



T  
672.142  
P227  
C.2

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica**

\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*

"EVALUACION DE LA RESISTENCIA AL  
DESGASTE POR ABRASION EN ACEROS  
TRATADOS TERMICAMENTE"

**TESIS DE GRADO**

Previa a la obtención del Título de:

**INGENIERO MECANICO**

**Presentada por:**

**CECILIA A. PAREDES V.**

\*\*\*\*\*

GUAYAQUIL

ECUADOR

AÑO  
1993

A MIS PADRES

A MIS HERMANOS





---

Dr. Alfredo Barriga  
DECANO DE LA FIM



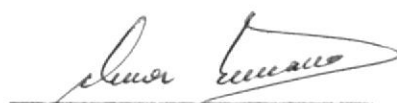
---

Ing. José Pacheco  
DIRECTOR DE TESIS



---

Ing. Julián Peña  
MIEMBRO DEL TRIBUNAL



---

Ing. Omar Serrano  
MIEMBRO DEL TRIBUNAL

## DECLARACION EXPRESA

" LA RESPONSABILIDAD POR LOS HECHOS, IDEAS Y DOCTRINAS EXPUESTOS EN ESTA TESIS, ME CORRESPONDEN EXCLUSIVAMENTE; Y EL PATRIMONIO INTELECTUAL DE LA MISMA, A LA ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL".

(REGLAMENTO DE EXAMENES Y TITULOS PROFESIONALES DE LA ESPOL)

---

CECILIA A. PAREDES VERDUGA

## RESUMEN

A diario en todos los sectores en nuestra industria aparecen signos de desgaste por abrasión en los componentes de máquinas y equipos que tiene como consecuencia disminución en la producción, baja calidad en el material procesado, disminución en la vida útil de un componente del sistema, costos elevados de mantenimiento y a menudo costos más elevados aún debido a los paros en la producción.

La experiencia muestra que el desgaste en sistemas existentes a menudo se combate de la manera más sencilla y efectiva al escoger el material más adecuado además de considerar las condiciones de servicio bajo las cuales trabajarán dichos componentes.

Es por esto que el objetivo del presente trabajo de investigación es el de proveer de información específica sobre diferentes tipos de aceros, los cuales tratados térmicamente podrán ser utilizados para las diferentes aplicaciones en donde se necesita minimizar pérdidas en cuanto a costos elevados de materiales especiales y en la producción debido al desgaste.

Para esto se estudiarán 4 tipos de aceros en los cuales se evaluará la resistencia al desgaste y su relación con el

porcentaje de carbono, dureza y microestructura, antes y después de ser tratados térmicamente.

## INDICE GENERAL

|                                                                                               | PAG. |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| RESUMEN.....                                                                                  | v    |
| INDICE GENERAL.....                                                                           | vii  |
| INDICE DE FIGURAS.....                                                                        | ix   |
| INDICE DE TABLAS.....                                                                         | xii  |
| INTRODUCCION.....                                                                             | 14   |
| CAPITULO I                                                                                    |      |
| 1. Fundamentos Teóricos.....                                                                  | 16   |
| 1.1.- Desgaste: Generalidades.....                                                            | 16   |
| 1.2.- Tipos de Desgaste.....                                                                  | 19   |
| 1.3.- Desgaste por Abrasión.....                                                              | 24   |
| 1.3.1.- Generalidades.....                                                                    | 24   |
| 1.3.2.- Métodos de ensayo de la Resistencia<br>al desgaste por Abrasión.....                  | 28   |
| 1.4.- selección de aceros para la resistencia al<br>desgaste por abrasión.....                | 35   |
| 1.4.1.- Relación entre la resistencia al<br>desgaste y el porcentaje de<br>carbono.....       | 38   |
| 1.4.2.- Relación entre la resistencia al<br>desgaste con la dureza y<br>microestructura ..... | 43   |

|                                            |      |
|--------------------------------------------|------|
| CAPITULO II                                | Pag. |
| 2. Trabajo Experimental.....               | 49   |
| 2.1.- Metodología de trabajo.....          | 49   |
| 2.2.- Materiales.....                      | 50   |
| 2.3.- Equipo .....                         | 50   |
| 2.4.- Ciclos de Tratamientos Térmicos..... | 53   |
| 2.5.- Ensayos de evaluación.....           | 62   |
| 2.5.1.- Ensayo de Abrasión.....            | 62   |
| 2.5.2.- Ensayo de Dureza.....              | 67   |
| 2.5.3.- Ensayo metalográfico.....          | 68   |
| 2.6.- Resultados Obtenidos.....            | 68   |
| CAPITULO III                               |      |
| 3. Análisis de resultados.....             | 86   |
| CAPITULO IV                                |      |
| 4. Conclusiones y Recomendaciones.....     | 90   |
| CITAS BIBLIOGRAFICAS.....                  | 92   |
| BIBLIOGRAFIA.....                          | 93   |
| ANEXOS.....                                | 95   |

## INDICE DE FIGURAS

|                                                                                                                     | Pag. |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1. Proceso de Abrasión.....                                                                                         | 17   |
| 2. Tipos de desgaste.....                                                                                           | 21   |
| 3. Tipos de desgaste.....                                                                                           | 22   |
| 4. Desgaste Localizado.....                                                                                         | 26   |
| 5. Esquema de la Trituradora de Mordaza.....                                                                        | 33   |
| 6. Efecto del contenido de carbono y el porcentaje<br>de martensita en la dureza del acero templado<br>(99.9%)..... | 39   |
| 7. Efecto del contenido de carbono y el porcentaje<br>de martensita en la dureza del acero templado<br>(90%).....   | 40   |
| 8. Efecto del contenido de carbono y el porcentaje<br>de martensita en la dureza del acero templado<br>(60%).....   | 41   |
| 9. Abrasión por Arranque vs. Contenido de Carbono...                                                                | 44   |
| 10. Desgaste vs. Dureza para varios tipos de<br>aceros.....                                                         | 46   |
| 11. Probetas 1,2,3,4.....                                                                                           | 51   |
| 12. Durómetro ROCKWELL.....                                                                                         | 52   |
| 13. Microscópio Metalográfico.....                                                                                  | 54   |
| 14. Máquina de Abrasión.....                                                                                        | 55   |
| 15. Máquina de Abrasión.....                                                                                        | 55   |

|                                                                                                         | Pag. |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 16. Balanza de Precisión.....                                                                           | 56   |
| 17. Horno para Tratamiento Térmico.....                                                                 | 57   |
| 18. Ilustración gráfica del Templado.....                                                               | 58   |
| 19. Ilustración gráfica del Revenido.....                                                               | 60   |
| 20. Representación esquemática del ciclo utilizado<br>durante el Temple y Revenido del acero AISI 1045. | 63   |
| 21. Representación esquemática del ciclo utilizado<br>durante el Temple y Revenido del acero AISI P20.. | 64   |
| 22. Representación esquemática del ciclo utilizado<br>durante el Temple y Revenido del acero AISI 01... | 65   |
| 23. Representación esquemática del ciclo utilizado<br>durante el Temple y Revenido del acero AISI D3... | 66   |
| 24. Relación entre la Dureza y Contenido de<br>carbono en condición de suministro.....                  | 71   |
| 25. Dureza obtenida después del Revenido realizado a<br>diferentes temperaturas.....                    | 72   |
| 26. Relación entre el Desgaste y el porcentaje de<br>Carbono.....                                       | 76   |
| 27. Desgaste obtenido después del Revenido realizado<br>a diferentes temperaturas.....                  | 77   |
| MICROESTRUCTURAS:                                                                                       |      |
| 28. Acero AISI 1045 en condiciones de suministro.....                                                   | 78   |
| 29. Acero AISI 1045 en condiciones de Templado.....                                                     | 79   |
| 30. Acero AISI 1045 en condiciones de Revenido.....                                                     | 79   |
| 31. Acero AISI P20 en condiciones de suministro.....                                                    | 80   |



|                                                     | Pag. |
|-----------------------------------------------------|------|
| 32. Acero AISI P20 en condiciones de Templado.....  | 81   |
| 33. Acero AISI P20 en condiciones de Revenido.....  | 81   |
| 34. Acero AISI O1 en condiciones de suministro..... | 82   |
| 35. Acero AISI O1 en condiciones de Templado.....   | 83   |
| 36. Acero AISI O1 en condiciones de Revenido.....   | 83   |
| 37. Acero AISI D3 en condiciones de suministro..... | 84   |
| 38. Acero AISI D3 en condiciones de Templado.....   | 85   |
| 39. Acero AISI D3 en condiciones de Revenido.....   | 85   |

