentes gaseosos	35
5.	Necesidad de realizar un tratamiento térmico después del borado	35
5.1.	Tratamiento térmico de los aceros borados	36
5.2.	Recomendaciones antes de efectuar el tratamiento térmico de las piezas boradas	37
5.3.	Sobrecalentamiento o tiempos excesivos de calentamiento en el temple	39
5.4.	Formas para evitar los defectos en el temple	42
5.4.1.	Velocidad enfriamiento insuficiente	42
5.4.2.	Temperatura de temple demasiado bajo o tiempo de mantenimiento insuficiente	42
5.4.3.	Zonas blandas	43
6.	La metalografía	44
7.	Ensayos metalográficos	44
7.1.	Ensayos microscópicos	45

7.2.	Ensayos macroscópicos	Pag. 45
8.	Descripción sobre fatiga	47
8.1.	Resistencia a la fatiga y límite de resistencia a la fatiga	49
8.2.	Factores que modifican el límite de resistencia a la fatiga	51
8.2.1.	Rugosidad de la superficie	51
8.2.2.	Defectos del tamaño de la pieza	52
8.2.3.	Confiabilidad	53
8.2.4.	Efectos de temperatura	56
8.2.5.	Concentración de esfuerzo	56
8.2.6.	Efectos diversos	57
IV.	Experimentación	59
1.	Breve descripción del estudio de borización	59
2.	Materiales y muestras	59
3.	Preparación de la probeta para el estudio metalográfico.	60
4.	Desarrollo de las pruebas microscópicas y macroscópicas de las muestras boradas.	61
4.1.	Estudio macroscópico de las muestras boradas	63
4.2.	Estudio microscópico de las muestras boradas	65
4.3.	Método para la determinación de inclusiones de un acero	66
5.	Como se realizó las pruebas de dureza y microdureza	69
6.	Técnicas empleadas en el proceso de boración	71

	Pag.
7. Hornos que se utilizaron para la borización	73
8. Probeta utilizada en el ensayo a fatiga.	74
9. Desarrollo de las pruebas con la máquina Instron	75
10. Problemas presentados por el diseño de la probeta a fatiga	76
V. Presentación y discusión de resultados	77
1. Resultados y discusión en cuanto a la metalografía del borado	77
1.1. Analisis químico de las muestras después de efectuar la prueba a fatiga.	86
1.2. Defectación de descarbonación en los diferentes tipos de aceros estudiado	89
2. Desarrollo de algunos ensayos físicos para determinar ciertas características mecánicas de los acero	90
2.1. Resultados obtenidos en las capas boradas en cuanto microdureza y dureza en el núcleo de la muestra borada.	91
2.2. Fracturas encontradas en la prueba de las probetas a fatiga.	93
2.3. Elementos encontrados en los 2 tipos de fractura	95
2.4. Ensayo a tracción de unas muestras de acero en condiciones diferentes.	96
2.5. Resultados del ensayo a fatiga del acero 4140	99
2.5.1. Tabla de los ensayos efectuados a fatiga del acero AISI 4140	102
2.5.2. Gráficas obtenidas a diferentes condiciones en los ensayos del acero AISI 4140	103

2.6.	Resultados del ensayo a fatiga del acero AISI 1045	105
2.6.1.	Tabla de los ensayos efectuados a fatiga del acero AISI 1045	107
2.6.2.	Gráficas obtenidas a diferentes condiciones en los ensayos del acero AISI 1045	108
2.7.	Comparación de los resultados de los dos tipos de aceros efectuados a fatiga.	110
VI.	Conclusiones	113

## I. INTRODUCCION

La industria del acero es una fuente de trabajo y desarrollo tecnológico para un país que se vuelve cada vez más poderosa porque crea trabajo, bienestar a muchos ciudadanos y fortalece grandemente nuestra economía.

El estudio de aceros borizados surgió de la necesidad de encontrar un elemento capaz de resistir un mayor tiempo de uso en el trabajo rudo que se realiza en las minas.

Para la explotación minera de hoy se necesita utilizar equipo que permita perforar grandes profundidades, lo que hace difícil el cambio continuo de dispositivos. En la actualidad se está utilizando el 4140 (como elemento de sujeción), con características confiables para los constantes esfuerzos de trabajo.

Derivado de este problema se pudo constatar que la dificultad no estaba en el acero, ya que su composición química lo hacía --- útil y de gran resistencia para asimilar los esfuerzos; Sin embargo la adversidad del medio, por ejemplo: el polvo, la arena, etc. lo hacen poco resistente al desgaste abrasivo que está sufriendo y es así que se ideó cubrir con una capa mínima la superficie del material permitiendo de esta manera un incremento en la resistencia a la Fatiga y al Desgaste, con un costo demasiado bajo comparado con el beneficio y uso de nuestras herramientas.

Con el borado se logró que la superficie adquiriera una gran dureza y el núcleo sea tenaz, capaz de absorber el impacto cons--

tante. Más adelante explicaré detalladamente el mecanismo de recubrir los aceros sus características, propiedades mecánicas y una explicación sencilla de todos los cuidados que se tomaron en cuenta para los resultados obtenidos.

Como un resumen de cada capítulo que corresponde a este estudio, es de notar que fue en gran parte experimental, e implicó tiempo y perseverancia, es así que partimos de los tratamientos termoquímicos como los antecedentes para nuestro estudio. Los citamos en forma breve, desde el proceso elemental de la saturación superficial esencialmente con carbono, nitrógeno y clasificándolos de acuerdo al medio que se lleva a cabo, con sustancias sólidas, gaseosas, líquidas, además se da a conocer las características y propiedades logradas a través de la cementación, nitruración, y la acción combinada del carbono con nitrógeno, como también citamos algunas ventajas y aplicaciones de estos tratamientos.

En el capítulo titulado "Antecedentes previos del borizado" se identifican cinco divisiones, la primera refiere el conocimiento del tipo de acero, y su porcentaje en carbono para que no exista peligro de rechazo en el tratamiento térmico subsecuente del borado. Así mismo pretendemos realizar una acertada elección con el horno para evitar defectos en el material, y la forma en que podemos superar estos defectos en el caso de que no contásemos con hornos de atmósfera controlada. Pasando a la segunda división definimos en forma sencilla el proceso de borizado dando a conocer los distintos substratos en que se forma, citamos el -

principio del proceso del borado y la finalidad que se persigue con este tratamiento, así como los diferentes medios de difusión utilizados (sólidos, líquidos y gaseosos) luego se hará notar la difusión simultánea con otros elementos con la finalidad de mejorar sus propiedades para el ensayo requerido. En la tercera división ponemos de manifiesto la necesidad de realizar un tratamiento térmico después del proceso del borado, se dan algunas -- recomendaciones para evitar la oxidación, decarburación y formación de cascarilla, también planteamos la necesidad de que el sustrato sea de un acero templable y que la temperatura de temple este por debajo de la temperatura eutéctica de  $1149^{\circ}\text{C}$  para evitar la licuación de la capa borada. Así mismo se darán algunas recomendaciones para lograr un óptimo templado en el momento que son sometidas las piezas al temple.

Es en la cuarta división en donde recurrimos a la metalografía con la finalidad de conocer las características esenciales de la micro estructura de un metal y su relación con las propiedades mecánicas del material, a su vez pretendemos detectar las inclusiones y defectos que puedan variar esas propiedades. La metalografía se clasifica en macroscópica y microscópica, con la primera detectamos la limpieza e impurezas del material captadas a través del macroscopio a bajos aumentos, en la segunda conocemos la estructura interna del elemento en prueba, Utilizando el microscopio con un adecuado reactivo de ataque y a un mayor número de aumentos lograremos apreciar con claridad la estructura interna del material.

Como última y quinta división se hace una descripción sobre fatiga, se citan algunas características de como se presentan las fallas y la dificultad de localizarlas para prevenir la ruptura repentina haciendo incapié en la importancia del estudio -- acerca de estas fallas por fatiga, consecuencia de esto es el hecho de que cuales quiera de los diseños no sera competitivo en el mercado si no se toma en consideración el interés pertinente del límite de fatiga al que deben ser expuestas.

En esta división también se describe en forma breve el efecto de algunos factores que limitan la resistencia en la fatiga como: rugosidad de la superficie, efectos del tamaño de la pieza confiabilidad, efectos de temperatura, concentración de esfuerzos, y otros.

En el capítulo correspondiente a "Experimentación " identificamos los distintos tipos de mezclas, porcentajes, el igual -- que el tipo de acero que se utilizó para el borado. En este capítulo describimos los pasos para la preparación de la muestra con el fin de dar a conocer como se logró una buena difusión de bórax y así mas tarde se observó a traves de un microscopio la estructura de la capa borada y la de su núcleo, enseguida se midió el espesor de la capa borada y posteriormente se fotografiaron y obtuvieron sus micro durezas. Gracias al macroscopio se detectaron ciertas heterogeneidades o fallas que afectan considerablemente a la resistencia del material, consecuentemente a fatiga; es por ello que se da una descripción de la manera como se reconoce la existencia de descaburación, segregación dendrítica

limpieza, inclusiones del acero. También en este capítulo conocemos la técnica empleada en el proceso de boración, dificultades que se encontraron tanto de mezcla como fabricación de los recipientes donde se depositó la muestra con las sales, al igual que el tipo de horno y los tratamientos térmicos.

El capítulo referente a "Presentación y discusión de resultados" presenta en forma detallada los resultados obtenidos por medio de fotografías, gráficas derivadas de los ensayos, y descripción de observaciones, concernientes a la metalografía, análisis químico, descarburación, microdureza, dureza en el núcleo ensayo de tracción, prueba a fatiga de los aceros en estudio, así también se dan a conocer algunos tipos de fracturas de los ensayos. Concluyendo este capítulo con una comparación de las características mecánicas de los dos tipos de acero en estudio.

En el último capítulo se da a conocer las conclusiones y -- observaciones que se pudo lograr a través del estudio experimental, como producto de esta tesis.

## II. TRATAMIENTOS TERMO-QUIMICOS DEL ACERO

Se llama tratamiento termo-químicos a la saturación superficial del material base con tal o cual elemento por ejemplo: con carbono nitrógeno, aluminio, cromo, y otros por difusión desde el medio ambiente efectuada a alta temperatura.

El tratamiento termo-químico consta de tres procesos elementales:

1. Procesos que transcurren en el medio ambiente y que conducen a la separación del elemento difundidor en estado elemental:  
Ejemplo: la disociación del amonio con la separación de nitrógeno elemental por la reacción  $2\text{NH}_3 \rightarrow 2\text{N} + 3\text{H}_2$  y del monóxido carbónico con la separación de carbono elemental por la reacción  $2\text{CO} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{C}$  y otros.
2. Contacto de los átomos del elemento difundidor con la superficie de la pieza de acero y la formación de enlaces químicos con los átomos del metal básico (absorción) .
3. Difusión, es decir, penetración del elemento saturador en las profundidades del metal. La velocidad de difusión al penetrar los átomos difundidores en la red cristalina del hierro no es igual y dependen del tipo de solución formada.

Durante la saturación con carbono o nitrógeno, que forman con el hierro soluciones sólidas intersticiales, la difusión -- transcurre generalmente en forma más fácil, que durante la saturación con los metales que forman soluciones sólidas de sustitución.

La concentración del elemento difundidor en la superficie -- depende de la actividad del medio ambiente, que asegura la afluencia de átomos de éste elemento a la superficie, y de la velocidad de los procesos de difusión que conducen a la desviación de estos átomos a las profundidades del metal.

La profundidad de penetración depende de la temperatura, --- tiempo de saturación, así como la concentración del elemento difundidor en la superficie.

## 2. CLASIFICACION DE ESTOS TRATAMIENTOS TERMO-QUIMICOS

- |                         |                          |
|-------------------------|--------------------------|
|                         | 1. cementación sólida    |
| - Cementación del acero | 2. cementación gaseosa   |
|                         | 3. cementación con sales |
| - Cianuración           | cianuración líquida      |
|                         | cianuración gaseosa      |
| - Carbonitruración      |                          |
| - Nitrocementación      |                          |
| - Nitruración           |                          |

### 2.1. CEMENTACION DEL ACERO

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

El objetivo principal de la cementación es la obtención de una superficie de alta dureza, que tenga alta resistencia al desgaste. Esto se logra por el enriquecimiento de la capa superficial con carbono hasta una concentración, de .8 - 1% y un temple después. Con la cementación aumenta también el límite de fatiga

La elección de estos aceros es necesario para que las capas interiores y el núcleo de la pieza, que no se saturan con carbono durante la cementación, conserven una alta ductilidad después del temple, mientras que las capas superficiales obtengan alta dureza.

#### 2.1.1 CARACTERISTICAS DE LA CEMENTACION

La difusión del carbono en el acero es posible si el carbono se encuentra en estado elemental, obtenido por ejemplo, por disociación de los gases que contienen carbono (CO, CH<sub>4</sub> y otros). El carbono elemental es absorbido por la superficie del acero y se difunde hacia las profundidades del metal.

A cementación son sometidos los aceros al carbono y aleados, con un contenido de .1 - .18% de C. Para piezas de gran tamaño se emplean aceros con mayor contenido de carbono (.2 - .3%) y --- excepcionalmente algunas veces se cementan también aceros hasta 0.40 % C.

#### 2.1.2 TECNOLOGIA Y ESTRUCTURA DE LA CAPA CEMENTADA

La cementación se realiza a temperaturas superiores a  $A_{c3}$  --

(900- 950 °C ) siendo las temperaturas próximas a 900 °C las más -- utilizadas.

En las condiciones comunes, durante la cementación sobre  $Ac_3$ , se forman solamente austenita y luego de un enfriamiento lento, - los productos de su descomposición (ferrita y cementita ).

La capa cementada tiene una concentración variable de carbono en su espesor, que decrece de la superficie al núcleo de la -- pieza. En relación a ésto, después, del enfriamiento, en la estructura de la capa cementada se pueden distinguir tres zonas -- (de la superficie al núcleo).

Zona HIPEREUTECTOIDE, compuesta de perlita y cementita secundaria (frecuentemente no existe).

Zona EUTECTOIDE, compuesta de perlita.

Zona HIPOEUTECTOIDE, compuesta de perlita y ferrita, la cantidad de ferrita en esta zona crece interrumpidamente a medida que se acerca al núcleo.

Como espesor de la capa cementada generalmente se toman la suma de las zonas Hipereutectoides y Eutectoide y la mitad de la zona de transición (Hipoeutectoide).

La concentración de carbono en la capa superficial debe ser de .8 - 1% . Una concentración más alta de carbono produce un -- desmejoramiento de las propiedades mecánicas de la pieza cementada.

El espesor de la capa cementada para la mayoría de las piezas es de .8 - 1.5 mm .

Los espesores de las capas cementadas que normalmente se emplean en las piezas de máquinas y motores, se pueden clasificar en tres grupos:

1. Capas delgadas con menos de .5 mm de espesor de cementación. - Estas profundidades de cementación se utilizan para pequeñas piezas de acero al carbono, endurecidas generalmente con sales de cianuro.
2. Capas medias de .5 a 1.5 mm son las más corrientes para la mayoría de las piezas que se utilizan en la fabricación de máquinas y motores. Se pueden emplear cementantes sólidos, líquidos o gaseosos, con acero al carbono, débilmente aleados o de alta aleación.
3. Capas de gran espesor, superior a 1.5 mm son obtenidas generalmente por cementación con materiales sólidos y con cementantes gaseosos y algunas veces aunque más raramente con cementantes líquidos. Las chapas de blindaje, que suelen fabricarse con -- capas cementadas desde 3 a 4mm, son cementadas con gases.

### 2.1.3 CEMENTACION CON CARBURANTE SOLIDO

En este proceso el medio saturante es el carbón vegetal --- activado (de roble o abedul) como también el semicoque de hulla y el coque de turba, es decir, carburantes sólidos.

El carbón solo, no se emplea porque con él no se suelen conseguir concentraciones de carbono en la periferia del acero, superior a 0.5% C. Mezclándolo en cambio con carbonatos alcalinos terrosos, se alcanza hasta 1.2% de carbono. Para acelerar el proceso de cementación al carbón vegetal se le agregan activadores como carbonato de bario ( $\text{BaCO}_3$ ) o de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ).

La profundidad de la capa cementada aumenta con la temperatura y con la duración de la cementación y depende también de la actividad del carburante empleado y de la composición del acero que se va a cementar.

La absorción del carbono por el hierro gama, es tanto más activa cuando menor sea el porcentaje en carbono del acero. A medida que la carburación progresa, cuando el porcentaje de carbono aumenta, la velocidad de absorción disminuye comportándose en ese caso el acero como una solución que se aproxima a su grado de saturación.

Cuando la cementación se verifica a bajas temperaturas, la penetración del carbono es muy pequeña y en cambio el porcentaje en carbono de la periferia es mayor que cuando se efectúa la cementación a temperatura próxima a  $925^\circ\text{C}$ .

El aumento de la temperatura hasta 950- 1000 °C con el empleo de carburantes menos activos y de aceros originalmente de grano fino hereditario, no propensos al recalentamiento, permite acelerar considerablemente la cementación.

Las cajas, después de la cementación son enfriadas al aire hasta una temperatura de 400- 500 °C después de la cual son abiertas

#### 2.1.4 LOS PRINCIPALES INCONVENIENTES DE LOS CEMENTANTES SOLIDOS

1. La gran duración de la operación, generalmente demasiado larga ya que es necesario calentar hasta muy altas temperaturas las grandes cajas de cementación.
2. El elevado consumo de combustible, necesario para calentar el cementante y las cajas.
3. El elevado costo de preparación y colocación de las piezas en las cajas.
4. La dificultad de templar directamente las piezas desde la caja y por lo tanto la imposibilidad de emplear dispositivos automáticos para el temple al trabajar con grandes series.
5. La irregularidad de temperaturas en el interior de las grandes cajas de cementación.

Para la cementación de piezas con carburante sólidos se emplean normalmente Hornos calentados con carbón, gas fuel-oil y electricidad. En ellos se colocan las cajas de cementar, con las piezas y las mezclas cementantes dentro cerrando bien los puntos con barta o arcillas refractarias.

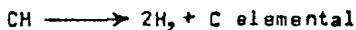
### 2.1.5 CEMENTACION CON GAS

La cementación con gas se realiza mediante el calentamiento de la pieza en un medio de gases que contiene carbono, por ejemplo óxido de carbono, etileno, metano y gas del alumbrado. Se utilizó exclusivamente para la fabricación de blindajes.

En este proceso, manteniendo las piezas de 1 a 8 horas en una atmosfera carburante, a temperaturas de 850 a 950°C, se obtienen capas cementantes de .2 a 1.5 mm de profundidad.

Únicamente en casos especiales como la fabricación de blindajes, se empleen procesos más largos y se obtienen capas cementantes de mayor espesor.

La reacción principal que garantiza la carburación durante la cementación con gas, es la disociación del metano:



Se realiza en hornos de mufla y sin mufla de acción continua.

Ventajas de la cementación de gas comparadas con carburante sólido.

1. Durante la cementación con gas se puede obtener la concentración prefijada de carbono en la caja.
2. Reducir la duración del proceso, puesto que no hay la necesidad de calentar las cajas llenas de un carburante de mala conductividad térmica.

3. Simplificar considerablemente el tratamiento térmico posterior de la pieza, puesto que puede realizar el temple directamente del horno.
4. Se pueden cementar grandes cantidades de piezas en muy poco -- tiempo es de gran interés para las empresas que deban cementar muchas piezas y en cambio no es recomendable para talleres pequeños que trabajan con pequeñas series.

#### 2.1.6 CEMENTACION CON LIQUIDOS (BAÑO DE SALES)

En este proceso la gran dureza superficial que adquiere el -- acero, puede considerarse debido exclusivamente a la acción del -- carbono. La influencia del pequeño porcentaje de nitrógeno exist -- ten en la capa periférica es muy pequeña y puede ser despreciable.