## INDICE DE TABLAS

|                                                      | Pag. |
|------------------------------------------------------|------|
| TABLA I. Composición Química de los Aceros.....      | 50   |
| TABLA II. Selección del tiempo de calentamiento..... | 61   |
| TABLA III. Ensayo de dureza del Acero 1045.....      | 69   |
| TABLA IV. Ensayo de dureza del Acero P20.....        | 69   |
| TABLA V. Ensayo de dureza del Acero 01.....          | 70   |
| TABLA VI. Ensayo de dureza del Acero D3.....         | 70   |
| TABLA VII. Ensayo de desgaste del Acero 1045.....    | 73   |
| TABLA VIII. Ensayo de desgaste del Acero P20.....    | 74   |
| TABLA IX. Ensayo de desgaste del Acero 01.....       | 74   |
| TABLA X. Ensayo de desgaste del Acero D3.....        | 75   |

## A N E X O S

|                                          | Pag. |
|------------------------------------------|------|
| 1. Diagrama de Revenido, Acero 1045..... | 96   |
| 2. Diagrama de Revenido, Acero P20.....  | 97   |
| 3. Diagrama de Revenido, Acero 01.....   | 98   |
| 4. Diagrama de Revenido, Acero D3.....   | 99   |

## INTRODUCCION

El creciente costo al reemplazar piezas en maquinarias y la necesidad de minimizar material y pérdidas de energía constituyen un continuo desafío para los Ingenieros y Metalurgistas.

Aparecen signos de deterioro en todos los componentes mecánicos en los sectores técnicos durante su operación, es por esto que se necesitan materiales cada vez mejores con una buena resistencia al desgaste en combinación con otras características como dureza, tenacidad y resistencia al ataque químico.

El desgaste se define bajo la norma DIN 50320 como: la pérdida progresiva de material de la superficie de un cuerpo sólido como resultado de influencias mecánicas, esto es contacto y movimiento relativo con otro cuerpo en forma sólida, líquida o gaseosa (1).

La pérdida de material se lleva a cabo de diferentes maneras y son estas precisamente las que identifican los diferentes tipos de desgaste.

Las principales causas de desgaste, que se caracterizan por provocar destrosos muy rápidos, frecuentes y costosos, son: abrasión, impacto, fricción.

Existen causas secundarias y cuyo efecto se considera menos serio, estas son: calor, erosión, cavitación, corrosión. Como una solución para mejorar la resistencia al desgaste de materiales como los aceros comunes es el de hacerles tratamiento térmico, es por esto que se tratará de llevar un estudio sobre aceros con diferentes porcentajes de carbono y elementos aleantes, a los cuales se los templará y después se les hará revenido a distintas temperaturas, para después evaluar su resistencia al desgaste.

## CAPITULO I

### 1. FUNDAMENTOS TEORICOS

#### 1.1.- Desgaste: Generalidades

El desgaste de metales ocurre por el desplazamiento plástico de superficies en contacto y debido al desprendimiento de partículas de metal. El desgaste envuelve siempre daños a una superficie sólida debido a un movimiento relativo entre la superficie de una o más sustancias en contacto con esta, y que generalmente consisten en una pérdida progresiva de peso de material de la superficie desgastada (Ver fig. 1). Puede incluir oxidación, corrosión, fatiga, fluencia, efectos de fricción, deformación por impacto, etc. Esta complejidad es difícil de manejar rigurosamente; consecuentemente en las investigaciones se limita el campo de acción solo a ciertas facetas del desgaste. Los efectos mecánicos son aquellos que usualmente se consideran, ya que existen deformaciones locales o remoción de metal debido a esfuerzos aplicados ya sea directa o

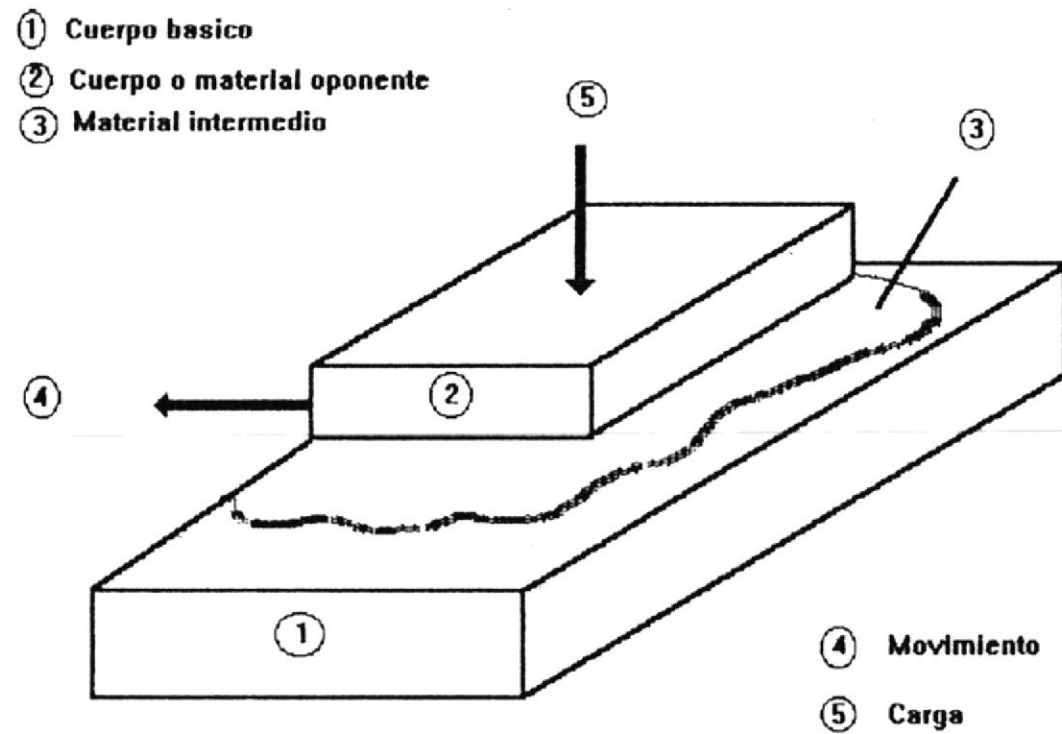


FIG. N 1: PROCESO DE ABRASION

indirectamente a una superficie.

El desgaste puede resultar en una alteración de dimensiones críticas, aumento de vibración, daños por fatiga, disminución en el rendimiento, en la eficiencia y en la vida útil de un sistema. El predecir el comportamiento de un producto bajo un mecanismo simple de desgaste puede ser una tarea difícil, debido a que existen algunos factores que combinados, contribuyen al deterioro de dicho producto.

Existen factores claves que tienen influencia sobre el desgaste y son: variables metalúrgicas (dureza, tenacidad, microestructura y composición química) y variables de servicio (materiales de contacto, presión, velocidad, temperatura, lubricación y corrosión).

Resulta imposible generalizar sobre la capacidad de un material, ( como por ejemplo decir que cierta composición es la más resistente al desgaste), sin considerar las condiciones de servicio, ya que pueden existir materiales que bajo ciertas condiciones de servicio son mucho mejores que otros, pero basta que aquellas condiciones varíen un poco para que otros materiales sean mejores que los anteriores.



### 1.2.- Tipos de desgaste:

El desgaste es una de las influencias más destructivas a que están expuestos los metales. Muchas veces la calidad de los metales depende de las condiciones de su superficie y del deterioro de la misma debido al uso. En el momento en el que el deterioro del material se hace presente, la vida útil de la pieza se limita.

Una de las maneras más importantes para reducir el desgaste es via lubricación. La lubricación reduce el poder requerido para sobrellevar la fricción y proteger las superficies de contacto es por esto que una de las clasificaciones más simples del desgaste se basa en la presencia o ausencia de lubricantes efectivos, se lo llama desgaste lubricado o desgaste no lubricado (2).

Una segunda aproximación para la clasificación del desgaste es aquella en la que se enfatiza la naturaleza de los materiales de contacto y las condiciones experimentales, usando términos descriptivos que son ampliamente aceptados y entendidos (3).

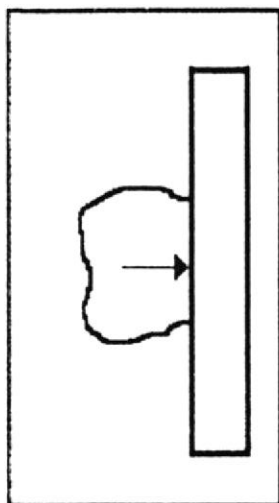
A continuación se muestra un ejemplo de este tipo de clasificación:

- 1.- Metal contra abrasivo no-metálico:
  - a) Abrasión con altos esfuerzos (húmedo o seco).
  - b) Abrasión con bajos esfuerzos (húmedo o seco).
  - c) Abrasión por Erosión (húmedo o seco)
- 2.- Metal contra Metal
  - a) Por deslizamiento (lubricado o no-lubricado)
  - b) Por laminación (lubricado o no lubricado)
- 3.- Choque de líquido o vapor en metales
  - a) Con vapor
  - b) Con gases de combustión
  - c) Con agua
  - d) Con cavitación(4) (Ver Fig. 2 y 3).

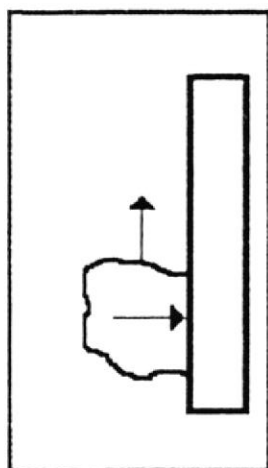
Debido a observaciones a componentes desgastados hechas a través de los años un amplio rango de términos característicos han aparecido para describir el daño causado por el desgaste.

Dichos términos tales como: rayado, arrancado, rozamiento, etc., son numerosos y descriptivos pero no muy informativos de acuerdo al mecanismo de daño.

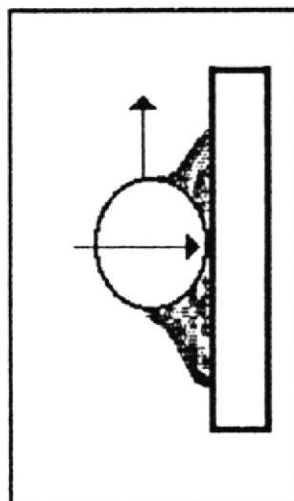
Es por esto que en los últimos años, se han hechos esfuerzos por enfocar el uso de términos,



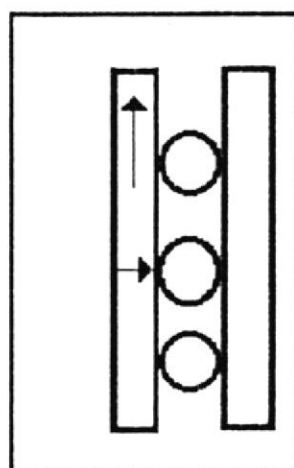
Impacto



Abrasion



Rodadura



Deslizamiento

FIG. N 2: TIPOS DE DESGASTE

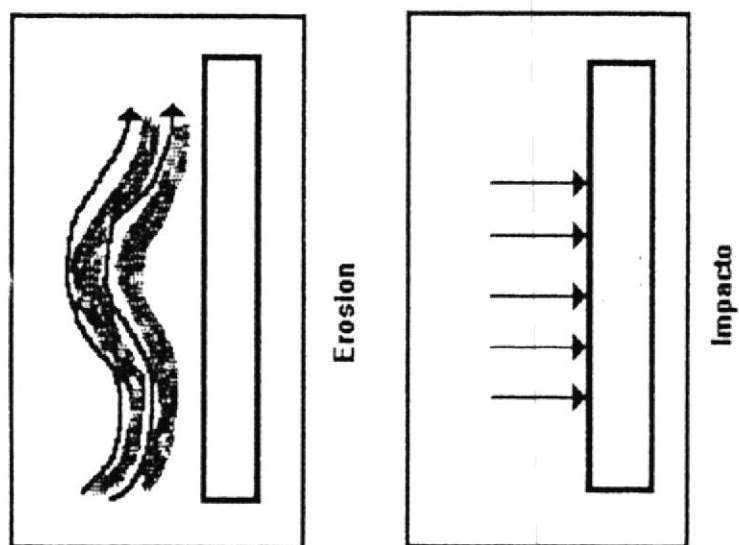


FIG. N 3: TIPOS DE DESGASTE

los cuales sí se relacionan a mecanismos específicos. Ahora los mecanismos de desgaste se pueden categorizar en 4 grupos: abrasión, adhesión, fatiga, y corrosión (5).

El desgaste por abrasión es la remoción o desplazamiento de material desde una superficie por otra superficie mucho más áspera. El cuerpo más duro forma una indentación y corta o desplaza el material opuesto al mismo tiempo que este se mueve a través de la superficie.

El proceso de adhesión envuelve una interacción de dos superficies ásperas y opuestas en movimiento. Cuando las asperezas chocan, se pueden soldar, formando una junta la cual tendrá una gran resistencia a la ruptura mayor que el límite de elasticidad de cualquiera de las dos superficies sólidas. En este caso, la fractura puede ocurrir en cualquiera de las dos asperezas, resultando en una transferencia de material desde una de las superficies en contacto hacia la otra.

El desgaste por fatiga, se refiere a una imposición de un estado de esfuerzos repetitivos (cíclico) en la superficie de un componente, induciendo a un pequeño grado de daño mecánico en la superficie y de regiones subsuperficiales con

cada pulso de esfuerzo. Finalmente, la acumulación del daño tiende a la falla por deformación y/o fractura en las superficies.

El desgaste por corrosión es un efecto sinérgico de reacción química en la superficie con cualquiera de los mecanismos mecánicos de desgaste anteriormente mencionados.

En un proceso de desgaste generalizado, más de uno de estos mecanismos pueden operar simultáneamente; y en las situaciones más prácticas sería muy raro encontrar una situación en la que sólo un mecanismo sea observado.

### 1.3.- Desgaste por Abrasión.

#### 1.3.1.- Generalidades

El desgaste por abrasión envuelve el rozamiento de superficies de contacto localizadas a través de un material suave de acoplamiento (Ver fig.1).

El desgaste más frecuentemente es causado por materiales no-metálicos, pero partículas metálicas pueden también causar abrasión.

Generalmente, un material es seriamente

desgastado o rayado solo por materiales que son más duros que ellos mismos. La mayor protección contra el desgaste se basa en esta generalización, pero existen excepciones.

En la abrasión mecánica simple, las partículas abrasivas primero penetran en el metal, y el resultado de la deformación depende en la configuración local y de la carga, como también de la propiedades mecánicas del material.

Cuando las partículas abrasivas son afiladas y orientadas con el propio ángulo de inclinación, el material es removido por una acción de corte. El material removido por el desgaste se asemeja a virutas diminutas del proceso de maquinado. En otros casos, el proceso de fractura que aparece es muy similar al proceso de desgaste por deslizamiento.