En la cementación con líquidos, las sales se disponen en -- crisoles de fundición o de chapa de acero embutidos o soldada.

Los baños de sales que se utilizan son a base de cianuro só -- dico, con porcentajes variables de cloruro y carbonato só -- dicos a los que se añade uno o más cloruros o fluoruros de Bario, Potasio, Calcio o Estroncio, que actúan como agentes catalíticos, aumentando notablemente la penetración del carbono, y con ello la profun -- didad de la capa dura que puede variar desde .2 a 3 mm .

El porcentaje de cianato en el baño es un índice de la canti -- dad de nitrógeno que absorbe el acero, para asegurar una buena pe -- netración de carbono (inferior a 1% para penetración media) y en los de gran penetración menores del .3% .

Las sales tienen la desventaja de ser muy venenosas y aunque los humos que desprenden no lo son, sin embargo causan molestias e irritan las vías respiratorias. Para endurecer piezas sencillas o de poca responsabilidad y para pequeños espesores de capa dura, conviene en general cementar con sales. Cuando se trata de pequeños espesores de capa dura la cementación con sales es mucho más rápido que la cementación con materiales sólidos.

El cianuro potásico fue la primera sal utilizada para endurecer el acero, es poco preciso, no se puede utilizar más que para piezas sin ninguna responsabilidad.

Posteriormente se comenzaron a utilizar sales compuestas, a base de cianuro sódico con proporciones variables de cloruro y carbonato sódico, estas 2 sales son inertes pero mezcladas las 3 en proporciones convenientes se comportan igual que el cianuro, empleando de esta forma resultan más económicas.

Las irregularidades que pueden presentarse en estos procesos se atribuirán a las siguientes circunstancias.

1. Contenido insuficiente de cianuro para generar el carbono activo.
2. Aumento exagerado del contenido de carbono sódico.
3. Cantidad excesiva de cianato sódico.
4. Error en la temperatura de cementación.

La cementación con sales tiene la ventaja de que las instalaciones son sencillas y baratas. El precio de un horno de sales suele ser menor que cualquier otro tipo de horno.

Los procesos de endurecimiento, empleando sales preparadas con cianuros, pueden dividirse en dos grupos: La Cianuración y la Cementación o carburación.

### 2.2.1 CIANURACION

El endurecimiento, se consigue por la acción combinada del carbono y el nitrógeno, obteniéndose capas superficiales duras, de poca profundidad.

Este procedimiento se emplea para endurecer superficialmente pequeñas piezas de acero. Los baños de cianurar contienen cianuro, carbonato y cianato sódico con o sin cloruros sódico como diluyente.

Para que se realice la cianuración es fundamental la formación de una cierta cantidad de cianato, todos los baños de cianuro contienen siempre algo de cianato, ya que su formación es casi automática al elevarse la temperatura de los baños.

La cianuración se suele efectuar con sales que contienen, -- cianuro sódico, carbonato sódico y cloruro sódico, siendo recomendable utilizar porcentajes de cianuro variable.

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

Para la cianuración comunmente se emplea aceros que contienen .3 - .4 % C . Se distinguen la cianuración líquida y gaseosa. La cianuración gaseosa se llama también nitrocementación.

### 2.2.2 CIANURACION LIQUIDA

La pieza se calienta a 820 - 960 °C en sales fundidas que contienen cianuro sódico NaCN .

Para obtener una capa de pequeño espesor (.15- .35 mm) el proceso se realiza a 820 - 860 °C en baños que contienen un 20- 25 % de NaCN, 25- 50 % de NaCl y 25- 50 % de Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> . La duración se determina por el espesor requerido de la capa y es de 30- 90 minutos.

El carbono elemental y el nitrógeno formado se difunden en el acero.

La capa cianurada, obtenida a 840- 860 °C, contiene menos carbono (.6 - .7 % ) en comparación con las cementadas; el contenido de nitrógeno en la capa cianurada es de .8 - 1.2 % .

La cianuración a bajas temperaturas permite ejecutar el temple directamente después del baño de cianuro. Después del temple se realiza el revenido a baja temperatura (180- 200 °C ). La dureza de la capa cianurada después del tratamiento térmico es igual a 58 - 62 HRC.

Este tipo de cianuración se emplea para piezas de pequeñas dimensiones ejemplo: en la construcción de automoviles para los engranajes del accionamiento de la bomba de aceite, tornillo sin fin del volante, ejes, tuercas etc.

Para obtener una capa de mayor espesor (.5- 2.0mm) la cianuración se realiza a 930-960 °C en un baño que contiene 8 % de NaCN, 82% de BaCl y 10% de NaCl . El tiempo de exposición de la pieza en el baño es de 1.5- 6.0 horas.

A altas temperaturas la superficie del acero se satura en mayor grado de carbono (hasta un .8 - 1.2 % de C) y en grado menor con nitrógeno (.2- .3 % de N<sub>2</sub>).

La estructura de la capa cianurada se diferencia de la cementada solamente en que su superficie frecuentemente se forma una capa delgada (.02 - .03 mm) de nitruro carbónico.

La estructura de la capa cianurada después del temple es la misma que la de la cementada.

Después de la cianuración las piezas se enfrían al aire, luego se templean con un calentamiento en baño de sales o en horno y se someten a revenido a baja temperatura.

A alta temperatura de cianuración (930 - 960 °C) se produce el crecimiento del grano de austenita y para su afino se necesita un calentamiento repetido.

### 2.2.3 VENTAJAS EN COMPARACION CON LA CEMENTACION

1. Un tiempo más reducido para la obtención de una capa del espesor prefijado.
2. Considerablemente menor deformación y torcedura de las piezas de configuración compleja (engranajes, ejes, y otros).
3. Mayor resistencia al desgaste y a la corrosión.

En cuanto a las desventajas de la cianuración se puede referir su alto precio, la toxicidad de las sales de cianuro y el uso de medidas especiales de seguridad, en relación con esto.

#### 2.2.4 NITROCEMENTACION

La pieza es calentada a 850- 870 °C en una mezcla gaseosa, compuesta de gas carburante y amoníaco. El tiempo de duración del proceso es de 2- 10 horas para la obtención de una capa de .25- 1mm de espesor.

Para la nitro cementación se recomienda emplear una atmósfera endotérmica regulada, a la cual se le agrega 5- 15 % de gas natural en bruto y 3- 10 % de  $\text{NH}_3$ .

Después de la nitro cementación viene el temple inmediatamente después del horno o bien después de un calentamiento secundario; frecuentemente se emplea temple escalonado. Después del temple se realiza el revenido a 160- 180 °C . La dureza de la capa -- después del tratamiento térmico es de 60- 62 HRC.

A nitro cementación tiene una serie de ventajas en comparación con la cementación con gas:

1. El proceso se realiza a una temperatura más baja (850-870 °C)
2. La obtención de menor deformación y torcedura.
3. El aumento de la resistencia al desgaste a la corrosión.
4. La ausencia de ennegrecimiento en las piezas.

### 2.2.5 CARBONITRURACION

En la cementación o carburación con sales, se utilizan baños preparados a base de cianuros y agentes catalizadores. La profundidad que se consigue es muy superior a la de la cianuración o oscilando entre .2 y 3mm , aunque en la periferia hay un pequeño porcentaje de nitrógeno se puede considerar que el endurecimiento es debido exclusivamente al carbono.

En este tratamiento la dureza que adquiere el acero es debido a la acción combinada del carbono y el nitrógeno contenidos en una mezcla gaseosa. El endurecimiento se puede obtener según la composición de la mezcla gaseosa, sin temple posterior de las piezas.

Se suelen emplear gases constituidos por  $\text{NH}_3$ , de propano butano etc. y temperaturas variables de 700 a 850 °C. Recientemente se han comenzado a utilizar en lugar de amoníaco, gases disociados y también se han obtenido buenos resultados adicionando anilina al amoníaco .

La duración del tratamiento varía de 30 minutos a tres horas

### 2.3 NITRURACION DEL ACERO

La nitruración es un procedimiento de endurecimiento superficial en el que por absorción de nitrógeno, se consiguen durezas extraordinarias en la periferia de las piezas de acero.

El proceso de nitruración se realiza en una atmósfera de amoniaco (480-700 °C) que durante el calentamiento se disocia por la siguiente ecuación:



Durante esto, el nitrógeno elemental se difunde en el hierro.

Si la nitruración se realiza a una temperatura inferior a la Eutectoide (591 °C), en el momento inicial de la saturación, en la superficie del acero se forma fase alfa. Al alcanzar el límite de saturación de la fase alfa comienza la formación de la siguiente fase, estable a la temperatura dada, que es precisamente la fase  $\delta'$ : solución sólida a base de nitruros de hierro ( $\text{Fe}_4\text{N}$ ).

Con procesos normales de 20 a 80 horas de duración, se obtienen capas nitruradas de espesores variables desde .2 a .7 mm.

Después de la nitruración, no es necesario enfriarlas rápidamente desde elevada temperatura, como se hace en la cementación evitándose por lo tanto las deformaciones que en estos enfriamientos se originan. Además la nitruración, no modifica las características que se han obtenido previamente en el núcleo por temple y revenido; siempre que este último haya sido hecho a temperatura superior a 500 °C.

Por ser la temperatura de nitruración relativamente baja, no hay aumento del tamaño de grano y tampoco es necesario someter a las piezas nitruradas a ningún tratamiento de regeneración posterior. Además con este tratamiento, se pueden conseguir durezas -- muy superiores a las que se obtienen en la cementación .

La nitruración aumenta la dureza de la capa superficial, su resistencia a la corrosión en medios tales como el aire, agua, vapor, etc. La dureza de la capa nitrurada se conserva durante el calentamiento hasta altas temperaturas (600-650 °C), mientras que la dureza de la capa cementada, que tiene estructura martensítica se conserva solamente hasta 200-250 °C .

### 2.3.1 ACEROS PARA LA NITRURACION

La dureza de la capa obtenida durante la nitruración del --- hierro, no es muy alta, a pesar de las grandes transformaciones -- estructurales.

Por esta razón, a nitruración se someten los aceros aleados de contenido medio de carbono, que contienen Al, Cr, Mo, V, que --- adquieren una extraordinaria dureza, resistencia al desgaste espe cialmente alta, bastante profundidad y buena tenacidad.

En los aceros ordinarios al carbono, la difusión del nitrógeno hacia el interior se efectúa con más facilidad que en los -- aceros aleados, aunque con menor dureza que en los aleados.

Durante la nitruración de los aceros aleados se forman los-- nitrurados  $Cr_2N$ ,  $Mo_3N$ ,  $AlN$ , y otros, que precipitándose en forma -- dispersa, dificultan el movimiento de las dislocaciones y con ---

ello aumentan la dureza de la capa nitrurada.

Los que aumentan en mayor grado la dureza son los nitruros de aluminio, cromo, molibdeno y vanadio.

La presencia de aluminio, cromo, y molibdeno permite aumentar considerablemente la dureza y resistencia al desgaste de la capa nitrurada hasta 1200 Hv. el molibdeno además elimina la fragilidad de revenido en el acero.

### 2.3.2 TECNOLOGIA DEL PROCESO DE NITRURACION

1. Tratamiento térmico preliminar, que consiste en el temple y revenido a alta temperatura del acero y que tiene como objetivo obtener elevada resistencia y viscosidad en el núcleo de la pieza.

Al tratamiento térmico generalmente se someten los aceros en piezas brutas.

El revenido se realiza a alta temperatura (600-675 °C), que garantiza la obtención de una dureza que permite el tratamiento mecánico por corte.

2. Tratamiento mecánico de las piezas, como también rectificado que da las dimensiones definitivas de la pieza.

3. Protección de las zonas no sometidas a nitruración, por medio de la aplicación de una capa delgada de plomo (.1- .015 mm) -- por el método electrolítico. El plomo, a la temperatura de nitruración, se funde y gracias a la tensión superficial se mantiene en la superficie del acero en forma de una delgada película impermeable para el nitrógeno.

#### 4. Nitrurado

#### 5. Rectificado final de la pieza.

La nitruración de piezas de paredes finas de compleja configuración se recomienda realizar a 500-520°C. La duración del proceso depende del espesor necesario de la capa nitrurada.

Generalmente durante la nitruración es conveniente tener una capa de un espesor de .3 - .6 mm. El proceso de nitruración, en este caso, a 500-520°C es de una duración prolongada de 24 a 90 horas.

Para acelerar el proceso de nitruración se emplea el proceso de 2 etapas: primeramente la nitruración se efectúa a 500-520°C y luego a 580-600°C. Durante el proceso de dos etapas se reduce la duración del proceso conservando una alta dureza de la capa nitrurada. Las piezas tienen color gris.

En el proceso de saturación con nitrógeno las dimensiones de la pieza sufren cierta modificación a causa del aumento del volumen de la capa superficial. La deformación crece al aumentar la temperatura de nitruración y el espesor de la capa.

Para aumentar la estabilidad contra la corrosión, la nitruración se efectúa a 600-700°C. La duración del proceso es de 15 minutos, para las piezas pequeñas y 6-10 horas para piezas de gran tamaño.

En la superficie, después de la nitruración se forma una capa delgada (.01- .03 mm) que posee una alta resistencia a la corrosión.

### 2.3.3 APLICACIONES EN ACEROS NITRURADOS

La nitruración se usa para piezas como engranajes, cilindros de motores de alta potencia y muchas otras piezas de máquinas --- herramientas y otras .

Si la nitruración se realiza para aumentar el límite de fatiga o se admite una dureza reducida, entonces se pueden usar aceros aleados de construcción de cualquier tipo.

Para aumentar la resistencia a la corrosión se pueden nitru- rar también los aceros al carbono.

Con la influencia del aluminio podemos coseguir las mayores durezas, con el cromo y molibdeno para obtener capas duras de algvada tenacidad.

Se nitruran los aceros austeníticos, cromo-niquel para vál- vulas y los aceros inoxidables altos en cromo para mejorar su --- resistencia al rozamiento . Cuando se requieran resistencias may elevadas, hay que utilizar aceros con .4 a .5 % de carbono reve- nido a 550 °C .

### III. ANTECEDENTES PREVIOS DEL BORIZADO

#### 1. PREPARACION DEL MATERIAL

El tratamiento térmico de cualquier acero depende de su composición química. Por este motivo debe conocerse antes del tratamiento el tipo de acero que se va a trabajar. El material en barras tendrán colores característicos que identificarán el tipo de acero es así el 1045 será de color rojo y el 4140 amarillo-cafe según la distribuidora "Aceros fortuna".

En determinados casos en donde haya existido una confusión de materiales, particularmente en piezas de serie pequeña y con mucho mecanizado se recurrirán caso de duda a los ensayos más o menos no destructivos con el microscopio, o la prueba de la chispa, para resolver los casos planteados.

Cuando no se conoce el material, aumenta el peligro de rechazos porque el tratamiento térmico que ha de aplicarse es diferente para los distintos aceros. Las herramientas de aceros para temple en aceite se agrieta si se las templen en agua, mientras que las piezas de un acero para temple en agua no se endurecen cuando se las enfría en aceite.

La elección del tratamiento térmico y sus particularidades, por ejemplo; la temperatura a utilizar, o la forma de realizar el enfriamiento, no puede llevarse a cabo correctamente si no se conocen los materiales y como deben tratarse.

## 1.2 ELECCION DE HORNO A TRABAJAR

La elección del horno requiere de gran importancia que nos permita obtener buenos resultados tanto en forma experimental como en la obtención de productos para el mercado comercial es así: el material en barras y las piezas forjadas o brutas se tratan en hornos de mufla normales.

Las piezas con mecanizado de precisión, en las que el tratamiento térmico no debe producir descarbonación ni cascarilla, deben calentarse preferentemente en hornos de atmósfera protectora o en baños de sales. Cuando se trata de un gran número de piezas en una fabricación en serie conviene el emplear hornos continuos.

## 1.3 PRECAUCIONES EN EL TRATAMIENTO TERMICO

Para proteger contra la formación de cascarilla a las piezas que deben recocerse durante tiempos largos, y en el caso de no disponer de hornos con atmósfera protectora se pueden emplear cajas, en las que las piezas se empaquetan con pequeñas porciones de coque, que por arriba, se tapan con barro para cerrar el paso al aire. En estas cajas pueden recocerse las piezas a temperaturas de hasta  $1250^{\circ}\text{C}$ .

Para temperaturas de recocido de hasta  $800^{\circ}\text{C}$  se emplean frecuentemente virutas de fundición sustituyendo al coque. No sirve para temperaturas más altas, porque comienzan a sinterizarse. Pueden también emplearse carbón de madera hasta  $800^{\circ}\text{C}$  y arena de cuarzo hasta los  $1000^{\circ}\text{C}$  para empaquetarlas las piezas, con el fin de protegerlas contra la formación de cascarilla.

## 2. DEFINICION DE BORIZADO

Se llama boruración o borizado al recubrimiento superficial con boro. Es decir, mediante la difusión penetra en su interior -- el boro, formando compuestos denominados boruros.

A través de la microestructura de la capa borada, en el primer sustrato se forma boruro de hierro  $Fe_3B$ , Ortorrómbico, más -- abajo el boruro  $Fe_2B$  tetragonal, y la solución sólida  $\alpha$ , que son -- las fases que proporcionan las propiedades.

## 3. PRINCIPIO DEL PROCESO

Mediante el proceso termoquímico de borado se difunde boro -- sobre toda la superficie de los aceros y una vasta serie de mate- -- riales no ferrosos.

Su finalidad primordial es la de producir en los materiales -- una capa superficial de gran dureza que presente un buen comporta- -- miento a la abrasión. Además esta capa resulta en algunos medios, -- muy resistente a la corrosión.

El borado se puede realizar, con medios difusores, de forma -- sólida, líquida, ó gaseosa. Inclusive el boro también se puede -- difundir simultáneamente ó consecutivamente con otros elementos -- (Al, Ti, Si, etc.) mejorando así aun más las propiedades específi- -- cas de la capa de boruros.

Se ha probado que en los materiales de hierro se puede reali- -- zar el borado a temperaturas que oscilan entre 850- 1000 °C ,

sin embargo después de realizar gran número de experimentaciones se considera que a 900 °C es la temperatura más óptima.

Si hacemos una comparación con las diferentes temperaturas podemos señalar que de 800° y menores que 850 °C el proceso de saturación se retarda considerablemente y el contenido de boro de la capa por difusión decrece ligeramente. A temperaturas de 1000 °C y mayores, las capas resultantes se caracterizan por un incremento en la fragilidad, porosidad y la presencia de profundas grietas radiales, las cuales dañan sus propiedades de servicio. Las capas obtenidas por difusión a temperaturas de 850 °C a 900 °C son continuas y menos frágiles así como de fuerte adherencia al núcleo. También podemos señalar que temperaturas de 900 °C a 950 °C permiten un mejor borado de la mayor parte de los aceros de alta aleación.

La duración del tratamiento depende del espesor de la capa de boruro deseado y del acero empleado. El espesor de la citada capa está sujeta principalmente, (según sea las condiciones establecidas para el borado) a la composición del acero a tratar.

En los aceros de bajo contenido en carbono y de baja aleación, la capa de boro presenta una especie de forma dentada bastante pronunciada sobre el material base, quedando así garantizado su buena adherencia. Por el contrario, en los aceros de alta aleación descansa la capa de boruro superficial, prácticamente lisa, sobre el material base, siendo en este caso buena su adherencia, aunque menor.

La capa consiste de una zona continua de boruros e inclusiones de carburo globular y tiene una interfase relativamente uniforme con la base.

La zona adjunta a las capas por difusión es enriquecida en los elementos aleantes, los cuales han sido conducidos fuera de la capa superficial por el boro, y además contiene inclusiones de carburo (en aceros de alto contenido de carbono).