La acción de rasgado o desgarre de partículas duras causa una fuerte deformación localizada (Ver Fig. 4).

La deformación localizada repetida

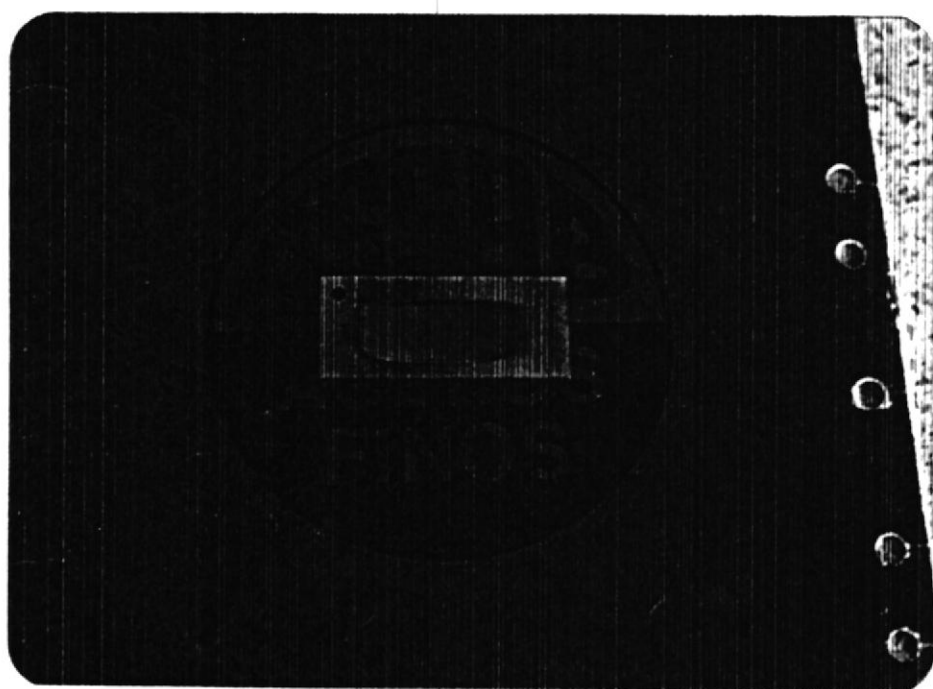


FIG. N 4: DESGASTE LOCALIZADO



conlleva a cambios en la microestructura de la capa superficial con una fractura eventual en la capa subsuperficial y remoción de material. Los contactos abrasivos pueden también ser fases duras en superficies en contacto con una fase suave en la superficie de acoplamiento. Los contactos localizados pueden ser también causado por la pérdida de partículas duras que vienen fijadas en una superficie y son arrancados por la superficie de contacto.

Cuando ocurre la abrasión bajo grandes cargas superficiales, como en molinos de bolas o rodillos o en dispositivos de trituración, la acción es más compleja. El abrasivo es continuamente quebrado o triturado en fragmentos más y más pequeños. Como un resultado de esto, la acción que empieza como rayado y deformación superficial bajo fuerzas que manejan grandes partículas contra la superficie se transforma en corte y acanalados al mismo tiempo que las partículas se tornan en formas más

angulares.

### 1.3.2.- Métodos de ensayo de la Resistencia al desgaste por Abrasión.

Antes de revisar los métodos de ensayo de la resistencia al desgaste por abrasión, es importante revisar los tipos de este específicamente. Comúnmente, se lo divide en tres tipos:

1. La abrasión por arranque envuelve remoción de partículas relativamente toscas de la superficie del acero a desgastar y es similar a la remoción del metal maquinado o rectificado con una rueda rectificadora de grano grueso. Esto ocurre en partes en servicio tales como dientes profundos que manejan rocas afiladas, martillos de impacto para pulverizar, etc. Este tipo de abrasión es al menos en parte responsable por el desgaste en las camisa de las trituradoras.

2. La abrasión por rectificado con altos esfuerzos envuelve la remoción de partículas (microscópicas) relativamente

finas de la superficie a desgastar. La acción de contacto y rozamiento entre las superficies en contacto causa la abrasión al fragmento. Unitariamente los esfuerzos de compresión o los de corte son muy altos. Consecuentemente, los abrasivos más duros, como el cuarzo, son capaces de indentar o rasgar aceros con durezas de 65 a 70 HRC. El metal puede ser removido desde la superficie a desgastar por arranque microscópico o por una combinación de flujo local plástico o por microfisuramiento.

3. La abrasión por bajos esfuerzos y por erosión ocurre por un pequeño contacto de partículas abrasivas muy filudas. Los esfuerzos se deben mayormente a la velocidad y son normalmente insuficientes para causar la fragmentación del abrasivo. La erosión puede también ocurrir cuando existe líquido fluyendo que contiene partículas abrasivas suspendidas, las cuales pasan sobre la superficie. Los líquidos pueden causar erosión cuando una corriente de líquido choca directamente

contra una superficie, cuando un fluido fluye bajo condiciones que inducen cavitación en el líquido adyacente a la superficie, o cuando las gotas llevadas por un gas hacen impacto sobre una superficie.

La corrosión puede ser envuelta en este proceso de erosión, especialmente en líquidos o cuando la temperatura está arriba de la del ambiente.

Cualquiera de los tipos mencionados anteriormente pueden ocurrir bajo condiciones secas o húmedas. Los materiales más resistentes a un tipo de desgaste por abrasión pueden ser menos resistentes a otro tipo.

Consecuentemente, esta clasificación ayuda a la selección de materiales para operaciones específicas. Sin embargo, cuando las aplicaciones abrasivas son clasificadas de acuerdo al tipo, el orden de la serie de materiales generalmente se mantendrá la misma en cada una de las aplicaciones clasificadas bajo cada tipo específico

de desgaste por abrasión.

Generalmente, una combinación de más de un tipo de abrasión es responsable por el desgaste en una pieza en servicio; algunas veces es difícil determinar cual tipo de abrasión es dominante.

Pruebas de abrasión: Cuando las pruebas de abrasión de material bajo condiciones de servicio no son prácticas, las pruebas en laboratorios simulan muy cerca las condiciones de operación seleccionadas.

Sin embargo, en estas pruebas se debe tener en cuenta las siguientes consideraciones:

1. La posición del abrasivo, si es que este es arreglado, como en el papel abrasivo (abrasión en dos cuerpos), o por libre rotación como en el de arena perdida (abrasión con tres cuerpos).
2. Los valores de tamaño, forma y dureza del abrasivo dominante (usualmente el componente más duro en una mezcla).
3. La dirección y velocidad del movimiento relativo durante la abrasión.
4. Las presiones de contacto o cargas en el sistema (6).

Entre las pruebas más importantes se

tienen:

Para el desgaste por arranque se tiene la Trituradora de Mordaza.

El tipo de trituradora de mordaza usada en este tipo de desgaste era una trituradora excéntrica, de articulación simple. Para su producción comercialmente fue modificada para encontrar requerimientos más estrictos de un aparato para pruebas.

Las partes esenciales de la trituradora se muestran en la Fig. 5.

Prueba de Abrasión de la rueda de caucho para bajos esfuerzos. La máquina es una modificación de un aparato comercial. Esencialmente, la máquina consiste de una rueda de acero con un recubrimiento en la periferia de caucho de neopreno de 12.5 \* 12.5 mm. el cual rota a través de un chorro de arena a una velocidad determinada. En la prueba, una probeta de 6 \* 25 \* 76 mm. es presionada contra el caucho con una fuerza de 30 lb.

Los resultados de la prueba deben ser reportados en mm<sup>3</sup> como pérdida de

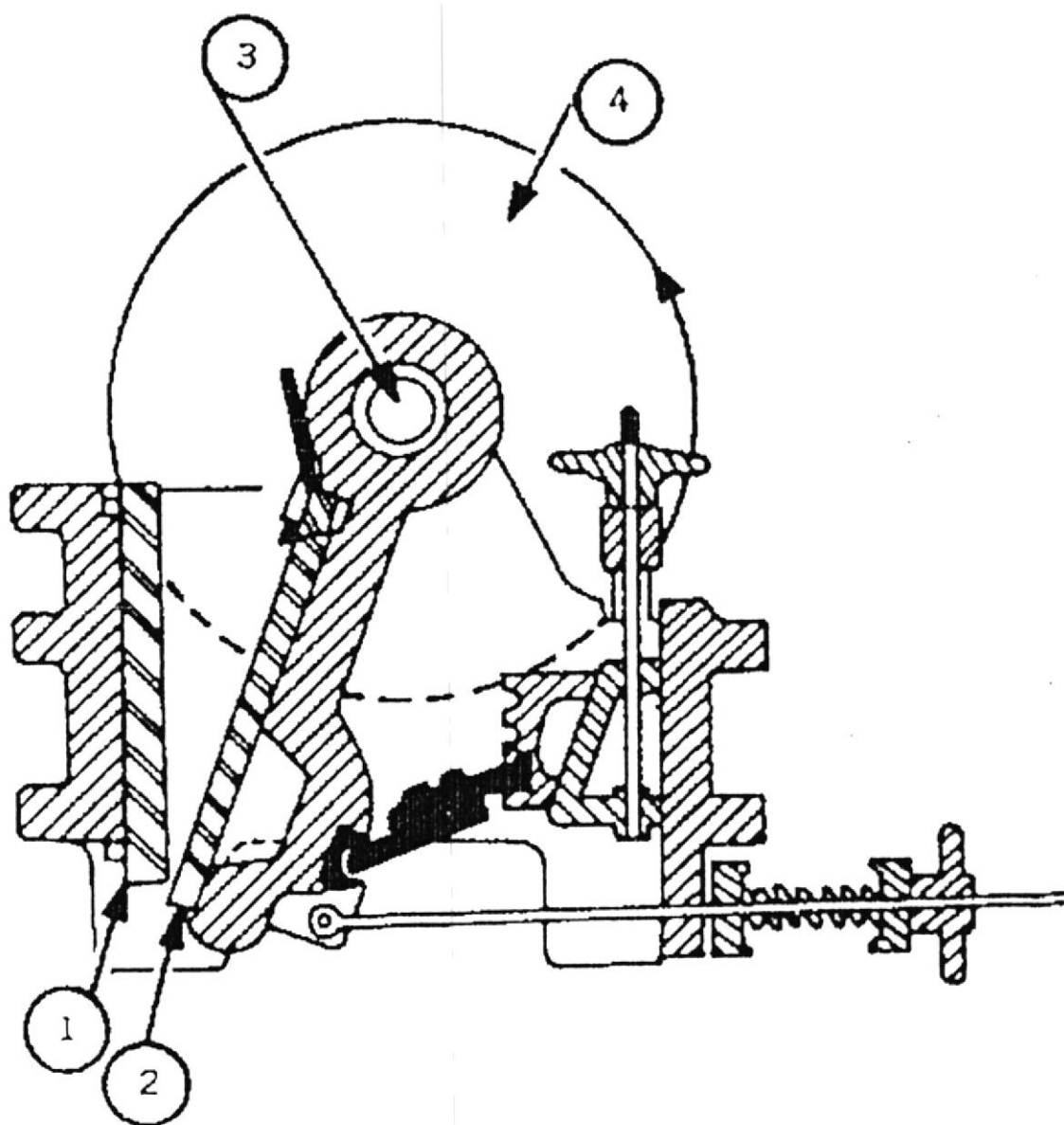


FIGURA No. 5 .- ESQUEMA DE LA TRITURADORA DE MORDAZA

volumen de acuerdo con el procedimiento utilizado. Aunque los resultados podrían ser utilizados como pérdida de masa para comparar materiales de igual densidad, es esencial que los resultados se expresen como pérdida de volumen en publicaciones o artículos para que no exista confusión por las variaciones en la densidad.

$$PERDIDADEVOL. (mm^3) = \frac{pérdidademasa (Kg.)}{\rho}$$

Debido a que la rueda decrece en diámetro la cantidad de abrasión desarrollada será reducida. El volumen de abrasión ajustado (AVL) tiene que tomar en consideración lo anteriormente mencionado es por esto que será calculado con la sgte. fórmula (7):

$$AVL = PERD. PESO. MED. * \frac{228.6}{\phi_{despuédeluso}}$$

Prueba de Impeller para la abrasión por erosión. Este aparato consiste en una prensa, una rueda motriz de acero



inoxidable y un tanque de polietileno.

#### 1.4.- Selección de aceros para la resistencia al desgaste por abrasión.

Los problemas por desgaste son solucionados totalmente o en parte por la selección apropiada de los metales. Un análisis de esfuerzos e investigaciones en el laboratorio usualmente proveen solamente una solución parcial y poco completa para resolver dichos problemas.

Frecuentemente, un metal es seleccionado gracias a pruebas, hechas en partes en servicio, incorporadas en un mecanismo operativo, observando la tasa de desgaste. Si se obtiene un rendimiento alto en ese servicio, el elemento debe ser incorporado en los modelos de producción y hacer extensivo el servicio de este variando las condiciones de trabajo para que observaciones posteriores puedan ser registradas en la vida útil del elemento.

La lubricación y el diseño de componentes en contacto juegan también roles importantes en el control del desgaste.

Los aceros dulces demuestran una pobre

resistencia al desgaste y resistencia al daño superficial durante el deslizamiento seco. El uso de estos aceros en superficies de contacto deslizantes requieren de tratamiento superficial, como el temple o recubrimientos y/o la selección de un material de acoplamiento compatible tal como el bronce o el babbitt. Cuando minerales duros entran en contacto con el acero, el desgaste es muy rápido a menos que la superficies del acero este endurecida o cubierta con un material muy duro.

El acero está sujeto a un desgaste muy acelerado en un ambiente corrosivo.

Un acero sin proteger es también susceptible a daño por desgaste o debido a la formación de una capa de material desgastado oxidado entre superficies en contacto en una baja amplitud de movimiento oscilatorio.

Una amplia variedad de microestructuras son posibles en el tratamiento de aceros o fundiciones y las propiedades de desgaste pueden ser relacionadas con microestructuras específicas.

Costos Relativos: Cuando se selecciona un acero para que sea resistente al desgaste, el costo

total de este acero y su tratamiento térmico debe ser considerado. Los siguientes aceros, los cuales tienen propiedades adecuadas para la resistencia al desgaste están dispuesto en orden de incremento de costo total:

1. Aceros de bajo contenido de carbono, como el 1020, no tratado térmicamente.
2. Aceros simples de alto contenido de carbono, como el 1095, no tratado térmicamente.
3. Aceros endurecidos directamente o de pocos aleantes o con endurecimiento por inducción o por llama.
4. Aceros de bajo contenido de carbono o de pocos aleantes que son endurecidos por carburización o carbonitruración.
5. Aceros de medio contenido de carbono y cromo y cromo-aluminio endurecidos por nitruración.
6. Aceros endurecidos directamente o altamente aleados, como el D2.
7. Aceros inoxidables.
8. Aceros especiales producidos por Metalurgia de Polvos o por técnicas de aleación especiales.

Otros materiales ferrosos, como los aceros manganeso-austeníticos y varias clases de hierros fundidos, son ampliamente usados para aplicaciones de resistencia al desgaste.

#### 1.4.1.- Relación entre la resistencia al desgaste y el porcentaje de carbono.

La resistencia al desgaste de aceros ferríticos es mejorada por endurecimiento de la sección o superficialmente. La máxima dureza depende del contenido de carbono del acero y de la cantidad de martensita, (eficiencia de temple) como se muestra en las Flg. 6,7,8.