Los tiempos de exposición mayores de 6 horas no se usan normalmente en ninguno de los procesos existentes de borado, puesto que el espesor de la capa resultante excedería el valor de seguridad de las características óptimas de operación.

#### 4. BORADO EN OTROS PAISES

De las técnicas existentes para realizar el proceso, podemos dividir:

Medios líquidos	Por electrólisis Inmersión en baño de sales
Medios gaseosos	
Medios sólidos	

A boración se ha llevado a cabo en un gran número de materiales ferrosos, entre ellos los aceros para herramientas y los aceros para cementación, así como el acero fundido, el de alta pureza, todo tipo de fundiciones, por ejemplo fundiciones grises, fundiciones dúctiles, etc.

Además de los materiales ferrosos es posible la boración de otra componente y elementos, por ejemplo metales de alta dureza tales como tungsteno, molibdeno, titanio etc.. El proceso de boración para estos materiales no difiere del que se realiza para la boración del hierro y sus aleaciones.

Se han hecho experimentos que en el caso del borado de aceros de alta aleación, se forma una zona de transición la cual afecta adversamente la adhesión de la capa borada al material base y --- resulta en el descascarillado de la capa. Adicionalmente, al ir aumentando la cantidad de elementos aleantes en el acero tales -- como Cr, Mo, W; baja el grado de difusión del boro hacia el interior del acero.

#### 4.1 AGENTES BORANTES Y DIVERSOS PROCESOS PARA BORAR

Para determinar el agente borante más adecuado, se debe llevar a cabo, prueba metalográfica, en un espécimen metálico pulido por ejemplo en nuestro caso del acero, si está presente  $Fe_2B$  o  $FeB$ . Además es posible evaluar la porosidad, la profundidad de la estructura acicular y de esa forma conocer la calidad de la capa mejorada.

Una capa completa está considerada como una capa en la cual la estructura acicular del borado logra diferentes profundidades.

Los procesos llevados a cabo con estas sustancias borantes -- está basado en reacciones químicas o electroquímicas entre un --- agente borante y el material base que está en tratamiento.

#### 4.1.1 PROCESO DE BORADO CON SUSTANCIAS LIQUIDAS

El borado puede llevarse a cabo con sustancias líquidas en -- sales fundidas, con o sin electrólisis, y en soluciones acuosas -- con calentamiento.

En la boración de las piezas de acero por electrólisis de -- sales fundidas que contienen boro, la pieza desempeña el papel de cátodo en el baño con borax fundido ( $\text{Na}_2\text{B}_2\text{O}_4$ ) y agente borante en fluoruros disueltos como ánodo. El proceso puede ser sin electrólisis en baños con cloruros fundidos ( $\text{NaCl}$ ,  $\text{BaCl}$ ), a los cuales -- se les agrega ferroboro en estado de polvo o carburo de boro ( $\text{B}_4\text{C}$ )

#### 4.1.2 SALES FUNDIDAS CON ELECTROLISIS

La boración con electrólisis fue estudiado y se encontró que la distribución de temperaturas en el baño es más uniforme y que las piezas son más fáciles de limpiar.

Este proceso tiene varias desventajas. La alta viscosidad del bórax fundido hace virtualmente imposible la boración de una temperatura de  $850^\circ\text{C}$ . Aun sobre esta temperatura es difícil -- lograr una distribución uniforme de la temperatura en el baño. Las diferentes densidades de corriente, especialmente con piezas complejas causan una condición de no uniformidad en el espesor de la capa. Además cuando este proceso es utilizado se forma una capa de sal firmemente adherida a las piezas y puede ser bastante costoso removerla después de que el proceso se haya completado.

La microdureza de las capas boradas aumenta con un incremento en la temperatura del electrolito, y con un incremento en la concentración de carbono en la matriz metálica del hierro colado.

La capa borada en el hierro colado ferrítico tuvo una forma acicular. Por el contrario, en los hierros perlíticos y blancos, la apariencia de la capa fue más uniforme y las puntas fueron más redondeadas, desapareciendo completamente en el hierro blanco.

#### 4.1.3 PROCESO DE BORURACIÓN CON SUSTANCIAS SÓLIDAS

Varias de las importantes ventajas de este proceso es su fácil manipulación, la posibilidad de cambiar la composición de los polvos, el requerir poco equipo y consecuentemente su ahorro económico.

En las condiciones de boruración con sustancias sólidas en forma de polvos, se llegó a la conclusión de que solo se lograba obtener capa delgada y porosa. Aunque quizá ello se debiera a que había utilizado materiales inapropiados, por ejemplo: boro amorfo (B) con alto contenido cristalino o ferroboro con demasiado contenido de aluminio o silicio.

El boro amorfo reacciona más que en forma cristalina. El borizar con boro amorfo como con otros polvos, solo es posible en una atmósfera de hidrógeno inerte o al vacío. Aun en estas condiciones solo se obtendría una capa de espesor delgado y poroso.

En resumen se puede decir que el boronamorfo no solo resulta en una capa más gruesa sino en un incremento en la boronabilidad. No obstante, se forman las capas de dos fases. Sin embargo, este

\* Facilidad de difusión del boro

proceso no es adecuado por razones económicas ya que el boro amorfo es más caro que otros componentes sólidos que pueden ser utilizados como sustancias productoras de boración.

#### 4.1.4 PROCESO DE BORADO CON AGENTES GASEOSOS

Los haluros de boro, el hidruro de boro y el boro orgánico son los componentes que con mayor frecuencia se utilizan como agentes borantes gaseosos.

Las características favorables de los agentes borantes gaseosos son:

1. Más uniforme distribución del boro como resultado de la circulación del gas.
2. Mejora en la estabilidad de la temperatura dentro de la carga comparado con el proceso con el tipo de agentes en polvo, y -- más fácil manipulación de las piezas, ya que no necesita subse-  
cuente limpieza.

En la práctica, el hidruro de boro ( $B_2H_6$ ) está descartado -- como agente borante ya que es altamente tóxico.

#### 5. NECESIDAD DE REALIZAR UN TRATAMIENTO TERMICO DESPUES DEL BORADO

Los experimentos han demostrado que el tiempo excesivo de -- calentamiento en el temple conduce a una profunda oxidación de -- las capas boradas las cuales tienen una forma esencialmente ---- intergranular. Dicha oxidación afecta adversamente la continuidad de la capa y su adhesión a la base como resultado de lo cual la -- capa se desmorona durante las operaciones finales.

La dificultad en los tratamientos térmicos es que, durante el calentamiento para el templado, las capas boradas deben ser protegida contra la oxidación, y la deformación de las partes debe ser prevenida durante el calentamiento y el enfriamiento.

En aquellos casos donde las partes boradas están sujetas a cargas sustanciales en operación, el metal base deberá ser lo suficientemente rígido para proteger la capa borada contra perforación, consecuentemente se recomienda que las partes sean templadas y revenidas después del borado.

El nitrógeno puro no produce efectos negativos sobre el boro. En cambio cuando el nitrógeno está impuro (conteniendo oxígeno), las capas empiezan a oxidar a temperaturas tan bajas como 700 °C.

El tratamiento térmico debería llevarse a cabo, cuando sea posible con la exclusión de oxígeno por ejemplo en baño de sales o al vacío.

## 5.1 TRATAMIENTO TÉRMICO DE LOS ACEROS BORADOS

Las piezas boradas pueden ser sujetas a subsecuente tratamiento térmico sin dañar la calidad de la capa, su sujeción al metal base y su resistencia al desgaste.

El endurecimiento es necesario cuando las superficies boradas estarán sujetas a altas presiones superficiales.

El tratamiento térmico asegura que la superficie extremadamente dura de la capa borada no se destruya como un resultado de la deformación del sustrato. Sin embargo, la precondición para esto es que el sustrato sea un acero templable y que la tempera-

tura de temple esté por abajo de la temperatura eutéctica de 1149 °C para evitar la licuación de la capa.

## 5.2 RECOMENDACIONES ANTES DE EFECTUAR EL TRATAMIENTO TÉRMICO DE LAS PIEZAS BDRADAS

- 1.- Las piezas debe ser austenizada en una atmósfera inerte, preferiblemente en un gas inerte, o en una sal neutra y revenida
- 2.-a) Templarlo en aceite tibio es recomendable, sin embargo esto depende de la templabilidad del material.
- b) El templado al aire o el templado en sales fundidas pueden minimizar los esfuerzos superficiales.

Las temperaturas para el tratamiento térmico deberán seleccionarse de acuerdo con el tipo de material utilizado, como si no tuvieramos la capa boreada.

En caso de aceros de baja aleación con bajo contenido de carbono ocurre un enriquecimiento de carbono en la zona de difusión del boro bajo la capa boreada obteniéndose una estructura totalmente martensítica en esta región cuando se lleva a cabo un revenido a causa del temple suave (o moderado) y generalmente no se genera grietas.

Para aplicar tratamientos térmicos largos se deberán llevar a cabo eliminando si es posible el oxígeno.

Bajo la capa boreada ocurre o se da una zona de difusión con un resultado del enriquecimiento de carbono. Este aumento en el contenido de carbono así como en el del boro origina una transición más homogénea de la dureza del material boreada al sustrato.

Si se detectan fracturas en la superficie, normalmente éstas no se deben a fallas en la capa borada. La mayoría de las veces estas se deben a un inapropiado procedimiento durante el borado ó en el subsecuente tratamiento térmico, no adecuado para el material usado (la formación de grietas se debe frecuentemente al tipo de sustrato).

El alto grado de dureza de la capa borada a la dureza del sustrato es suavizado por los subsecuentes tratamientos térmicos.

- a) Después del borado a (900°C durante 4 horas) directamente templado en un baño de aceite y subsecuentemente revenido.
- b) El acero de media aleación y alta calidad templado directamente en aceite y revenido a 550°C no generó grietas.

Estos son dos ejemplos del revenido subsecuente, directamente después del borado sin permitir que las piezas se enfrien y calentarlas nuevamente en un horno con gas inerte o en un baño neutro de sales.

### 5.3 SOBRECALENTAMIENTO O TIEMPOS EXCESIVOS DE CALENTAMIENTO EN EL TEMPLE.

El intervalo satisfactorio de temperaturas de temple de los aceros al carbono, no aleados, se representa en la fig. 1. Los aceros hipoeutectoides se templen desde temperaturas comprendidas entre los 30 y los 50°C por encima del punto  $A_c_2$ , y los Hiper-eutectoides entre 30 y 50°C por encima de  $A_c_1$ .

Los aceros templados desde estas temperaturas presentan martensita con agujas finas o no resolubles.

Si se sobrepasan estas temperaturas, se obtiene en el temple martensita con agujas tanto más bastas cuanto más se sobre pasó - el límite de temperatura de temple, es decir cuanto mayor fué el sobrecalentamiento.

La martensita de agujas bastas es muy frágil y debe evitarse su formación en el tratamiento, procurándose obtener una martensita muy fina, incluso irresoluble, que es la que tiene mayor --- tenacidad.

Al aumentar el sobrecalentamiento incrementa la cantidad de austenita retenida, lo que da lugar a una disminución de la dureza de temple. A veces se dice que el acero está sobre-templado.

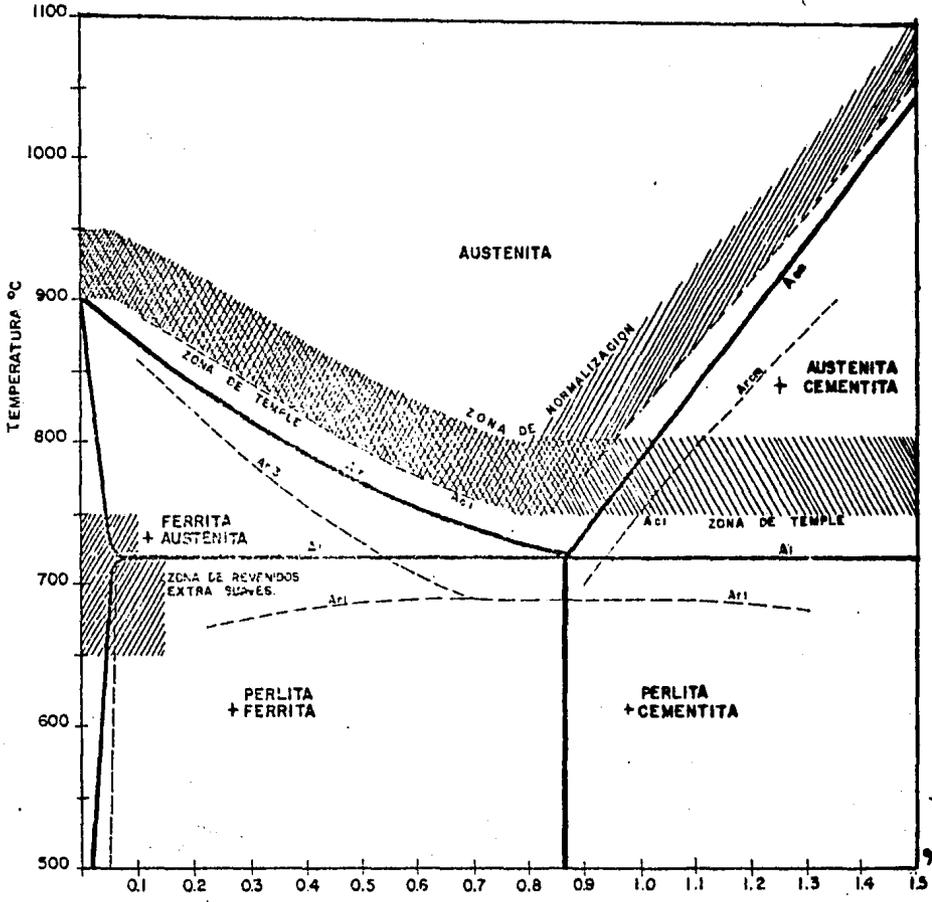


Fig.1 Diagrama de equilibrio hierro-carbono.

## 5.4 FORMAS PARA EVITAR LOS DEFECTOS EN EL TEMPLE

### 5.4.1 VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO INSUFICIENTE

El acero debe enfriarse desde la temperatura de temple con la rapidez necesaria para que se forme con seguridad la estructura martensítica.

La elección del medio de temple ha de realizarse de acuerdo con la composición del acero. Aunque siempre se pretende emplear el medio de temple más suave que permita alcanzar la dureza necesaria es preciso, en muchos casos, emplear medios de más severidad así por ejemplo: para templar secciones grandes, aceros mal desoxidados o aceros de grano fino.

### 5.4.2 TEMPERATURA DE TEMPLE DEMASIADO BAJA O TIEMPO DE MANTENIMIENTO INSUFICIENTE

Muchas veces se comete el error de templar los aceros para temple y revenido desde temperaturas demasiado bajas, o en medios demasiado poco severos, con el fin de evitar distorsiones o ahorrase el revenido.

Este tratamiento debe rechazarse a pesar de que se llegue a la dureza deseada porque si la transformación estructural es incompleta se perjudican la resistencia a la tracción, la resiliencia y la resistencia a la fatiga.

Conviene emplear la temperatura y el tiempo correcto. Con un temple enérgico se obtiene la mayoría de las veces una dureza suficiente, pero con mucha distorsión y peligro de agrietamiento.

#### 5.4.3 ZONAS BLANDAS

La causa más frecuente de la aparición de zonas blandas es la formación de burbujas de vapor sobre la superficie de las piezas que se templen en agua o en aceite; las burbujas impiden localmente el enfriamiento necesario para la formación de martensita y solo se produce troostita.

Las zonas blandas pueden reconocerse por su coloración oscura en contraste con la restante superficie, dura y brillante. Templando los aceros aleados en baños calientes se evitan las zonas blandas. También es ventajoso mover las piezas en el baño, con el fin de que se desprendan las burbujas de vapor.

Los aceros de fácil mecanizado muestran tendencia a la aparición de zonas blandas, porque tienen segregaciones de fósforo y azufre.

En el mecanizado puede ocurrir que no sea posible eliminar todas las zonas decarburadas blandas. El ensayo de dureza permite poner de relieve este defecto.

## 6. LA METALOGRAFIA

La metalografía que es una subdivisión de la Metalurgia Física. Se emplea para el estudio de características esenciales en la microestructura o constitución de un metal o aleación, para relacionar esto con propiedades físicas o mecánicas.

El examen microscópico es sin lugar a duda el más importante pero esto está ligado con la preparación correcta de las probetas pues de esto se espera una amplitud de datos sobre los materiales investigados, por este medio se podrán obtener informes respecto a la constitución del metal, de las inclusiones no metálicas; --- también algunos defectos que pueden hacer variar las propiedades físicas y mecánicas.

## 7. ENSAYOS METALOGRAFICOS

La misión de los estudios metalográficos es el conocimiento de las propiedades y el comportamiento de las aleaciones bajo determinados tipos de sollicitaciones, creando así las bases para el empleo y el diseño de las piezas.

Por la vía metalográfica se pueden comprobar los defectos de elaboración y las causas de las averías y roturas.

Tienen un amplio campo de aplicación en el control y la supervisión de los tratamientos térmicos del acero, porque permiten llegar a conclusiones sobre las temperaturas correctas de temple, los tiempos de mantenimiento, los procesos de enfriamiento y los tratamientos exactos de recocido y de temple y revenido. También permiten la comprobación de los tratamientos de cementación, sir-

viendo para controlar los procesos de cementación, las profundidades de la capa cementada, la fracción de austenita retenida y la estructura.

Con sus métodos pueden reproducirse paso a paso los procesos completos de tratamiento térmico, reconociendo sus defectos y buscando la manera de evitarlos. Los estudios metalográficos se clasifican en macroscópicos y microscópicos.

### 7.1 ENSAYOS MICROSCOPICOS

Para estos ensayos se preparan probetas de 1 cm<sup>3</sup>, aproximadamente, tomadas adecuadamente del material a estudiar. Una superficie bien elegida de la probeta se desbasta y se pule finalmente hasta brillo especular. En la preparación no conviene deteriorar los cantos cuando han de hacerse en ellos observaciones de interés (por ejemplo en el estudio de capas cementadas, nitruradas o boradas). Las probetas pulidas se someten a diversos reactivos de ataque, adecuado a los fines del estudio emprendido, y luego se observan en un microscopio metalográfico a los aumentos que sean necesarios.

### 7.2 ENSAYOS MACROSCOPICOS

El ensayo macroscópico sirve para determinar la limpieza de una aleación. Informa sobre la distribución del carbono y de los elementos no metálicos en el acero: fósforo, azufre y nitrógeno.

Para el estudio macroscópico se prepara una superficie plana por fresado, torneado, cepillado o rectificado, y finalmente se -

la desbasta con papel de esmeril. La situación de estas superficies se elige de acuerdo con el fin pretendido por el ensayo, que determina también el tipo de acabado que debe dárseles. La superficie reparada se sigue tratando por distintos procedimientos -- dictados siempre por la finalidad del estudio realizado.

## 8. DESCRIPCION SOBRE FATIGA

Como la carga en diversos materiales estructurales varía continuamente se puede provocar fractura aunque el esfuerzo máximo sea mucho menor que la resistencia máxima a la tensión, e aún por debajo del punto del esfuerzo de prueba. Este tipo de mecanismo se llama fatiga.

Analizando elementos de máquina que han fallado bajo la acción de esfuerzos repetidos o fluctuantes, después de un cuidadoso análisis se descubre que los esfuerzos máximos reales fueron inferiores a la resistencia última del material y muchas veces menores que el límite de fluencia.

Las fallas por fatiga comienzan con una pequeña grieta. La grieta inicial es tan diminuta que no se pueden percibir a simple vista. Aun es bastante difícil localizarla por inspección con magnaflex o con rayos X.

Como el área esforzada disminuye en tamaño, el esfuerzo aumenta en magnitud hasta que finalmente, el área restante falla de repente.

En consecuencia: las fallas por fatiga se caracterizan por dos áreas distintas de falla. La primera se debe al desarrollo progresivo de la grieta, en tanto que la segunda se origina por la ruptura repentina. La zona de esta ruptura tiene un aspecto muy parecido al de la fractura de un material frágil, como el hierro colado, que ha fallado por tensión.

Se observa a menudo en metales y plásticos, aunque es muy raro en los materiales cerámicos. Los resultados de las pruebas de fatiga suelen representarse en coordenadas logarítmicas de esfuerzo máximo contra el número de ciclos de esfuerzo. Un esfuerzo menor permite en general una vida más larga antes de la aparición de defectos de fatiga. Muchos materiales muestran un cambio pronunciado en la curva hasta alcanzar una línea horizontal, este define el límite de resistencia a la fatiga del material. Si no se observa este cambio pronunciado, el límite de resistencia a la fatiga se define como el esfuerzo cíclico que puede soportarse un número dado de veces, por ejemplo  $10^6$  ciclos.

Cualquiera que no sepa lo suficiente sobre fallas por fatiga puede duplicar o triplicar los factores de seguridad, y así crear un diseño que no fallará. Pero tales diseños no serán competitivos en el mercado actual, ni tampoco los ingenieros que los hayan realizado.

Es conveniente recordar que el factor tamaño es muy importante, los especímenes pequeños de material representativo pueden dar resultados distintos en las pruebas de fatiga en el laboratorio a los de especímenes de tamaño o estructura real mayores. Esto se debe a las concentraciones de esfuerzo, que característicamente aparecen en las discontinuidades superficiales, resquicios en la superficie u hoyos de pernos.

## 8.1 RESISTENCIA A LA FATIGA Y LIMITE DE RESISTENCIA A LA FATIGA

Para determinar la resistencia de materiales bajo la acción de cargas de fatiga, las probetas se someten a esfuerzos repetidos e variables de magnitudes especificadas y, así, se cuentan los ciclos o alternaciones de esfuerzos que soportan el material hasta la falla o ruptura.

Para determinar la resistencia a la fatiga de un material es necesario un gran número de pruebas, con la finalidad de encontrar una gráfica más confiable y determine con seguridad el intervalo de rotura por fatiga.

El empleo de papel logarítmico destaca el recodo o ángulo de la curva, que no se manifestaría si los resultados se graficaran en un sistema de coordenadas cartesianas. En el caso de los aceros se presenta el recodo en la gráfica, y más allá de este punto la falla no ocurrirá, cualquiera que sea el número de ciclos. La resistencia correspondiente al recodo se denomina límite de resistencia a la fatiga. En el caso de metales no férreos y sus aleaciones no tienen límite de resistencia a la fatiga, nunca llegar horizontal su gráfica.

La ciencia todavía no ha podido explicar completamente el mecanismo real de la fatiga. Pero el ingeniero tiene que seguir creando cosas que no fallen. Los ingenieros emplean la ciencia para resolver sus problemas si es factible utilizarla. Pero, ya sea factible o no, se debe resolver el problema.

El ingeniero proyectista obtendrá datos publicados en cuanto a valores de resistencia de fluencia, resistencia última y porcentaje de alargamiento y se diseñará tomando en cuenta cargas estáticas y dinámicas. El problema del diseñador estriba en utilizar los datos de ensayo simple a la tensión relacionarlos con la resistencia de la pieza, con independencia del estado de esfuerzo e de las condiciones de carga.

Cuando se trata de aceros el límite de resistencia a la fatiga varia desde, aproximadamente un 40 a un 60 % de la resistencia a la tensión. Se prefiere usar la siguiente relación para predecir el límite medio de resistencia a la fatiga de las probetas de viga rotatoria.

$$S_e = 0.50 S_{ut}$$

El límite de fatiga del hierro colado es algo menor que el del acero. Se emplea la siguiente relación para el hierro fundido

$$S_e = 0.40 S_{ut}$$

## 8.2 FACTORES QUE MODIFICAN EL LIMITE DE RESISTENCIA A LA FATIGA

En esta sección se describirá el efecto de algunas variables en la resistencia a la fatiga, de la probeta obtenido en un ensayo de la maquina de viga rotatoria de alta velocidad. Esta diferencia se puede tomar en cuenta empleando una variedad de factores de modificación cada uno de los cuales corresponde a un efecto -- por separado. Si se utiliza este concepto, se puede escribir:

$$S_e = K_a K_b K_c K_d K_e K_f S_e'$$

donde:

$S_e$  = límite de resistencia a la fatiga del elemento mecánico

$S_e'$  = límite de resistencia a la fatiga de la muestra de viga rotatoria.

$K_a$  = factor de superficie

$K_b$  = factor de tamaño

$K_c$  = factor de confiabilidad

$K_d$  = factor de temperatura

$K_e$  = factor de modificación por concentración del esfuerzo

$K_f$  = factor de efectos diversos

### 8.2.1. RUGOSIDAD DE LA SUPERFICIE

Se reconoció que los diferentes acabados de la superficie, -- obtenidos por los distintos procedimientos de mecanizado, afectan notablemente los resultados de la resistencia a fatiga de los metales.

Para aquellas probetas pulidas (lisas) en que las rayas -- orientadas paralelamente en la dirección de la tensión de tracción principalmente dan los valores más elevados en los ensayos de fatiga.

La resistencia a la fatiga aumenta a medida que la calidad de la superficie es mejor.

En general las fracturas de fatiga se inician en la superficie. En cargas de flexión y torsión nos demuestra que la tensión máxima se produce en la superficie. En Ingeniería se recomienda la aplicación de tratamientos superficiales, para lograr una mejora considerable en la resistencia a la fatiga de los materiales.

#### 8.2.2. EFECTOS DEL TAMAÑO DE LA PIEZA

Cuando se trata de preparar probetas de geometría semejante de diametro creciente siempre presentan diferencias en su estructura metalúrgica y de tensiones residuales, a través de toda la sección transversal.

Factores que afectan al cambiar el tamaño de la probeta:

1. Al aumentar el diametro, aumenta el volumen de la probeta y el área superficial de la probeta, que es donde se presentan las grietas de fatiga y como es mayor la superficie existe una mayor posibilidad de un mal acabado superficial, por consiguiente la duración en el ensayo a fatiga es menor.
2. En probetas lisas o entalladas, cargadas a flexión o torsión, decrece el gradiente de tensiones a través del diámetro y aumenta el volumen del material sometido a tensiones altas.

La tabla, muestra como disminuye el límite de fatiga al aumentar el diámetro de la probetas, en un ensaye a fatiga en flexión alterna de acero al carbono normalizado.

DIAMETRO (pug.)	LIMITE DE FATIGA (psi)
0.30 (7.5mm)	36000 (25.2 Kg/mm <sup>2</sup> )
1.50 (38.1mm)	29000 (20.3 Kg/mm <sup>2</sup> )
6.00 (152.4mm)	21000 (14.7 kg/mm <sup>2</sup> )

Después de muchas observaciones, se concluyó, que en probetas lisas de acero ordinarias al carbono, con diametros variables entre los 0.2 y 1.4 pug. (5 a 35mm) no hay efecto de tamaño sin embargo cuando le hicieron un entalla en la probeta se origina un gradiente de tensiones.

Las superficies sin tratamiento presentan una resistencia baja a la fatiga, debido a las concentraciones de esfuerzos introducidos por las imperfecciones y en los aceros, por la descarbonación de la superficie, tratamientos termoquímicos para contrarrestar estos efectos (endurecimiento superficial).

### B.2.3. CONFIABILIDAD

La vida y la confiabilidad pueden constituir un método más efectivo para medir la eficiencia de diseño que el uso de un factor de seguridad, porque la vida y la confiabilidad se pueden medir facilmente. El método es lógico, pero hay que hacer ensayos adicionales, antes de que se pueda recomendar para uso general. Su mayor utilidad será servir como una guía que ayudará a descubrir cual es lo más efectivo para aumentar la vida y la confiabilidad.

Para determinar la confiabilidad, se combinan las dos poblaciones mediante las ecuaciones:

$$M = M_S - M_0$$

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\hat{\sigma}_S^2 + \hat{\sigma}_\sigma^2}$$

$M_\sigma$  y  $\hat{\sigma}_\sigma$  denota la media y la desviación estandar del esfuerzo

$M_S$  y  $\hat{\sigma}_S$  denota la media y la desviación estandar de la resistencia

Para definir el significado exacto de la confiabilidad, se supondrá que se tienen un gran grupo o población de partes mecánicas. Se puede asociar cierta resistencia  $S$  y cierto esfuerzo  $\sigma$  a cada pieza. Pero como hay un gran número de ellas, existe una población de resistencias y una de esfuerzos. Estas dos poblaciones podrían tener distribuciones semejantes a las mostradas en la fig.2

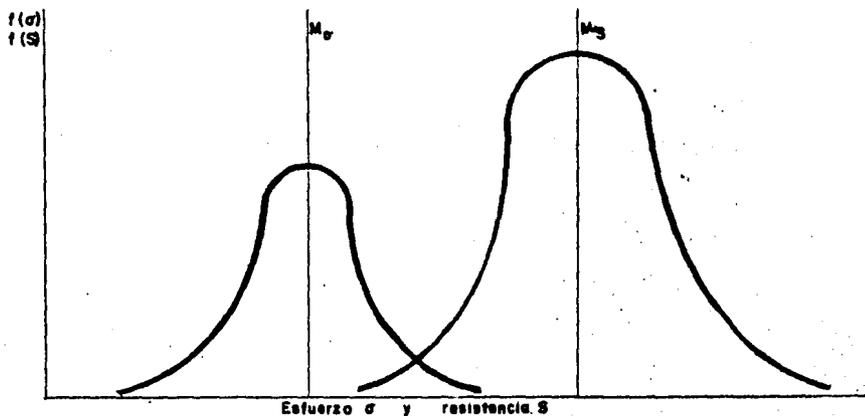


fig.2 Gráfica de distribuciones de esfuerzos y de resistencias, en la que se indica el esfuerzo  $M_\sigma$  y la resistencia media  $M_S$

Haugen y Wirsching muestran desviaciones estandares menores - que 8 %. Esto significa que, para obtener el límite de resistencia a la fatiga correspondiente a una confiabilidad especificada R, -- sólo hay que restar cierto número de desviaciones estandares del - límite medio de resistencia a la fatiga. Por tanto, el factor de confiabilidad Kc es :

$$Kc = 1 - 0.08 Zr$$

La tabla 1 presenta la variable estandarizada Zr, correspondiente a las diversas confiabilidades que se requieren en el diseño, junto con el respectivo factor de confiabilidad Kc .

Tabla 1. Factores de confiabilidad Kc correspondiente a una desviación estandar de 8 % del límite de fatiga.

Confiabilidad R	Variable estandarizada Zr	Factor de confiabilidad Kc
0.50	0	1.000
0.90	1.288	0.897
0.95	1.645	0.868
0.99	2.326	0.814
0.999	3.091	0.753

#### 8.2.4. EFECTOS DE TEMPERATURA

Se debe obtener, si es posible a partir de ensayos reales -- cuando hay que considerar la operación a altas temperaturas.

Como factor de temperatura para los aceros se usa el valor ( para temperaturas de grados fahrenheit)

$$K_d = \frac{620}{420 + T}$$

cuando  $T > 160$  °F, de otra manera se considera que  $K_d = 1$  .

#### 8.2.5. CONCENTRACION DEL ESFUERZO

La concentración del esfuerzo es un efecto altamente localizado. En realidad, los esfuerzos de gran intensidad sólo existen en una región muy pequeña, en los alrededores de una discontinuidad.

En el caso de materiales dúctiles, la primera carga aplicada al elemento causará fluencia en la discontinuidad, lo cual aliviará la concentración del esfuerzo.

Cuando las piezas estan hechas de material dúctil y las cargas son estáticas, no se necesita en absoluto utilizar un factor de concentración de esfuerzo.

Han de considerarse la concentración de esfuerzo, cuando se van a fabricar materiales frágiles, o cuando estaran sometidos a cargas de fatiga.

$$K_f = \frac{\text{limite de fatiga de probetas sin discontinuidades}}{\text{limite de fatiga de probetas con discontinuidades}}$$

Este factor se denomina factor de concentración de esfuerzo en el caso de fatiga, aunque se utiliza también para materiales frágiles bajo cargas estáticas. A  $K_f$  consideremos como factor de reducción de la resistencia de un elemento.

El factor de modificación por concentración del esfuerzo,  $K_e$  y  $K_f$  están relacionados como sigue:  $K_e = 1/ K_f$ .

La sensibilidad a las ranuras (o muescas)  $q$  se define por la ecuación:

$$q = \frac{K_f - 1}{K_t - 1} \quad 0 \leq q \leq 1$$

Si  $q = 0$  el material no tendrá sensibilidad a las ranuras  
 $q = 1$  el material será completamente sensible.

Habiéndose especificado el material, se puede hallar  $q$  y despejar  $K_f$  de la ecuación:

$$K_f = 1 + q (K_t - 1)$$

#### 8.2.6. EFECTOS DIVERSOS

Uno de los motivos para emplear  $K_f$  es tomar en cuenta la reducción en el límite de resistencia a la fatiga, debido a todos los otros efectos; sin embargo, la verdadera razón de usarlo es que sirve como recordatorio de que deben considerarse dichos efectos, pues no se dispone de valores reales de  $K_f$ .

Las fallas por fatiga resultan fallas por tensión, o al menos causadas por esfuerzos de tensión y por consiguiente, todo lo que reduzca un esfuerzo de tensión, disminuirá también la posibilidad

de una falla por fatiga. Hay operaciones como el laminado en frío, las cuales originan esfuerzos de compresión en la superficie de una pieza y ayudan a mejorar en gran medida el límite de resistencia a la fatiga. Desde luego, el material no debe ser trabajado en exceso.

El límite de resistencia a la fatiga de piezas formadas a partir de barras o láminas provenientes de estirado o laminación, así como aquellas que son de forja, puede resultar afectado por las llamadas características direccionales de la operación. Por ejemplo, en elementos laminados o estirados se tiene un límite de resistencia a la fatiga en la dirección transversal, el cual puede ser de 10 a 20 % menor que el límite respectivo en la dirección longitudinal.

## IV. EXPERIMENTACION

## 1. BREVE DESCRIPCION DEL ESTUDIO DE BORIZACION

En este estudio se han analizado los sustratos borizados - obtenidos por medio de un baño de sales fundidas, utilizando como sal aportadora el Bórax, con el fin de obtener un espesor de la - capa uniforme y de alta dureza. Se ha analizado la estructura de la capa borizada básicamente por medio de pruebas de microdureza, metalografía. Se ha determinado, así mismo, la variación de los constituyentes de las fases presentes en la capa borizada haciendo un análisis en función de la profundidad de la capa obtenida.

## 2. MATERIALES Y MUESTRAS

Se utilizaron dos mezclas de sales en las siguientes proporciones:

## PRIMERA MEZCLA

Fluoruro de sodio	NaF	30 %	en peso
Cloruro de amonio	NH <sub>4</sub> Cl	22 %	"
Bórax		45 %	"

## SEGUNDA MEZCLA

Cloruro de Amonio	NH <sub>4</sub> Cl	21.2 %	en peso
Fluoruro de sodio	NaF	21.2 %	"
Cloruro de sodio	NaCl	10.6 %	"
Bórax		42 %	"
Aluminio en polvo	Al	5 %	"

Se utilizaron aceros comerciales AISI 1045 y 4140, en forma de barra redonda de 25.4mm y 19.5mm de diámetro, de 10 a 15 mm de largo aproximadamente. Antes de proceder a ser borizados fueron lijados con el fin de quitar grasas, óxido y sustancias indeseables que puedan intervenir en la difusión del Bórax.

### 3. PREPARACION DE LA PROBETA PARA EL ESTUDIO METALOGRAFICO

La preparación de una probeta para su examen es una preparación sumamente sencilla, pero al realizarla es necesario poner un cuidado especial para obtener buenos resultados.

En nuestro estudio metalográfico utilizamos probetas previamente rectificadas, para después pasar a un lijado uniforme, -- estos se harán primero en una dirección y sucesivamente cambiaremos el sentido al utilizar un nuevo lija de grano menor.

Para este proceso se utilizó lijas del 180, 220, 340, 400, y 600 una vez conseguido una uniformidad en la superficie de estudio es decir hasta haber obtenido un terminado a espejo limpio de cualquier línea profunda provocada por el efecto de las lijas.

Como segundo paso pasaremos al pulido inicial, que consiste en un paño, colocado en un disco a alta velocidad utilizando alúmina como pulimentante, con un grado de pulido de .3 micras de tamaño, la probeta se colocara perpendicular al disco y en diversas posiciones para dar un pulido más uniforme.

Para el pulido final a espejo utilizaremos como elementos de trabajo un cuero fino de pasta de diamante y un elemento lubricador aceite, la forma de lograr un buen acabado es colocar las ---

superficies de las probetas a estudiar en dirección perpendicular al disco, con una presión suave y uniforme, cambiando paulatinamente su posición.

#### 4. DESARROLLO DE LAS PRUEBAS MICROSCOPICAS Y MACROSCOPICAS DE LAS MUESTRAS BORADAS.

De nuestro estudio de aceros borados las muestras fueron sometidas a la acción de un reactivo de ataque adecuada para determinar:

1. La estructura de la capa borada
2. La estructura del núcleo después de los diferentes tratamientos térmicos.
3. La estructura de la capa borada.

En la experimentación para estos ensayos se utilizó muestras de 19.5mm, de diámetro por 2 cm de largo; Sin embargo para tener mayor comodidad para manipular las muestras en la operación de pulido se monto con un material plástico (baquelita) adquiriendo un diámetro de 2.5 cm. Estas bases cuando se han hecho en forma adecuada, son muy resistentes a la acción de los reactivos de ataque que se emplean comunmente.

La muestra y la cantidad de polvo de baquelita se colocan en el cilindro de la prensa de montar y la temperatura va aumentando gradualmente hasta 150 °C y se aplica una presión de moldeo de unos 3580 lb/pulg.<sup>2</sup>. Una vez que la baquelita está adherida con la muestra después de 15 minutos se deja aplicar la presión. Como paso siguiente se efectúa el enfriamiento con aletas hasta una tempe-

ratura aproximada a la del medio ambiente, de esta manera se puede extraer con mayor facilidad la base con la muestra del dado de moldeo.

Una vez terminada el montaje de la muestra se pule sobre una serie de hojas de lija hasta el número 600 quedando la superficie completamente lisa, posteriormente se efectuará el pulido fino que en mucho dependera del cuidado puesto durante los pasos de pulido previo, con este pulido obtendremos una superficie plana libre de rayaduras, que se obtuvo mediante una rueda giratoria húmeda cubierta con un paño especial cargado con partículas abrasivas .

Una vez concluido el pulido final la superficie a estudiar -- estará limpia de impurezas que lograremos a través de un lavado -- con jabón y algodón y un enjuague con alcohol; Posteriormente un secado con pistola de aire.

Preparada la muestra, se utilizó como reactivo de ataque --- "Nital", su fórmula es de 95 a 99 cm<sup>3</sup> de alcohol etílico o absoluto y ácido nítrico HNO<sub>3</sub>, de uno a cinco cm<sup>3</sup>, para que se pongan de manifiesto todos los detalles micro-estructurales puesto que ocurre -- una destrucción selectiva en la superficie atacada para su observación metalográfica.