Medidas estándar de dureza pueden indicar que un acero martensítico es largamente transformado, aunque este puede tener algo de austenita retenida. La exposición a muy bajas temperaturas (seguidas de revenido) pueden ayudar a completar la transformación de la martensita y mejorar la resistencia al desgaste. Debido a que la martensita es una estructura metaestable, esta se comienza a transformar en estructuras

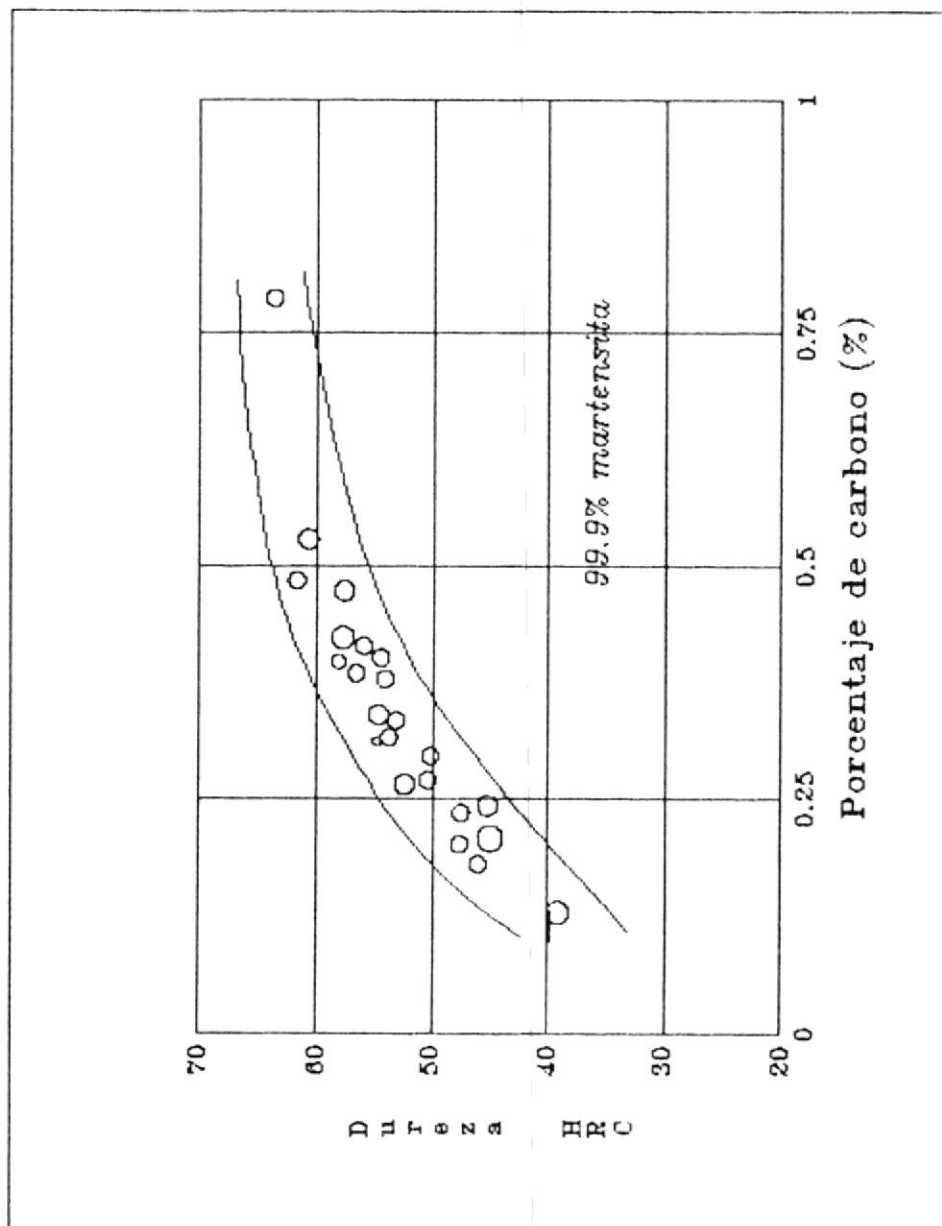


FIG. N 6: EFECTO DEL CONTENIDO DE CARBONO Y EL % DE MARTENSITA EN LA DUREZA DEL ACERO TEMPLADO

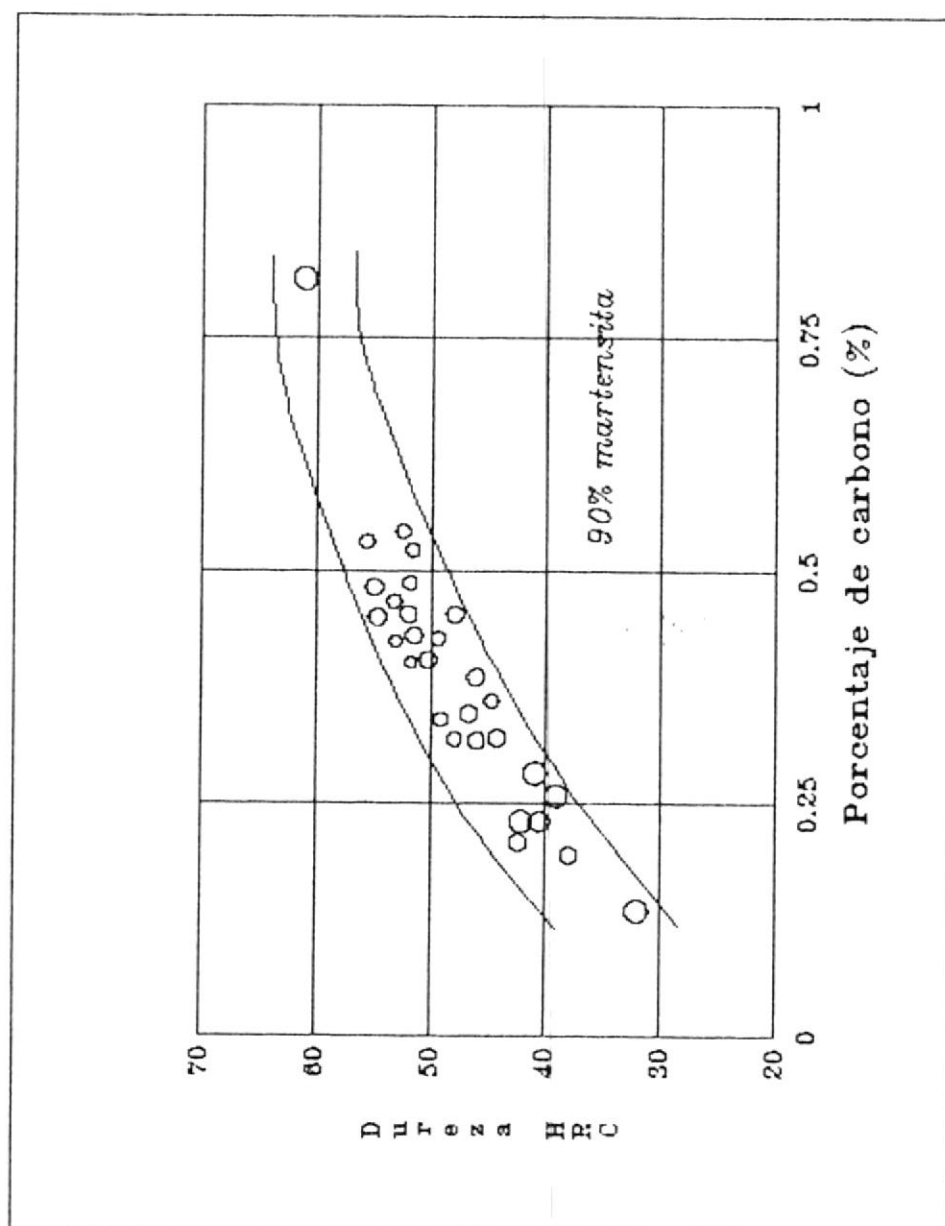


FIG. N 7: EFECTO DEL CONTENIDO DE CARBONO Y EL % DE MARTENSITA EN LA DUREZA DEL ACERO TEMPLADO

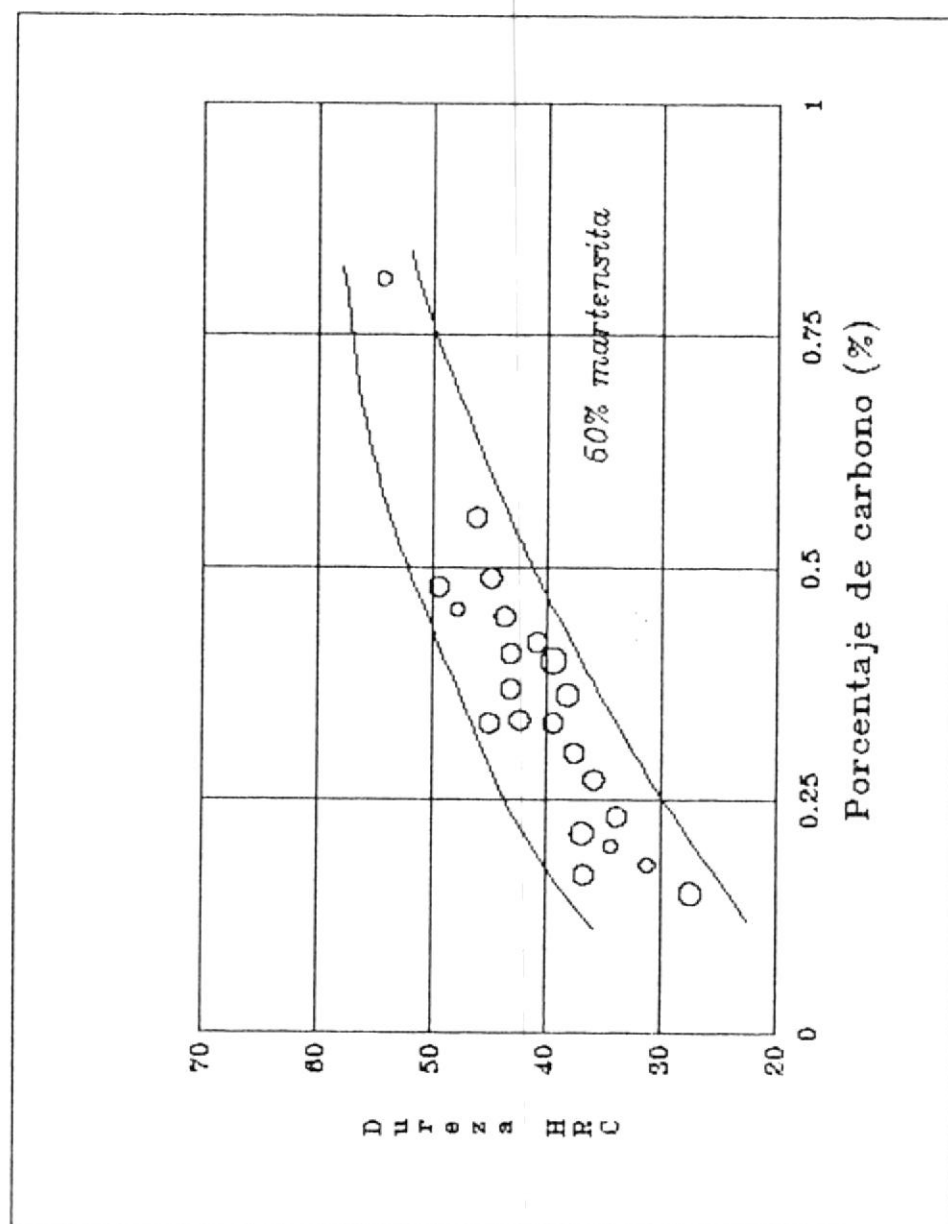


FIG. N 8: EFECTO DEL CONTENIDO DE CARBONO Y EL % DE MARTENSITA EN LA DUREZA DEL ACERO TEMPLADO

más estables cuando la temperatura se incrementa. Consecuentemente, los aceros martensíticos no son favorables para la resistencia al desgaste a elevadas temperaturas o para aplicaciones en la cual el calor de fricción puede aumentar la temperatura significativamente. No deben ser usados a temperaturas sobre 200 C.

Aceros especiales aleados, como los aceros para herramientas o aceros inoxidables martensíticos, son apropiados para servicios a altas temperaturas.

La inestabilidad de la martensita debe ser también considerada durante operaciones finales (como el rectificado), cuando la zona afectada por el calor puede ser producida en la superficie.

Los efectos resultantes del revenido pueden ser localizados o generales; en cualquiera de los dos casos, la resistencia al desgaste es igualmente reducida.



El contenido de carbono también afecta a la dureza y a la resistencia al desgaste a través de la formación de algunos carburos, simples o complejos. Las propiedades del desgaste dependen en el tipo, cantidad, forma, tamaño y distribución de los carburos presentes, como también de las propiedades de la matriz (dureza, tenacidad y estabilidad). A pesar de su complejidad, la correlación entre las tasas relativas de desgaste y el contenido de carbono es posible. Un ejemplo del desgaste por arranque se muestra en la Fig. 9.

Aunque la mayoría de los carburos son relativamente estables comparados con la martensita, la resistencia al desgaste alcanzada con la ayuda de estos duros microconstituyentes es retenida a temperaturas altas.