#### 4.1 ESTUDIO MACROSCOPICO DE LAS MUESTRAS BORADAS

Con el método de macroataque se pudo determinar los defectos de los aceros antes y después de la boración, donde por la acción de un reactivo de ataque adecuado, la superficie preparada, revelará las posibles heterogeneidades o fallas que puede detectarse, entre ellas tenemos:

Descarburización

Segregación dendrítica

Limpieza (elementos no metálicos en el acero)

#### DESCARBURIZACION

En la investigación realizada pudimos detectar en nuestros -- primeros ensayos de capas boradas una fuerte descarburación, debido al tratamiento posterior que se realizó después del borado, luego de haber permanecido 4 horas en sales se les dio un enfriamiento lento en un horno, que cuanto más largo es el tiempo de permanencia en este y cuanto más rica sea la atmósfera en gases oxidantes originamos, consecuentemente una descarburación en la periferia de la muestra.

Esta observación se realizó en un microscopio a bajos aumentos (50 y 60) presentando en la muestra un anillo homogéneo blanco en toda la periferia, indicándonos no una ausencia total de carbono en la superficie sino solo una pérdida notoria en el porcentaje de este elemento en relación con lo encontrado en las zonas aledañas.

Actúan como descarburantes el oxígeno, el hidrógeno y el dióxido de carbono. Oxidan primero a la cementita existente en la ---

superficie y luego al carbono, formando CO y CO<sub>2</sub>. Estos gases se van a la atmósfera externa. Desde el interior del acero emigran continuamente átomos de carbono hasta la superficie y allí vuelve a repetirse la oxidación. El efecto descarburante del hidrógeno se manifiesta para temperaturas de recocido comprendidas entre A<sub>1</sub> y A<sub>3</sub>.

Los aceros descarburados tienden a romperse por fatiga durante el servicio, como consecuencia de que la capa de ferrita es -- blanda, sensible a las entallas.

#### SEGREGACION DENDRITICA

En la observación macroscópica pudimos también detectar una porción central de partículas de carburo, que se deben principalmente a una forja insuficiente del material de partida. Es decir la segregación resulta del crecimiento fuera de equilibrio que -- ocurre sobre un intervalo de temperaturas. La porción central es la parte de la aleación que se fundió a temperaturas más elevadas rodeada por la que se fundió a temperaturas menores que es la -- última capa en solidificarse.

Para evitar en parte esta segregación la fusión, como la difusión tendrán que conservar el mismo ritmo que el crecimiento -- cristalino, habiendo de esta manera una diferencia mínima de la -- composición química del centro hacia afuera.

#### 4.2 ESTUDIO MICROSCOPICO DE LAS MUESTRAS BORADAS

Gracias a la microscopía se puede determinar el tamaño de grano, el nivel de inclusiones de un acero. Sobre todo conseguimos medir la capa borada y determinar microdurezas con el durómetro y así también fotografiar la estructura mediante el montaje de un fusel de cámara sobre el ocular y de esta manera usar el microscopio de mesa para fotografiar la estructura de la muestra en estudio.

En el transcurso nuestra investigación se pudo hacer uso del microscopio electrónico de propiedad del laboratorio de la ESIQIE del IPN. donde se analizó la capa borada, y determinar el porcentaje de elementos que constituyen en cada parte de la estructura, además se pudo apreciar su ductilidad y fragilidad después del templado y revenido, obteniendo fotografías a 1000 aumentos de la capa borada como de la fractura antes y después del ensayo de fatiga de la probeta.

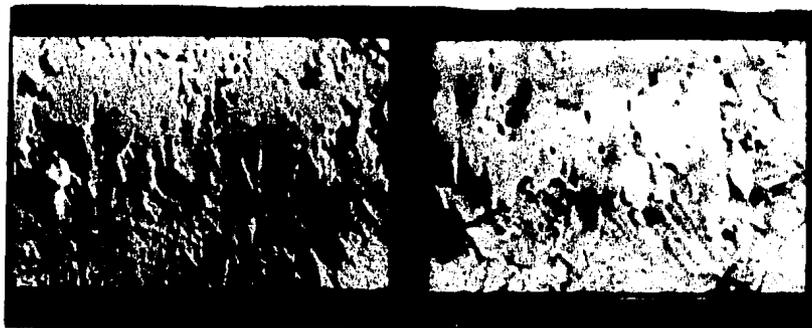


Fig. III | Microestructura de la capa borada a 1000 aumentos obtenida del microscopio electrónico.

#### 4.3 METODO PARA LA DETERMINACION DE INCLUSIONES DE UN ACERO

Para determinar las inclusiones se emplearán las mismas -- muestras del estudio macroscópico. Como observación general es de gran importancia que se obtenga un pulido limpio excentas de impurezas que impidan tener lecturas realistas para la interpretación de resultados.

La manera como se llevo a cabo . La muestra pulida debe -- examinarse con un aumento de 100X y con un diámetro de campo de 80 mm; cada campo se comparó con los campos mostrados en la fig 5

El número del campo que aparece a la izquierda de la fig. 5 para cada tipo de inclusión (A, B, C y D ), que se parezca más al campo que se está examinando debe ser registrado para ambas series, delgada y gruesa. Esto solo se hara para cada campo que contenga inclusiones equivalentes o mayores que la base o la serie No. 1 . Debido a que el tamaño máximo de las inclusiones tipo D indicada en la fig. 5 es de 0.013 mm se deben registrar aquellas inclusiones mayores de dicha magnitud.

Tipo <sup>A</sup>sulfuros

Séries delgadas  
diámetro hasta  
4 micras.

Séries gruesas  
diámetro hasta  
6 micras.

Tipo <sup>B</sup>alúmina

Séries delgadas  
diámetro hasta  
9 micras.

Séries gruesas  
diámetros has-  
ta 15 micras.

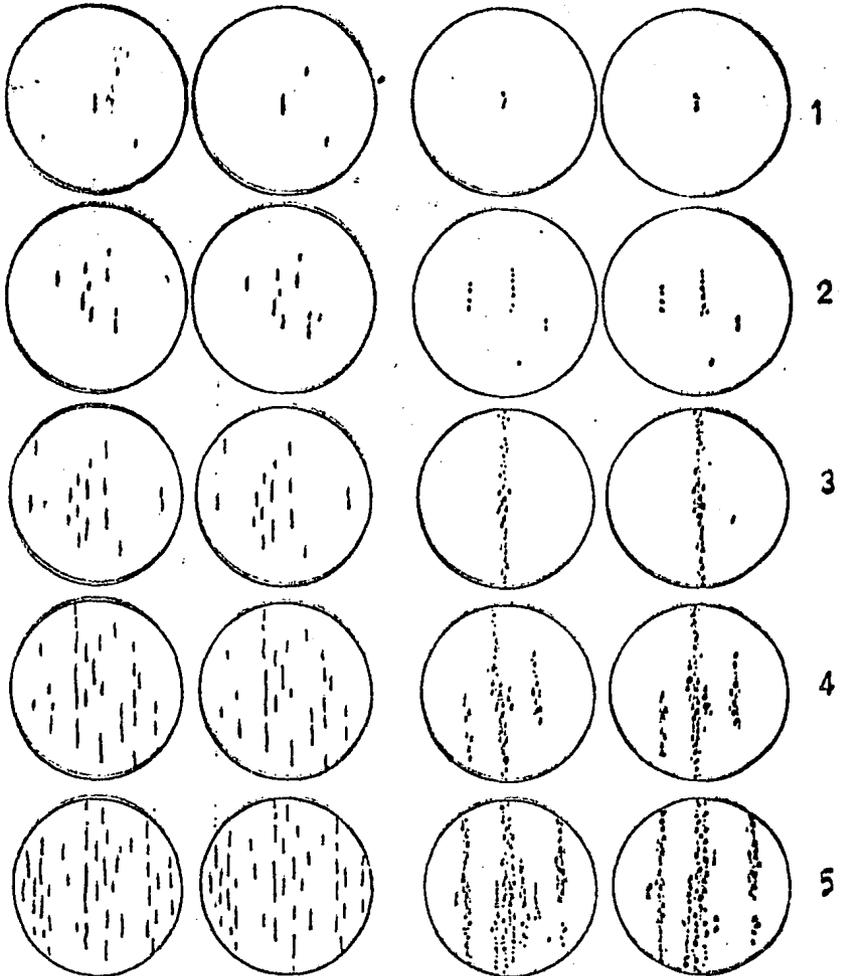


fig 5

C  
Tipo silicatos

Séries delgadas  
diámetro hasta 5  
micras.

Séries gruesas  
diámetro hasta  
9 micras.

D  
Tipo óxido globular

68

Séries delgadas  
diámetro hasta  
8 micras.

Séries gruesas  
diámetro hasta  
12 micras.

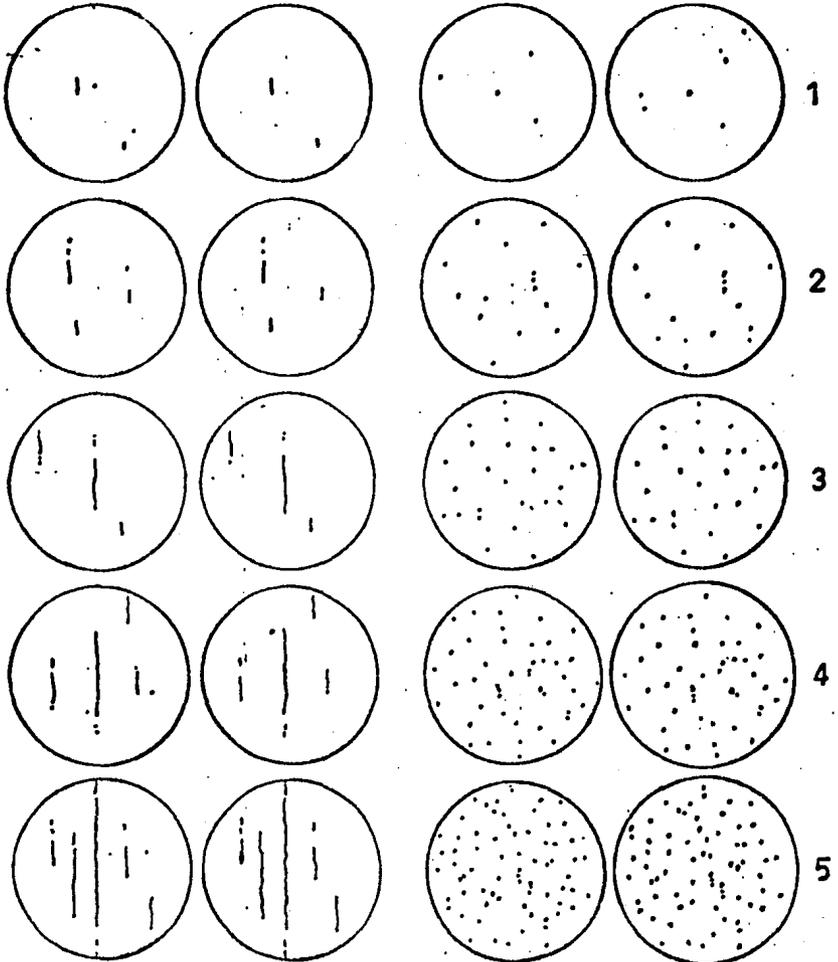


fig 5

## 5. COMO SE REALIZO LAS PRUEBAS DE DUREZA Y MICRODUREZA

Las pruebas de microdureza en las capas boradas se llevaron acabo de acuerdo al método Vickers. Debido a la fragilidad y espesor de la capa que son sumamente delgadas y extremadamente duras en las cuales pueden fácilmente formarse grietas, las cargas grandes deberán evitarse, por tal motivo, deberán usarse cargas de prueba de un máximo de 100 gr. ya que la magnitud de la carga se elige dependiendo de las dimensiones de la muestra y la dureza del material. Cuanto más delgado sea la superficie tanto menor debe ser la carga.

La microdureza Vickers la determinamos con ayuda de tablas según la magnitud medida (d) (promedio aritmético de dos diagonales de la huella) con el durómetro después de que la carga deja de actuar. El durómetro se utiliza para determinar la microdureza que en sí está compuesto de un mecanismo para la indentación de la piramide de diamanté bajo la acción de una pequeña carga y un microscopio metalográfico. En la superficie a ensayar se indenta una piramide tetragonal de diamante; la huella obtenida -- tiene la forma de rombo.

Para la medición exacta se prepara la superficie en cuestión obteniendo una superficie perfectamente pulida y atacada con Nital, antes de la medición. Esto es muy importante, de lo contrario el valor de resistencia de la capa borada no será correcto para una impresión diagonal de menos de  $10\mu$  m, crearía una confusión, ya que se obtendrían valores considerablemente bajos.

Por el método Rockwell determinaremos la dureza del núcleo de la muestra a estudiar y en este caso no nos importará el diámetro de la huella sino su profundidad.

Como punta se emplea un cono de diamante con un ángulo de vértice de  $120^\circ$ , con un diámetro de 1.5875mm. Este cono lo utilizamos debido a que después de un temple su dureza se incrementa notablemente haciendo que la bola de acero templado sea insuficiente para el grado de dureza adquirida.

La indentación del cono se efectúa con auxilio de dos cargas que actúan en forma consecutiva: la preliminar  $P_0$  y la fundamental  $P_1$ , y utilizaremos la escala C y si el material fuera muy duro y de menor grosor escala A con carga fundamental mucho menor que la escala C, y para la bola utilizamos la escala B.

La dureza Rockwell se mide en unidades convencionales en que el número de dureza Rockwell HR corresponderá a una constante de acuerdo a la escala A, B, C, hoy en día la magnitud de la dureza se mide por el indicador del aparato.

Un consejo práctico que debemos tomar en cuenta cuando realicemos nuestras mediciones es que la distancia mínima del borde de la pieza al punto donde deberá efectuarse el ensayo, deberá ser por lo menos tres veces el diámetro de la impresión.

El método Rockwell gracias a la sencillez, rapidéz de medición, la alta exactitud y pequeña dimensión de la huella en la superficie que se experimenta, ha obtenido un amplio empleo en la industria.

## 6. TECNICA EMPLEADA EN EL PROCESO DE BORACION

Las sales que se utilizaron fueron: Bórax como sal aportadora, Cloruro de Amonio, Fluoruro de Sodio, Cloruro de Sodio, como activadoras. Las muestras para la metalografía fueron introducidas primero en cajas rectangulares de 10 por 5 cm de área superficial y 8 cm de alto. Estos recipientes de modo accidental resultaron durante la experimentación fueron aluminizadas, detectándose evidencias de aluminio en la superficie borada, encontrándose que el aluminio permite capa de óxido más uniforme y de espesor relativamente mayor que sin aluminio.

Se tuvieron dificultades en cuanto se refiere a posteriores ensayos como la rotura de la soldadura de las cajas provocando que en los primeros ensayos no se consiguiera boración alguna. Posteriormente se pudo apreciar que la mezcla rápidamente se consumía y no se disipaba ya que el único compuesto que se disipa serían los cloruros. El Bórax y las demás sustancias permanecen en la caja.

El horno de trabajo fue de resistencias con una atmósfera protectora para impedir la oxidación de las aleaciones a borar. Se trabajó primero a temperatura de 850 °C, obteniendo capas de poco espesor y 900 °C, cuyos resultados fueron más alentadores.

Al observar los problemas empleando cajas cuadradas, se construyeron de tubos de 4 pulgadas de diametro sin costura permitiendo esto que la soldadura este adecuada para la resistencia a grandes temperaturas y no pueda existir motivo de aberturas que pro-

voquen pérdidas de mezcla. Con ello se resanó el proceso con - diferentes tipos de mezcla y temperaturas, constatando una vez - más que el aluminio permite una mayor profundidad de penetración de los boruros.

En los ensayos se pudo apreciar que el enfriamiento brusco - al aire provocaba una fractura del material en forma longitudinal. Entonces se decidió enfriar la muestra en el horno a 600 °C por -- espacio de media hora tiempo necesario para que la probeta adqui- ra el equilibrio termico de 900 a 600 °C, evitando de esta manera que la probeta no sufra fractura alguna. Sin embargo surgió un -- nuevo problema, el de la descarburación y es bastante serio en -- cuanto a la resistencia del material, permitiendo de esta manera que a fatiga dure un menor número de ciclos con esfuerzos relati- vamente más bajos de los que se esperan.

Para mejorar la estructura del núcleo y sea más adecuada a las condiciones mecánicas se realizó un temple posterior. Para - este en nuestros primeros intentos utilizamos un medio de enfria- miento rápido (agua) originándose fracturas longitudinales y ra- diales a la probeta de fatiga, la cual fue probada en la máquina Instron a fatiga, teniendo una rotura casi inmediata al poner en marcha la máquina. En la fractura podemos constatar que las grie- tas han sido demasiado profundas además la probeta tenía cambios bruscos de radio originando concentraciones de esfuerzos.

## 7. HORNOS QUE SE UTILIZARON PARA LA BORIZACION

Para la borización se utilizó, un horno de resistencias de atmósfera controlada, obteniéndose los primeros resultados con capas borizadas del orden de 30 micras. El motivo principal de utilizar este tipo de horno fue con el propósito de proteger nuestros recipientes que eran de acero al carbono susceptibles a la descarburation.

Sin embargo se podría pensar que nuestras muestras también tendrían la misma dificultad comparada con la caja que contenía las sales pero como es de esperar siempre estará inmerso en las sales impidiendo de esta manera su decarburation.

En el Borizado, al sufrir primero un desperfecto del horno de atmósfera controlada se tuvo que optar por este tipo ya que -- estos hornos son escasos y difíciles de encontrar. En su lugar se usó un horno de gas con 4 quemadores (única disponible) y no así -- el más conveniente; con estas condiciones se tuvo que diseñar nuevas cajas de acero inoxidable, para que cuando estén en el horno a temperaturas de 900 °C y un periodo máximo de 4 horas se evite la formación de cascarilla sin peligro de que se agriete o se -- desuside.

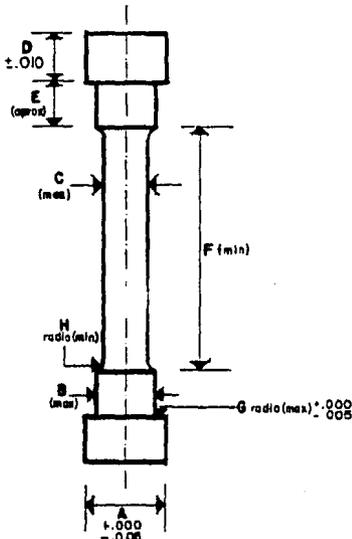
### 8. PROBETA UTILIZADA EN EL ENSAYO A FATIGA

Para el ensayo de fatiga en la máquina Instron 1331 se utilizó la probeta 2741, siguiendo las normas de los ensayos a fatiga.

El rango de fatiga en que puede ser ensayado es de:

MODELO	RANGO DE FATIGA
2741 - 001	11 Kip ( 5 Ton.)
2741 - 002	22 Kip ( 10 Ton.)
2741 - 003	55 Kip ( 25 Ton.)
2741 - 004	110 Kip ( 50 Ton.)

Para efectos de ensayo a fatiga del acero 1045 se tomó el modelo 001 .



RANGO DE FATIGA 11 Kips.

A	0.625
B	0.438
C	0.350
D	0.350
E	0.620
F	1.650
G	0.060
H	0.260

Acotaciones en pulgadas.

## 9. DESARROLLO DE LAS PRUEBAS CON LA MAQUINA INSTRON 1331

- 1.- Revisión del acabado superficial y de las dimensiones. En el montaje se deberá tener cuidado, para que la probeta sea -- uniforme, ya que de no ser así, esto podría ser motivo de -- una falla prematura.
- 2.- Selección del tipo de control. La máquina tiene tres posibilidades de control o variables que se pueden tomar como independientes, los valores máximos y mínimos del esfuerzo, lo cual se realizó a través del control de carga (variable independiente).
- 3.- Selección de la señal de trabajo. Se seleccionó una señal -- senoidal positiva, ya que de esta forma se podrían generar -- ciclos de carga que pasen desde un mínimo, para el cual el -- esfuerzo sea igual a cero, hasta un valor máximo del esfuerzo aplicado.
- 4.- Selección de la frecuencia. Se recomienda trabajar con frecuencias mayores a los 30 Hz. ya que con esto, se reduce el -- tiempo de uso de la máquina. Este valor se seleccionó en -- función del esfuerzo máximo solicitado.
- 5.- Ajuste del contador a cero. Es necesario seleccionar la forma -- trabajo del contador de ciclos. Esto es, si se va a -- contar de uno en uno, diez en diez o de cien en cien ciclos lo anterior estará en función de la frecuencia elegida. El resultado de esta operación nos determinará con gran exactitud el número de ciclos a la fractura.

6.- Desarrollo del ensayo. Después de tomar en cuenta los anteriores pasos se procede a conectar el actuador de la máquina para iniciar el ensayo hasta llevar a la fractura la probeta se etiqueta las dos partes de la muestra, con el fin de tener un registro gráfico y confiable de los ensayos.

Se checó el número de ciclos a la falla, para que posteriormente se desmontará e iniciará otro ensayo, con una nueva probeta.

#### 10. PROBLEMAS PRESENTADOS POR EL DISEÑO DE LA PROBETA

Fractura en el radio de curvatura G, donde se sujeta la probeta por las mordazas de la máquina Instron 1331 .

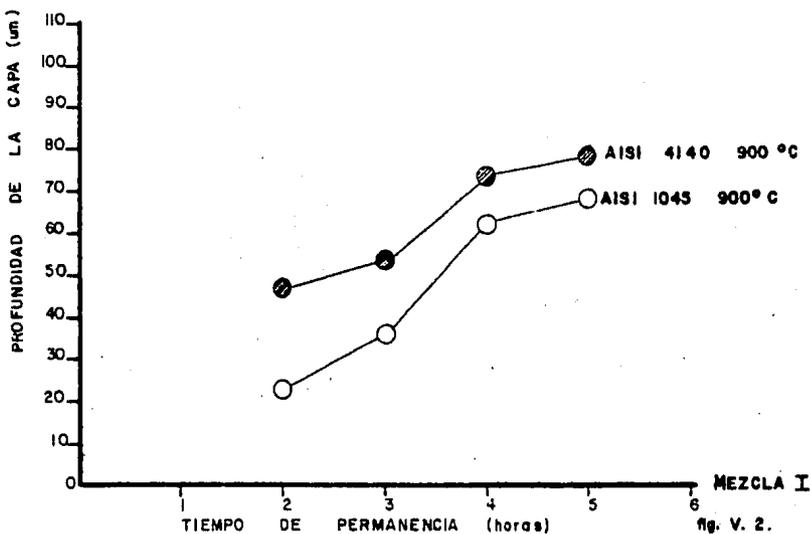
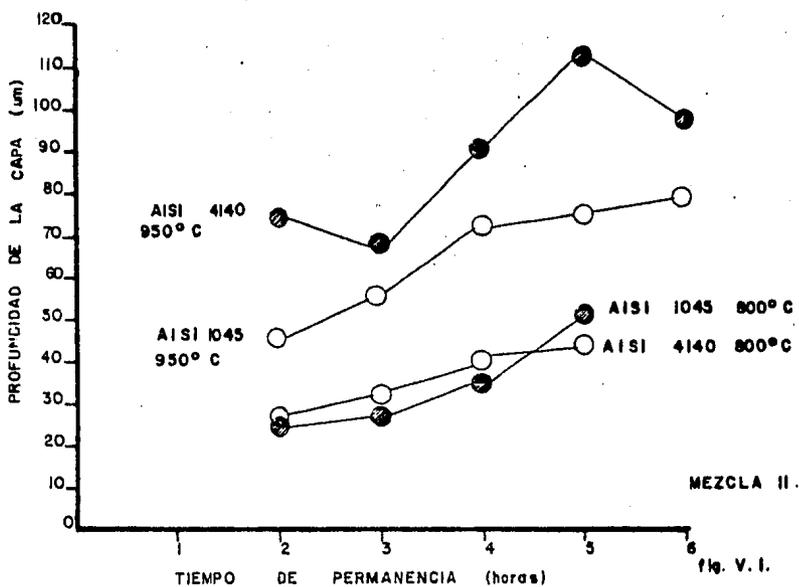
Uno de los factores que se deben considerar en el diseño, para no tener fallas por fatiga es evitar cambios bruscos de sección. Otra posible causa de que las probetas fallaran prematuramente, es por la presencia de rayas en la probeta, especialmente al inicio y final del radio de curvatura G, debido a que no se podrá pulir perfectamente, por lo pequeño del radio de curvatura y el cambio brusco de sección. Esto puede provocar que la probeta falle por tracción y no por fatiga, como es el objetivo.

## V. PRESENTACION Y DISCUSION DE RESULTADOS

### 1. RESULTADOS Y DISCUSION EN CUANTO A LA METALOGRAFIA DEL BORADO

Después de realizar un gran número de experimentaciones a diferentes condiciones, es decir; con diferentes condiciones de mezclas. Se ha encontrado que el espesor de la capa borizada depende directamente de el tiempo, temperatura y a su vez del acero base que se está empleando, como también el tipo de composición para la difusión del boro en el acero a tratar.

En la siguiente fig.v.1 se puede observar la influencia que tiene la temperatura sobre las profundidades de la capa borizada, haciendo notar esa diferencia con algunos tipos de aceros AISI 1045 , AISI 4140 , que después de una serie de investigaciones realizadas se han tomado como un límite mayor y menor que permite la difusión del boro sobre las superficies de los aceros. En ésta gráfica la abscisa representa el tiempo de boración medido en horas y su ordenada, la profundidad de la capa, dependiendo de estas coordenadas podemos notar que a mayor tiempo de permanencia en estos tipos de aceros su espesor va incrementandose en forma rápida; sin embargo después de cinco horas el AISI 4140 a 950°C empieza a disminuir su profundidad de capa no obstante, no quiere decir que si se le somete más tiempo de 6 horas vaya a desaparecer la capa borada, si no que ésta permanecerá casi invariable en su espesor, con la consecuencia de que el núcleo del acero en estudio pueda sufrir un cambio en su estructura perdiendo sus características óptimas de operación.



Diagramas de borizado relacionando el tiempo de permanencia y profundidad alcanzada.

De igual forma podemos hacer notar que a iguales tiempos de permanencia los espesores alcanzados se duplican tomando como -- referencia las temperaturas de 800 °C y 950 °C que a través de -- nuestra gráfica podemos denotar esta observación.

En la fig.V.2 se puede apreciar un decremento de su espesor de la capa borada del AISI 1045, 4140 , debido al cambio de mezcla (I) y por el enfriamiento lento en el horno a 600 °C que produjo un serio deterioro de la capa provocando la oxidación, --- acompañada de una descarburación .

Haciendo una comparación podemos señalar que a 800 °C el proceso de saturación se retarda considerablemente y el contenido - de boro de la capa por difusión decrece ligeramente.

Las temperaturas que hemos tomado como base en nuestra experimentación son de 850 °C y 900 °C debido a que las capas obtenidas por difusión son continuas y menos frágiles así como de fuerte adherencia al núcleo.

El análisis metalográfico realizado sobre las muestras reveló en todos los casos la estructura acicular típica que presenta en los procesos de borizado, fig.3,4,5,6. En estas figuras se observa la variación de la profundidad, de la uniformidad de la capa, y los diferentes espesores alcanzados para las temperaturas y los tiempos utilizados en este trabajo; como también el uso de distintas mezclas, con los diferentes tratamientos térmicos realizados.

En esta etapa del estudio se observó que las muestras tra -

tadas con la mezcla I presentan en la capa borizada una porosidad mucho mayor que en las muestras tratadas con la mezcla II. Aunque el mayor porcentaje en porosidad ocurre en la zona próxima a la superficie para todos los casos, esto es la zona rica en fase  $\text{FeB}$ . La razón de que la porosidad se encuentre mayormente confinada en esta zona, obedece al hecho de que en los primeros instantes del proceso, la velocidad de crecimiento de la capa es muy grande, obteniendo a una ecuación de la forma  $d^2 = kt$ , donde  $d$ , es el espesor de la capa,  $t$  el tiempo y  $k$ , es una constante del crecimiento de la capa; de esta forma, al disminuir la velocidad de crecimiento de la capa, la porosidad también disminuye. El efecto de porosidad es inherente a todos los procesos de difusión efecto Kirkendall, no puede ser evitado, aunque sí puede verse disminuido.

Otra de las razones de que la porosidad se encuentra confinada a la zona en la cual se encuentra la fase  $\text{FeB}$ , es debido a que en los primeros instantes en los cuales se forma la capa, la difusión del boro en hierro y viceversa, es muy rápida, es decir el movimiento de átomos (que está regido por el coeficiente de difusión) puede crear vacancias o huecos que originen la porosidad.

Como una tercera posible causa de la formación de porosidad es debido a la diferencia en coeficientes de difusión del boro con respecto al hierro.



2 hr



3 hr



4 hr

5 hr

TEMPERATURA DEL BAÑO: 800°C  
AISI 8620

x 680



2 hr



3 hr



4 hr

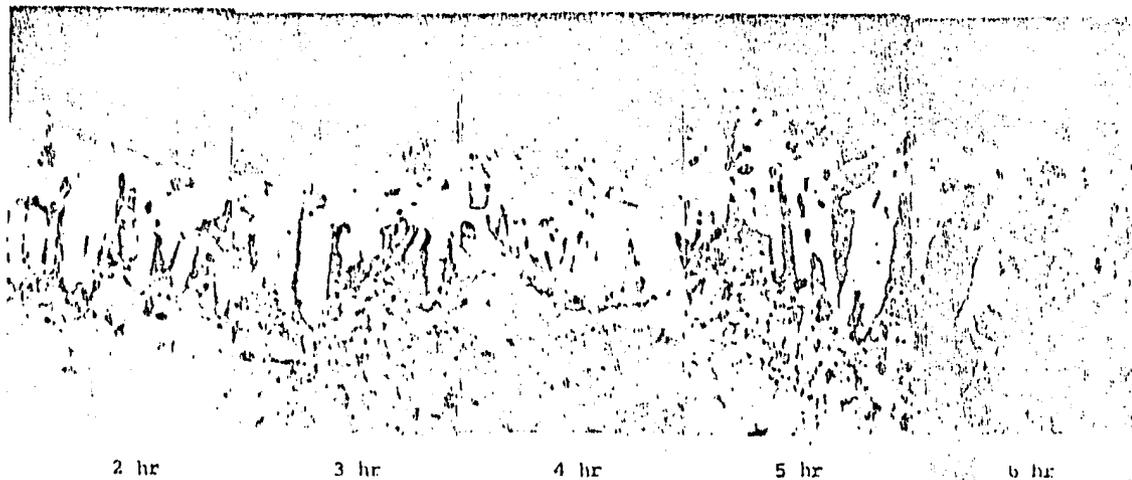


5 hr

TEMPERATURA DEL BAÑO: 800°C  
AISI 4140

Fig.3.- Microestructura de las capas obtenidas

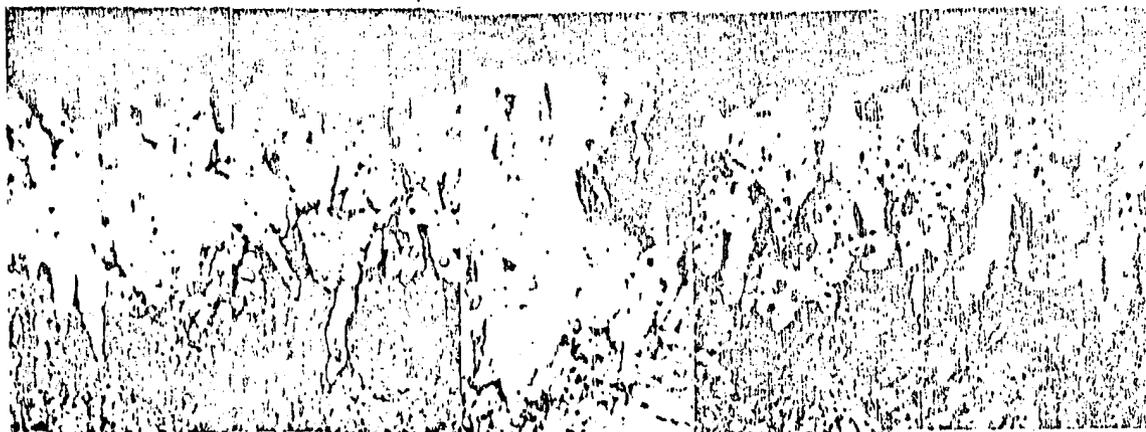
X 600



TEMPERATURA DEL BAÑO: 950°C  
AISI 8620

Fig. 4.- Microestructura de las capas borizadas obtenidas en las condiciones señaladas.

X 680



2hr

3 hr

4 hr

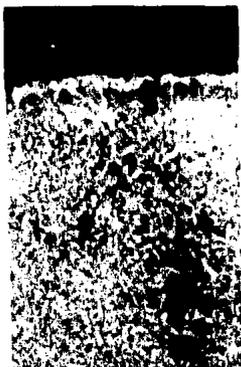
5 hr

6 hr

TEMPERATURA DEL BAÑO: 950°C  
AISI 4140

Fig.5.- Microestructura de las capas borizadas obtenidas a las condiciones indicadas.

X 400



4140 - 2 hrs



1045 - 2 hrs



1045 - 4 hrs

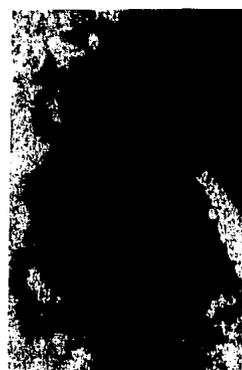
TEMPERATURA DE BORIZADO 850° C



4140 - 3 hrs



1045 - 3 hrs



4140 - 4 hrs

TEMPERATURA DE BORIZADO 850° C

Fig. 6. Microdureza de las capas borizadas de la mezcla I

X 400



1045 - 4 hrs.



1045 - 4 hrs.



1045 - 4 hrs.

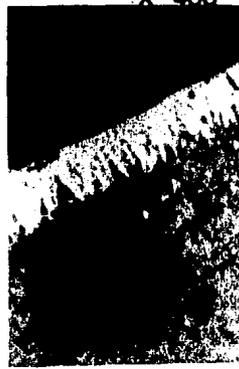
X 400



4140 - 4 hrs.



4140 - 4 hrs.



4140 - 4 hrs.

Fig.6 Microestructura de las capas borizadas de la mezcla II a una temperatura de 900 °C.

## 1.1 ANALISIS QUIMICO DE LAS MUESTRAS DESPUES DE EFECTUADO LA PRUEBA A FATIGA.

Después de haber realizado las investigaciones metalográficas en las diferentes muestras boradas, a través del microscopio se puede notar el gran aumento en la templabilidad de los aceros utilizados, llegando a la conclusión de que si estos aceros además de tener la capa borada, efectuamos posteriormente un tratamiento térmico es decir un temple y un revenido haríamos más resistente su núcleo con una dureza adecuada para nuestra experimentación aumentando de esta manera un límite de fatiga mayor, comparado con el acero no tratado.

En el transcurso de nuestra experimentación cuando efectuamos el temple notamos un cierto pandeo de la muestra, que pudimos intuir que el acero no correspondía. Como acto seguido se pasó a realizar una medición de dureza y nos encontramos que en vez de aumentar había bajado teniendo una propiedad en contra a lo establecido (referente a los aceros de mediano carbono) que después de un temple sufren una transformación martensítica. Microscópicamente se notó el crecimiento de grano debido a que el material se sobre calentó por la permanencia de 1 hora en el horno, y al hacerla enfriar en aceite desde una temperatura no adecuada a la del temple para el acero en observación.

Haciendo una comparación con los datos obtenidos en el laboratorio de la Facultad de Química del Dpto. de Metalurgia de la U.N.A.M. Notamos que las dos primeras muestras corresponden al -

AISI 4140 en cuanto al porcentaje en carbono y azufre; en cambio los dos restantes que se suponían ser un AISI 1045, en cuanto a carbono corresponde a un AISI 1018 correspondiente a las especificaciones de los distribuidores de aceros fortuna.

Como medio de comparación hare mención de algunas características principales del 1045 y 4140 .

#### COMPOSICION QUIMICA

DGN / SAE / AISI / 1045 , 4140

C %	Mn %	Si %	P %	S %	Cr %	Mo %
0.45	0.65	0.35	0.03max	0.03max		
0.40	0.65	0.25	0.03max	0.03max	1.00	0.20

#### PROPIEDADES:

Su = 6749 Kg/cm<sup>2</sup>

Su = 8577 Kg/cm<sup>2</sup>

Sy = 4148 Kg/cm

Sy = 7381 Kg/cm

% de alargamiento en 2" = 22%

% de alargamiento en 2" = 16%

% de reducción de área = 45%

% de reducción de área = 45%

dureza 92 Rb

dureza 95 Rb

Facultad de Química  
Dpto. de Metalurgia



Laboratorio de análisis

Análisis número: 84-122, 123, 124 y 125  
Remitente: M. en I. Bernardo Campillo  
muestra: aceros  
clave: 4140, 4140, 1045 T, 1045 T

muestra núm.	% C	% S
1	0.375	0.0235
2	0.485	0.0070
3	0.188	0.023
4	0.163	0.027

Cd. Universitaria, D. F., 6 de septiembre de 1984

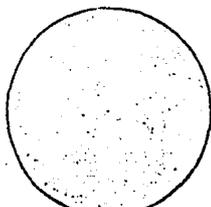
lourdes fong lee

## 1.2 DETECTACION DE DESCARBURACION EN LOS DIFERENTES TIPOS DE ACEROS ESTUDIADOS.

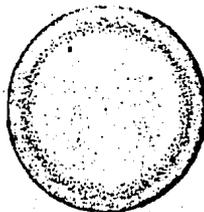
En nuestro estudio experimental hacemos notar una descarburación bastante grande cuando provocamos un enfriamiento isotérmico en el horno a  $600^{\circ}\text{C}$ , como podemos ver en nuestra fig. 9 que muestra la descarburación en la superficie del acero 1045 y 4140

Este defecto obtenido en nuestros ensayos en forma casual, Consiste en un anillo homogéneo a toda la periferia de la muestra notando microscópicamente una zona de ferrita libre, que quiere decir la formación de una capa con un bajo contenido de carbono. Tal capa deficiente en carbono es más blanda que el resto del acero, especialmente después de el temple-revenido necesarios para nuestra experimentación. Por tal motivo se tuvo especial cuidado ya que son muchas las fallas de piezas de acero que se han atribuido a esta causa, consecuentemente los aceros tienden a romperse por fatiga durante el servicio, como consecuencia de que la capa de ferrita es blanda y sensible a las entallas.

No obstante gracias a su detección oportuna en las muestras boradas se pudo disminuir en gran parte la descarburación; manteniendo dentro de un límite pequeño, realizando los tratamientos térmicos en una atmósfera neutra.



Zona decarburada



Zona carburada

## 2. DESARROLLO DE ALGUNAS PROPIEDADES MECANICAS DE LOS ACEROS EN ESTUDIO

### 2.1 RESULTADOS OBTENIDOS DE LA CAPA EN CUANTO MICRODUREZA Y DUREZA EN EL NUCLEO DE LA MUESTRA BORADA.

Apoyandonos en la fig.V.3. podemos determinar los valores de microdureza alcanzados en los tratamientos a las temperaturas y tiempos señalados.

Para el acero AISI 1045 la tendencia es aumentar la dureza al incrementar el tiempo de permanencia; Para el acero AISI 4140 a la temperatura de 800 °C, se observa el mismo comportamiento. A 950 °C la dureza oscila entre 1230 a 1340 HV para los diferentes tiempos de permanencia.

Se puede observar que la mezcla II las durezas alcanzadas son significativamente menores que con la mezcla I.

La dureza alcanzada durante el borizado es debido unicamente a la formación de FeB y Fe<sub>2</sub>B en la superficie de los aceros. De esta manera, la dureza media es una indicación de la cantidad de boruros de hierro formados durante el tratamiento, siendo el FeB más duro (2300 HV) que el Fe<sub>2</sub>B (1900 HV); es por esto que todos los procesos de borizado tratan de evitar en gran medida la formación de FeB y evitar la fragilidad inherente a esta fase. En este estudio; como puede observarse en la fig.V.4 la fase predominante es Fe<sub>2</sub>B a partir de una profundidad de 20  $\mu$ m.

Como antes mencionamos el metodo Rockwell escala C utilizamos para determinar la dureza del núcleo del acero en estudio en

que después de un temple en aceite encontramos como dureza máxima 60 HRC hasta 30 HRC como mínimo gracias a un revenido posterior ( la cifra indica la dureza encontrada y la letra C la escala utilizada). La manera como obtuvimos estos resultados es tomando a la muestra tres mediciones consecutivas a una distancia distinta para obtener una dureza representativa.

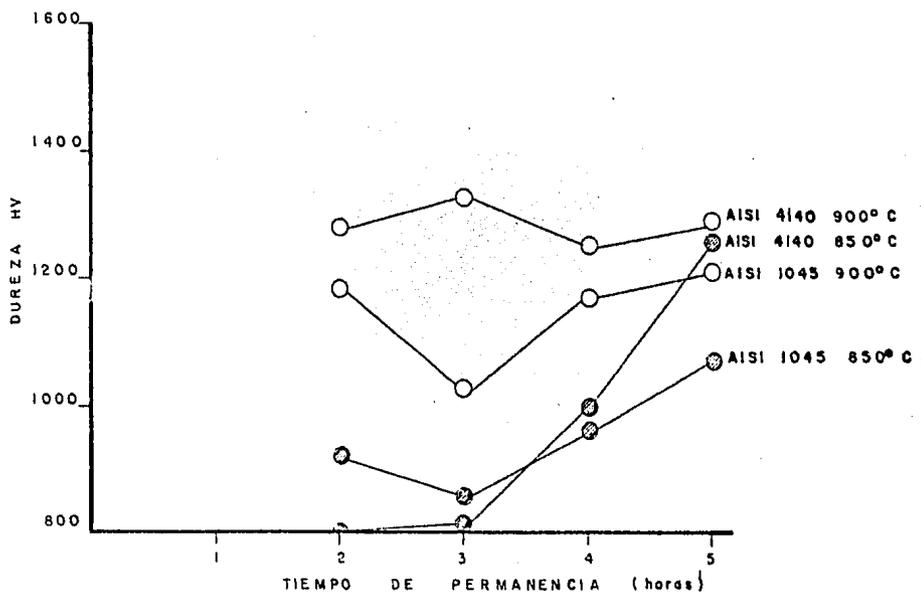


Fig. V.3 Relacion entre el tiempo de permanencia y la microdureza alcanzada de la capa borada.

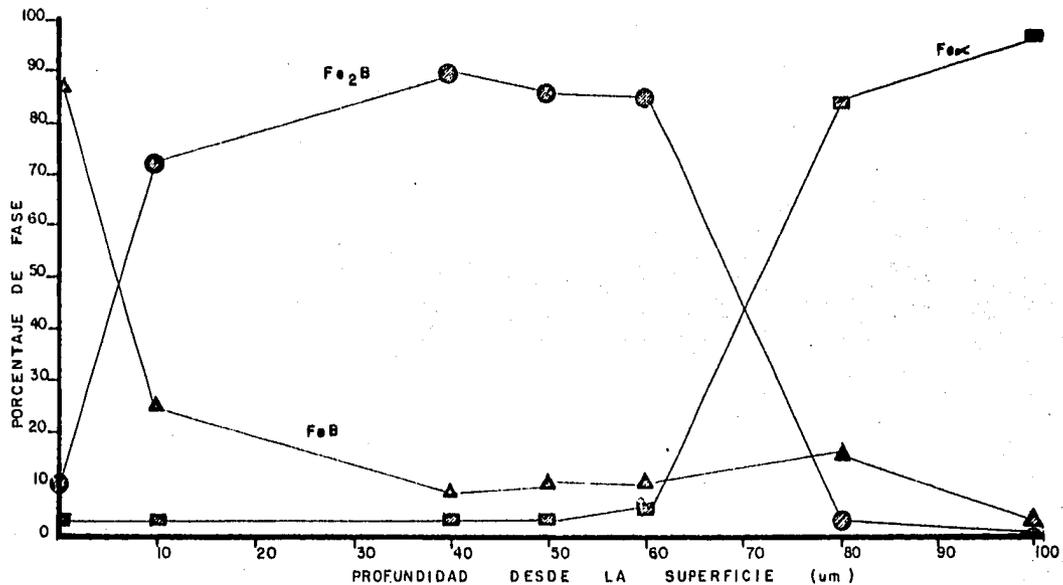


Fig. V.4 Variación del % de fase en función de la profundidad e partir de la superficie AISI 1045 4hrs.

## 2.2 FRACTURAS ENCONTRADAS EN LAS PROBETAS DESPUES DE SER BORI- ZADAS Y TEMPLADAS EN ACEITE.

Un gran problema encontrado durante nuestra experimentación consistió en el gran aumento en la templabilidad de los aceros - utilizados después de efectuado el proceso, encontrando que los - aceros eran capaces de templarse con el enfriamiento al aire. En nuestra investigación para el acero AISI 4140, 1045 con la primera mezcla se presenta la fractura del acero en el enfriamiento - 900 °C en aceite frío. En la fig. V.5 que después de un corte traversal de la muestra y haciendo uso del microscopio del IPN. de barrido podemos apreciar los dos tipos de fractura frágil y dúctil en que dichas fracturas empezaron en la superficie del material, y se originó en diversos puntos en dirección longitudinal en todo lo largo de la probeta, que después de un análisis fractográfico de las muestras podemos enumerar las causas que provocaron el agrietamiento:

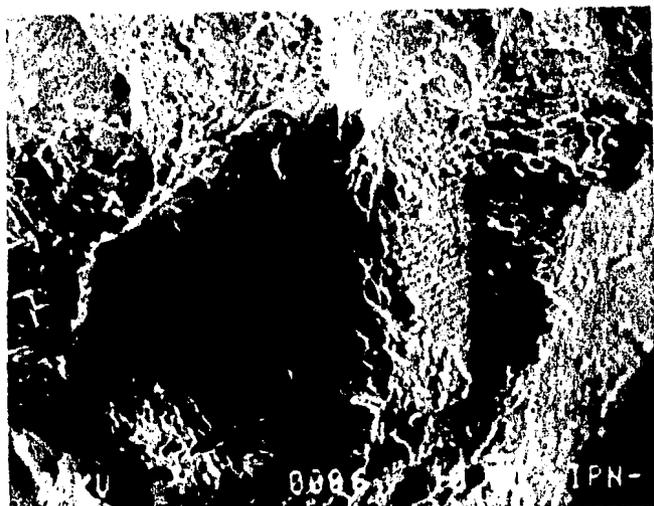
- 1.- En una de nuestras observaciones y que podemos achacar como causa es de que en nuestras muestras reveló la existencia de una gran concentración de boruro en el límite de grano austenítico lo que asociado al enfriamiento origina la fractura.
- 2.- Otra causa quizás un poco más experimental, recogida de los laboratorios de Aceros Solar son las heterogeneidades estructurales que se atribuyen a defectos del material ( inclusiones no metálicas, impurezas, limpieza, y segregaciones existente en la zona de ruptura) estas provocan incrementos locales de las tensiones que dan lugar al agrietamiento en el -

enfriamiento brusco desde la temperatura de temple.

7.- Otra causa es la temperatura algo elevada de temple.



Fragil con fisuras internas.



Ductil sin fisuras internas.

fig. V.5. Vista de las diferentes fracturas de una probeta obtenida en el ensayo a fatiga, a 1000 aumentos en un microscopio de barrido

### 2.3. ELEMENTOS ENCONTRADOS EN LOS DOS TIPOS DE FRACTURA

Debido a que se efectuó una fractura prematura haciendo uso del microscopio de barrido del I. P. N. se realizó un análisis de las dos zonas de fractura para identificar las causas posibles o motivo que nos indicara ciertos indicios de estos -- agrietamientos y podamos determinar que elementos fueron los -- promotores de estas fracturas repentinas; sin embargo haciendo uso de una pequeña muestra afectada después del ensayo a fatiga la microcomputadora nos permitió conocer los diferentes elementos que constituyen en esa región tanto en la parte dúctil como dúctil como frágil verificando que las componentes químicas del material están dentro de los límites específicos.

En cuanto a los tratamientos térmicos efectuados como es el temple - revenido se consiguió lograr sus características adecuadas en el núcleo, sin embargo en la capa borada es posible que la existencia de un incremento de volumen, afectando las tensiones internas del material.

AUG. 2, 1984

SPECTRUM 1045/550/1

ENERGY	COUNTS	X-RAY LINES
1.48	3011.	AL KA1, AL KA2,
5.07	1059.	MN KA1, MN KA2,
6.37	91574.	FE KA1, FE KA2,
7.03	11650.	FE KB1,

SPECTRUM 1045/550/1

AUG. 2, 1984

STANDARDLESS EDS ANALYSIS  
(ZAF CORRECTIONS VIA MAGIC V)

ELEMENT & LINE	WEIGHT PERCENT	ATOMIC PERCENT	PRECISION 2 SIGMA	K-RATIO	ITER
AL KA	12.66	23.37	0.61	0.0285	
MN KA	0.64	0.58	0.12	0.0064	
FE KA	86.70	76.36	0.52	0.8552	5
TOTAL	100.00				

AUG. 2, 1984

SPECTRUM 45/550/1.5

ENERGY	COUNTS	X-RAY LINES
1.48	2983.	AL KA1, AL KA2,
5.08	887.	MN KA1, MN KA2,
6.37	83577.	FE KA1, FE KA2,
7.03	10461.	FE KB1,

SPECTRUM 45/550/1.5

AUG. 2, 1984

STANDARDLESS EDS ANALYSIS  
(ZAF CORRECTIONS VIA MAGIC V)

ELEMENT & LINE	WEIGHT PERCENT	ATOMIC PERCENT	PRECISION 2 SIGMA	K-RATIO	ITER
AL KA	11.20	20.83	0.63	0.0251	
MN KA	0.74	0.67	0.15	0.0073	
FE KA	87.99	78.50	0.53	0.8692	5
TOTAL	100.00				

#### 2.4 ENSAYO DE TRACCIÓN REALIZADO EN UNA MUESTRA BORADA DE ACERO AISI 1045 .

Para poder realizar nuestro ensayo a tracción utilizamos una probeta de iguales características, a las que se someterán más tarde al ensayo de fatiga; esto quiere decir que se respetó las normas establecidas por la máquina instron 1331, para la fabricación de nuestro elemento de prueba; así mismo se tomó especial cuidado en el maquinado, respetando sus dimensiones y tolerancias establecidas, como también su acabado superficial.

En nuestro diagrama de tracción, fig V. 6 , podemos hacer notar que la ordenada representa el esfuerzo aplicado y la abscisa el alargamiento porcentual al iniciar nuestra prueba, el esfuerzo aplicado se fué aumentando progresivamente, registrandose las variaciones de su longitud en función del esfuerzo aplicado; con lo que queremos llamar la atención que nuestro material se va estirando a una velocidad de deformación constante.

Las tensiones que no sobrepasan el límite de proporcionalidad prácticamente producen sólo deformación elástica; esto significa que si la carga se elimina la muestra recuperara su longitud original. También podemos hacer notar que la magnitud de la deformación elástica relativa es muy pequeña y depende linealmente de la carga respondiendo a la ley de HOOK.

$$\sigma = E \frac{\Delta l}{l}$$

$$\sigma = E \epsilon$$

Donde:

E = modulo de elasticidad, que caracteriza la rigidez del metal osea, su resistencia a las deformaciones elásticas.

Haciendo una analogía con otros materiales donde se pueda notar su ductilidad. Al sobrepasar la carga el límite de proporcionalidad se altera la dependencia lineal entre la carga y el alargamiento de la muestra. En el diagrama la línea recta pasa a ser curva. A una determinada carga, en el diagrama se suele observar una superficie horizontal, que indica que el metal fluye (se alarga) sin que haya aumentado la carga.

Se dice que el material sobre pasó su límite elástico cuando la carga es de magnitud suficiente para iniciar una deformación plástica, esto es, no recuperable; en otras palabras, el material no recupera su longitud original si se elimina la carga aplicada.

En estos ensayos de tracción donde existe ductilidad se determinará además las características propias de materiales plásticos: el alargamiento relativo y la onstricción (estrechamiento) relativo.

En nuestro ensayo podemos apreciar que el esfuerzo de ruptura y el máximo de tracción serán de iguales magnitudes lo que nos lleva a una fractura de carácter cristalino revelandonos que el material es frágil. Sin embargo podemos decir que toda deformación por más frágil existe una deformación elástica antecedida de cierta deformación plástica (aunque pequeña) con lo que podemos concluir que la diferencia es mínima e imperceptible el punto de cedencia con el de ruptura y a su vez el de tracción máxima.

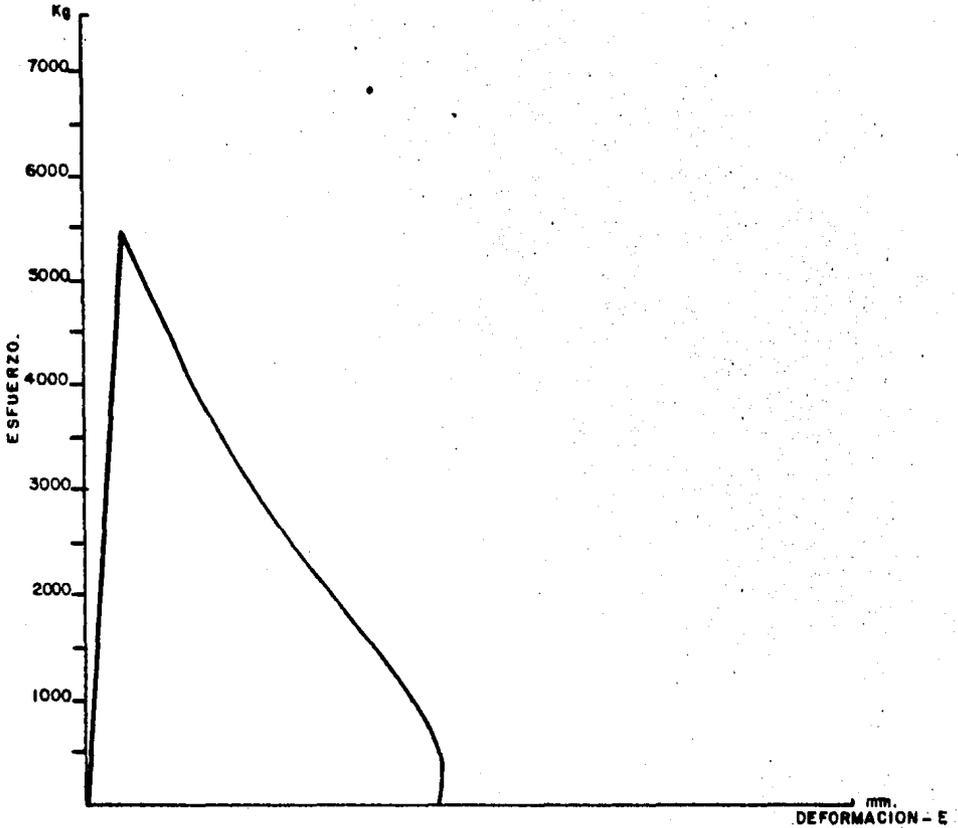


Fig. V.6. Diagrama de tracción obtenido con la máquina Instron de una probeta borada y templada a 60 HRC.

Escala: 0.5 V/cm. para esfuerzo.  
0.25 V/cm. para deformación.

10 toneladas  $\rightarrow$  10 V.

## 2.5 RESULTADOS DEL ENSAYO A FATIGA DEL ACERO 4140

Mencionaremos que se realizó el ensayo a diferentes condiciones, en cuanto a tratamiento térmico, después de haber efectuado una prueba a tracción cuyo resultado obtenido fue de 5300 Kg. ( resistencia última) tomando esta carga como parámetro para realizar los diferentes esfuerzos que permita obtener nuestra -- gráfica con el límite de fatiga respectivo del material.

En nuestros dos primeros ensayos, el temple se llevó acabo, directamente desde la temperatura de borizado, en aceite (80 °C ). No se transformó totalmente la austenita, obteniendo como resultado una dureza de 60 Rc, provocando de esta manera que el material fuera demasiado frágil y de una resistencia mínima para el tipo de ensayo en estudio, teniendo como resultado un número de ciclos para falla pequeño, comparado el esfuerzo aplicado.

Los ensayos 3, 4, 5 además de templarse directamente después del borado, en aceite, se le dió un revenido a 300 °C obteniéndose durezas del orden de 50 Rc, permitiendo así una menor fragilidad. Esto trajo como consecuencia un aumento en el número de ciclos- para falla y a esfuerzos relativamente bajos para obtener buenos resultados.

En los ensayos 6,7,8,9, se realizó el mismo tratamiento -- anteriores con la variante del revenido a 500 °C , obteniéndose durezas del orden de 35 Rc, mejorando considerablemente en cuanto a su resistencia a fatiga y teniendo resultados un poco más confiables, sin embargo, no adecuados para el tipo de material que se está trabajando.

Después de haber realizado una investigación con los fabricantes de acero, permitieron sugerirme la reducción de la dureza de 28 a 30 HRC como máximo, tomando como analogía la dureza de las flachas de barrenar en los pozos petroleros .

Es así que los ensayos 10, 11, 12, 13, 14, 15, después de realizar una investigación de la curva de revenido referida a dureza-contra temperatura, fig. v. 7. se encontró que a 550 °C se obtendría durezas adecuadas para el ensayo a fatiga del 4140; Sin embargo solo se pudo reducir 3 puntos es decir las durezas fueron entre 32 - 33 HRC. Además el temple fue un poco más riguroso. El primer temple se realizó como de costumbre, después de las cuatro horas en el horno con las probetas sumergidas en las sales utilizadas para el borado, se procede a enfriar directamente en aceite hasta alcanzar una temperatura de 300 a 200 °C , para extraerla a continuación y dejarla completar el enfriamiento al aire.

El segundo temple, se apego más a la temperatura óptima de austenización que recomiendan los fabricantes es decir 840 °C se calienta la pieza y nuevamente se deja enfriar en aceite, posteriormente en aire tranquilo hasta que se obtuviera la temperatura del medio ambiente.

Los ensayos 16, 17 se refieren a piezas sin borar templadas a 850 °C y revenidas a 550 °C .

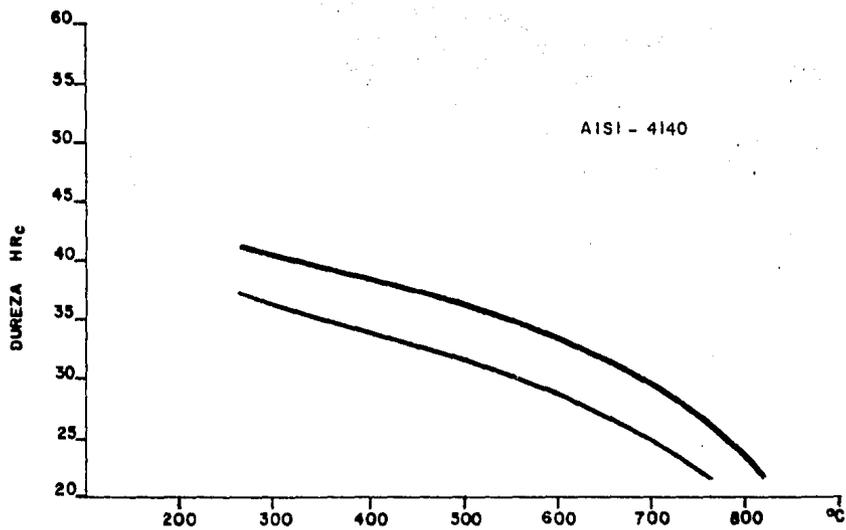
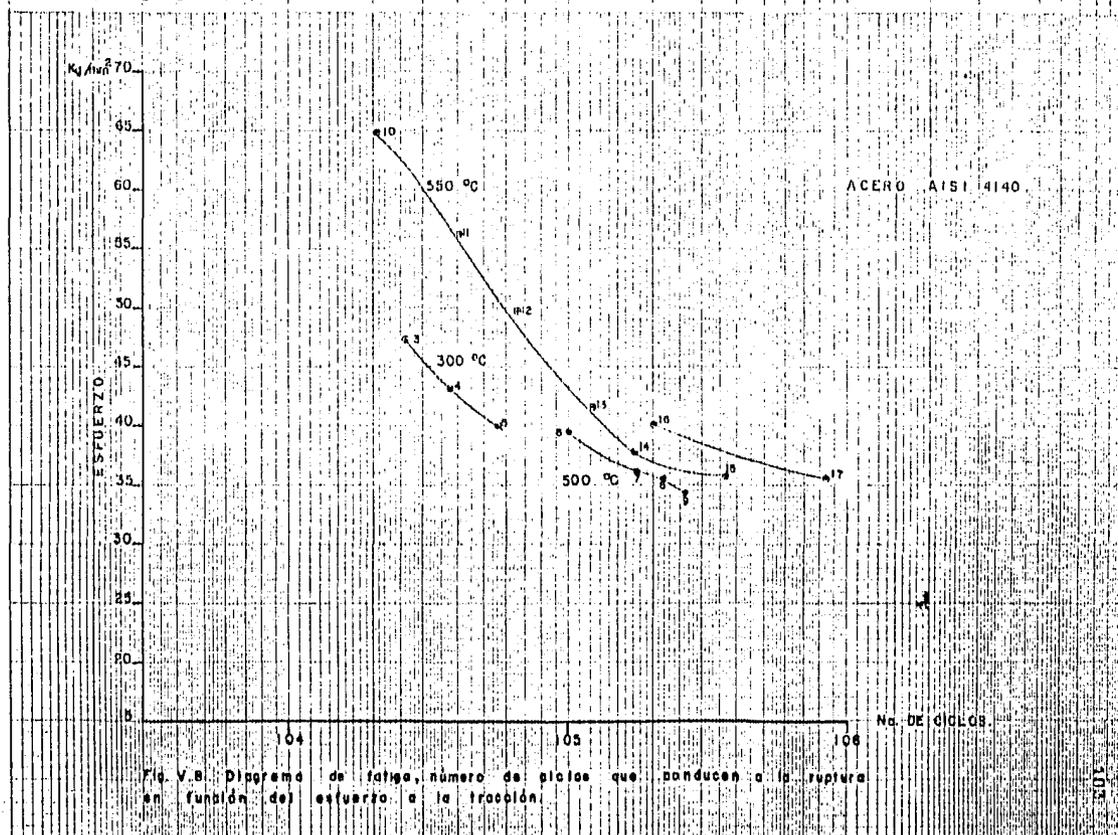


Fig.V.7 Influencia de la temperatura de revenido sobre la dureza de los aceros aleados, templados.





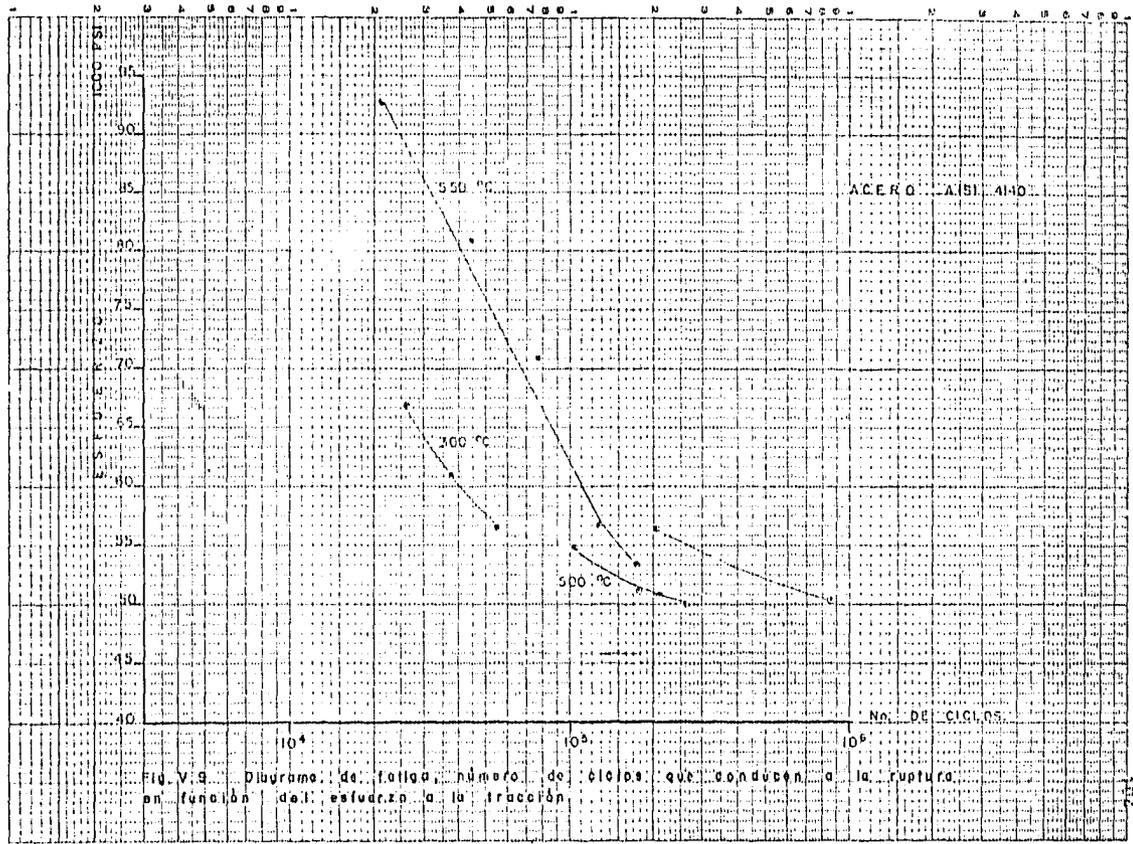


FIG. V.9. Diagrama de fatiga número de ciclos que conducen a la ruptura en función del esfuerzo a la tracción.

## 2.6 RESULTADOS DEL ENSAYO A FATIGA DEL ACERO 1045

Las cinco primeras probetas a fatiga presentaron agrietamientos longitudinales al ser enfriadas en aceite debido a un incremento de volumen lo cual genera esfuerzos elevados de tracción; Sin embargo al adicionarle aluminio se produce un decremento en la cantidad de la fase Fe<sub>3</sub>C, desapareciendo de esta manera su agrietamiento incluso si se enfria la probeta con aceite frío.

En los ensayos 1, 2, 3, el temple se llevó a cabo directamente en aceite después de permanecer a 900 °C en las sales empleadas para el borado y posteriormente un revenido a 300 °C, obteniendo durezas relativamente altas del orden de 50 HRC, teniendo como resultados un número de ciclos bajo comparados con los esfuerzos dados.

En los ensayos 4, 5, 6, 7, 8, 9, se realizó un templado directo después de cuatro horas de borado, en aceite y luego un revenido a 500 °C, Posteriormente se le dió un segundo temple a 840 °C en aceite subsecuentemente un revenido a 450 °C como nos indica la gráfica dureza - temperatura, para obtener una dureza aproximada de 30 HRC adecuado para el ensayo.

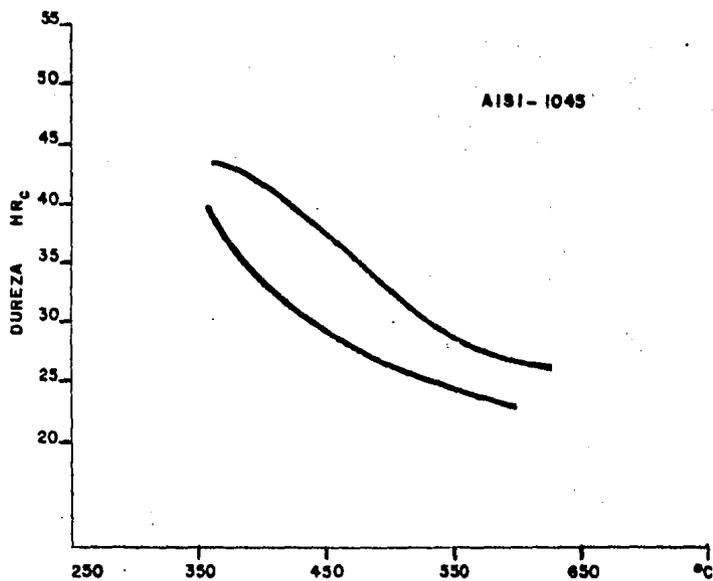


Fig.V.10 Influencia de la temperatura de revenido sobre la dureza de los aceros al carbono de herramientas templados.

## 2.6.1 RESULTADOS DEL ENSAYO A FATIGA DEL ACERO AISI 1045

Prueba No	Diamet. (mm)	Esfuerzo (Kg/mm <sup>2</sup> )	Carga Kg	No Ciclos a fractur	Dureza (HRC)	Tratam.termico °C
1	9.08	50.30	3200	4270	50	Templada
2	8.80	49.32	3000	13920	50	Templada
3	9.20	42.12	2800	99970	50	Templada
4	8.90	64.29	4000	10520	30	Templ.-Rev(450)
5	8.90	56.18	3500	23520	30	Templ.-Rev(450)
6	8.95	48.38	3000	47880	30	Templ.-Rev(450)
7	9.00	39.30	2500	135010	30	Templ.-Rev(450)
8	9.10	35.38	2300	267820	30	Templ.-Rev(450)
9	8.85	34.14	2100	316790	30	Templ.-Rev(450)
10	8.65	37.43	2200	202610	32	Templ.- Rev(450) sin borar.

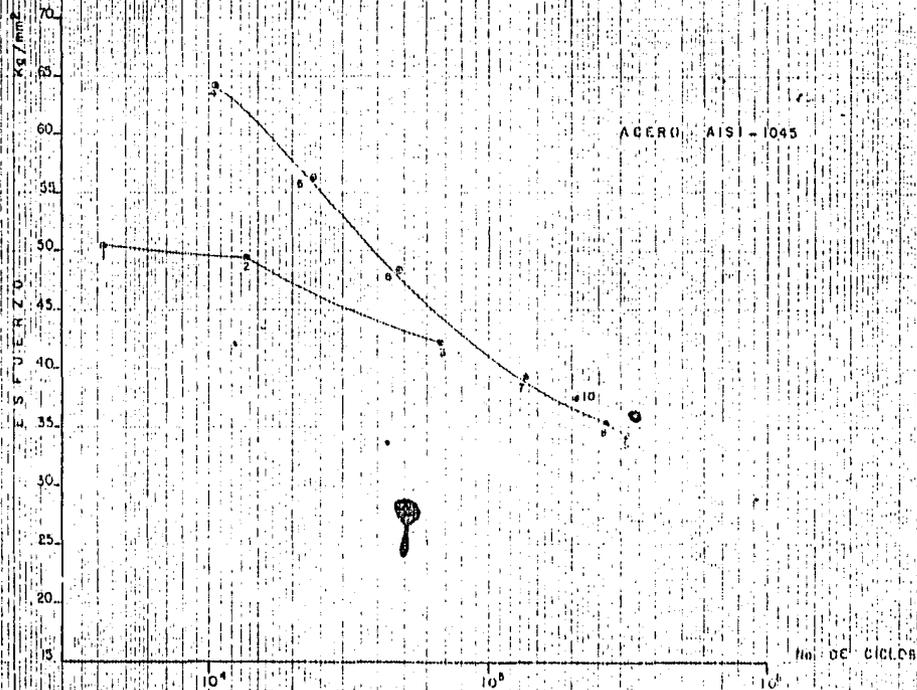


Fig. V.11 Diagrama de fatiga, número de ciclos que conducen a la ruptura en función del esfuerzo a la tracción.

## 2.7 COMPARACION DE LOS RESULTADOS DE LOS DOS TIPOS DE ACEROS BARRADOS EFECTUADOS A FATIGA.

En nuestro estudio como objetivo principal se trato de analizar la resistencia correspondiente al recodo que se denomina Límite de resistencia a fatiga. Así con esto podemos comprender en parte porque ocurre esta falla de manera que se pueda prevenir en el diseño, determinando su vida y confiabilidad para un determinado elemento que este trabajando bajo esfuerzos repetidos o fluctuantes.

En los resultados que se a logrado a través de nuestros ensayos con diferentes esfuerzos repetidos para obtener nuestras curvas de fatiga, de esfuerzo contra número de ciclos, considere pertinente realizar una comparación, que damos a conocer en la gráfica, fig , se observa que la resistencia a la fatiga de los aceros AISI 1045 y 4140 , que ha medida que el esfuerzo se va acercando al límite de resistencia a la fatiga se va conjuntando se y es posible que se logre obtener una resistencia semejante entre estos dos aceros, que dependera en gran parte del tratamiento térmico adecuado.

Al someter a la probeta de ensayo a temple-revenido y utilizando aceros con diferente composición química, se observo que el límite de fatiga se incremento considerablemente y por tanto también a tracción lo que nos permite señalar que nuestra resistencia dependera de la cuidadosa interpretación del diagrama hierro-carbono para localizar la temperatura adecuada del temple.

Así mismo se pretende conocer el medio de enfriamiento óptimo - como también interpretar el diagrama de temperatura - dureza, para que el revenido sea el más conveniente. De esta manera obtenemos que nuestras características sean adecuadas a las necesidades requeridas.

## VI. OBSERVACIONES Y CONCLUSIONES DEL BORADO

Por medio de la técnica de borizado en baño de sales fundidas se han logrado espesores de capas hasta 100 micras para los aceros AISI 4140, 1045, tratados a 900 C en un tiempo de cuatro horas.

La técnica de borizado utilizando bórax como sal aportadora ha dado buenos resultados en la formación de un sustrato formado por FeB y Fe<sub>2</sub>B. Siendo la fase predominante el Fe<sub>2</sub>B en la capa formada.

Los coeficientes de expansión de FeB, Fe<sub>2</sub>B y del sustrato frecuentemente son considerados como el posible causante de esfuerzos en las capas boradas, originando grietas que a través del uso de un cierto porcentaje de Al se puede evitar la fractura -- después del borado.

El acero que se maquinó hubo partes que no correspondían al acero 1045, por lo que se realizó pruebas de dureza después del tratamiento térmico, donde pudimos constatar durezas mucho menores al material en estudio.

Metalográficamente con ayuda del microscopio se pudo apreciar que después del temple-revenido, la estructura del acero en estudio se globulizó, como si hubiera sufrido un recocido, debido al calentamiento que no fué adecuado para un acero AISI 1018 como se pudo determinar a través del análisis químico, que se -- supuso ser un acero AISI 1045.

Como otra prueba que rectifica la no autenticidad del acero AISI 1045, se tomó un material patrón, que con ayuda del esmeril se procedió a comparar, con el material en prueba, obteniendo -- una vez más su negatividad en cuanto a su composición en carbono por la chispa que es menos intensa y apagada correspondiente a un acero AISI 1018 .

Como otra característica que se ofrece en este estudio es que estamos utilizando elementos de boración fáciles de adquirir en el mercado y utilizando métodos sencillos, de costo mínimo y que sean competitivos con los diferentes tratamientos termoquímicos.

A través de los resultados obtenidos también podemos concluir que estos dos tipos de aceros, a través de un riguroso tratamiento térmico podemos asemejar sus características mecánicas, - obteniendo resultados a fatiga muy parecidas.

Como la relativa fina y frágil capa no ofrece mayor resistencia, podemos mencionar que el borado reduce ligeramente los valores de tenacidad y resistencia en las pruebas de tracción, debido a su alto grado de dureza: lo que nos lleva que en caso de resistencia a compresión, la capa borada tendrá un efecto benéfico.

Con los datos obtenidos del ensayo a fatiga, se construyó la curva de fatiga del acero 4140 y 1045. Para la primera muestra un esfuerzo de  $35.75 \text{ Kg/mm}^2$  y la segunda  $34.14 \text{ Kg/mm}^2$  que son los límites a fatiga de los aceros respectivamente, para el ensayo realizado.

La dureza que se obtuvo no fue la más apropiada consecuentemente sus resultados no son tan optimos como se hubiese querido, sin embargo se pudo apreciar la importancia que se le debe dar al tratamiento térmico para este tipo de ensayo.

Sin embargo, podemos señalar que la relación de fatiga --- teoricamente debería ser mayor comparado con los aceros sin y -- con recubrimiento que se publicaron de otras investigaciones -- hechas en diversos países, como en México. Podemos señalar también que la técnica empleada fue totalmente diferente, razón que puede coadyugar a la diferencia en resultados.

También podemos hacer mención que nuestras probetas no tuvieron el mejor acabado, existieron los cambios bruscos de sección así como las zonas concentradoras de esfuerzos (rayas) permitiendo de esta manera que las probetas a fatiga, fallaran prematuramente.

## APLICACIONES DE LOS ACEROS BORADOS

Se puede mejorar el rendimiento de muchas herramientas matrices piezas sometidas a esfuerzos diversos, borando superficialmente con sales es así: Para aceros de alta aleación, por ejemplo aceros refractarios, se recomienda espesores entre 15 y 30 micras, lo que quiere decir capas muy delgadas, ya que se trata de desgaste adhesivo: sin embargo aquellas piezas sometidas a un desgaste de origen erosivo o cualquier otro abrasivo, se les debe aplicar capas gruesas como por ejemplo, para las herramientas de acero rápido (brocas, fresas) dados para estampar, en la forja donde deformamos el acero en caliente por presión, discos para molinos, rodillos para máquinas, piezas para motores de combustión interna engranes, boquillas de quemadores etc.

Generalizando podemos decir que el espesor óptimo depende del grado del acero y del tipo de servicio para el cual la parte borada se aplicará. En aceros para herramientas el espesor óptimo de la capa, usualmente es de 50 a 70 micras y para aceros aleados empleados en construcción de 70 a 120 micras.

A boración se podría someter en piezas que se empleen en los equipos de la industria petrolera. Así por ejemplo, recubriendo con boro los casquillos de las bombas de lodos de petróleo para aumentar su resistencia al desgaste por abrasión consecuentemente estaremos incrementando su tiempo de duración en servicio.

## BIBLIOGRAFIA

1. Yu. M. Lastin Metalografía y tratamiento térmico de los metales.  
Ed. Mir.
2. Apraiz Tratamientos térmicos de los aceros  
Ed. Continental.
3. Avner Introd. a la metalurgia física  
Ed. Mc. Graw Hill.
4. Van Vlack Materiales para ingenieros  
Ed. CECSA.
5. Wanka Schamm Temple del acero  
Ed. Aguilar
6. Diatar Mechanical metallurgy  
Ed. Mc. Graw Hill.
7. V. M. Faires Diseño de elementos de máquina  
Ed. Montaner y Simon S.
8. Borado Publicaciones técnicas del borado  
Estados Unidos.
9. I.P.N. ESIGIE Investigación del borado