#### 1.4.2.- Relación entre la resistencia al desgaste con la dureza y microestructura.

El aumento de dureza como guía para la resistencia al desgaste abrasivo para

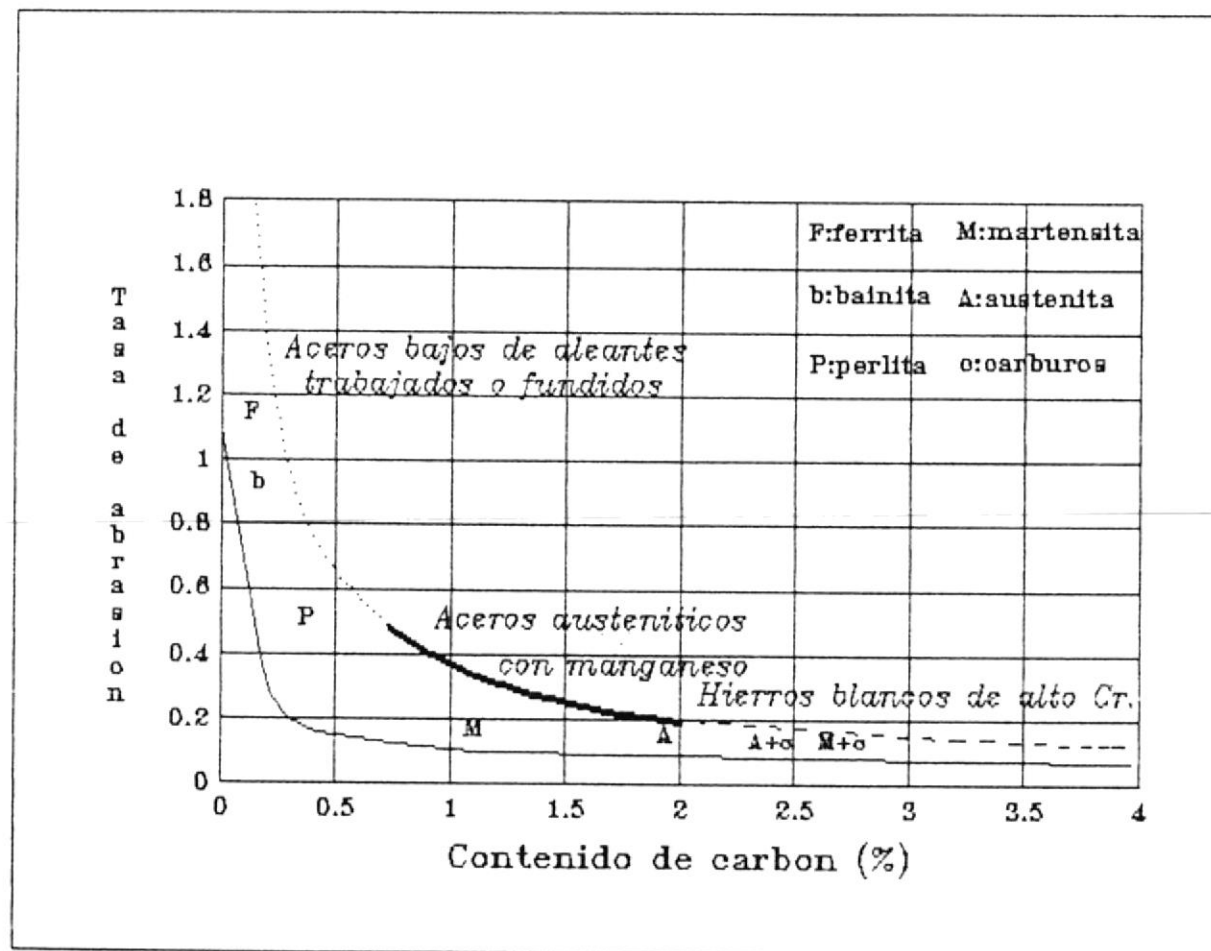


FIG. N 9: ABRASION POR ARRANQUE VS. CONTENIDO DE CARBONO (varios aceros)

metales sin alear recocidos (puros) se muestra en la Fig. 10.

Esta información se obtuvo usando un paño abrasivo (abrasión de dos cuerpos) con un dureza del abrasivo mucho mas grande que para los ejemplos de metales. Los puntos son aproximados; la dispersión de los datos no se conoce.

Correlaciones correspondientes con otras propiedades relacionadas con la dureza (como el módulo de elasticidad) también se han presentados.

En todos los casos, si los metales no son aleados, una correlación simple se obtiene para pruebas controladas de abrasión de dos cuerpos. Estructuras diferentes de cristales se deberan esperar para la producción de correlaciones diferentes, pero en la figura anterior no se muestra este efecto.

Se debe tener cuidado en extender esta correlación de dureza a metales que contengan impurezas o solutos, o aleantes más complicados. En la figura 10 también se muestra como la

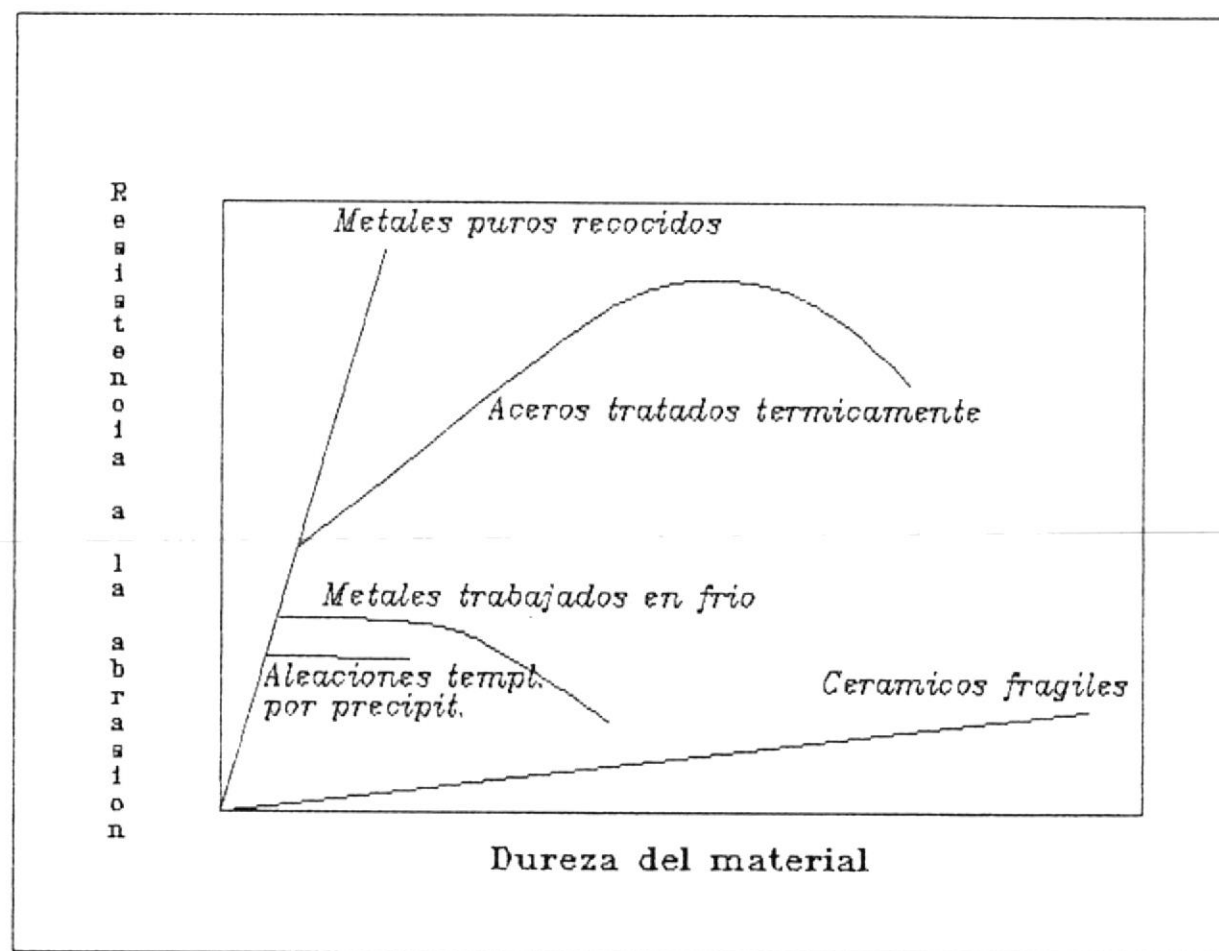


FIG. N 10: DESGASTE VS. DUREZA PARA VARIAS CLASES DE MATERIAL

resistencia al desgaste se correlaciona con la dureza para varias clases de materiales. Entre las curvas para los metales puros y los cerámicos frágiles se encuentran curvas para aceros tratados térmicamente, metales trabajados en frío y una gran variedad de metales aleados endurecidos. Los aceros tratados muestran una mejora inicial en las propiedades del desgaste cuando aumenta la dureza, pero eventualmente la correlación es reversible. Es posible que la reducción de la resistencia al desgaste a altas temperaturas para metales trabajados en frío y aceros tratados térmicamente se relacione con la reducción en tenacidad a la fractura.

La dureza metalúrgica y la microestructura están comúnmente interrelacionadas. El aumento de el contenido de carbono de un acero, por ejemplo, resulta en cambios en la microestructura que incrementa su dureza en el temple y decrece la ductilidad o la tenacidad.

En una serie de pruebas de abrasión conducidas por M.A. Moore aceros al carbono y los aceros de baja aleación fueron probados en una máquina de disco abrasivo rotatoria usando carburo de silicio, malla 60-80 siendo este menos abrasivo.

La serie de pruebas también diferenciaron los efectos de la microestructura. Cuando los datos de aceros perlíticos fueron examinados separadamente, por ejemplo se encontró que la resistencia al desgaste de estos aceros se incrementaba cuando se incrementaba la fracción volumétrica de perlita. Para los aceros martensíticos, los datos proporcionaban una correlación aproximada entre la resistencia al desgaste y la dureza con el incremento del contenido de carbono.

En estas pruebas los aceros "esferoidizados" exhibían una resistencia baja a la abrasión que para los aceros perlíticos con la misma composición química. Sin embargo, en los aceros "esferoidizados", aquellas dispersiones finas de carburos tenían mejor resistencia al desgaste a la abrasión que aquellos con dispersiones grandes (8).

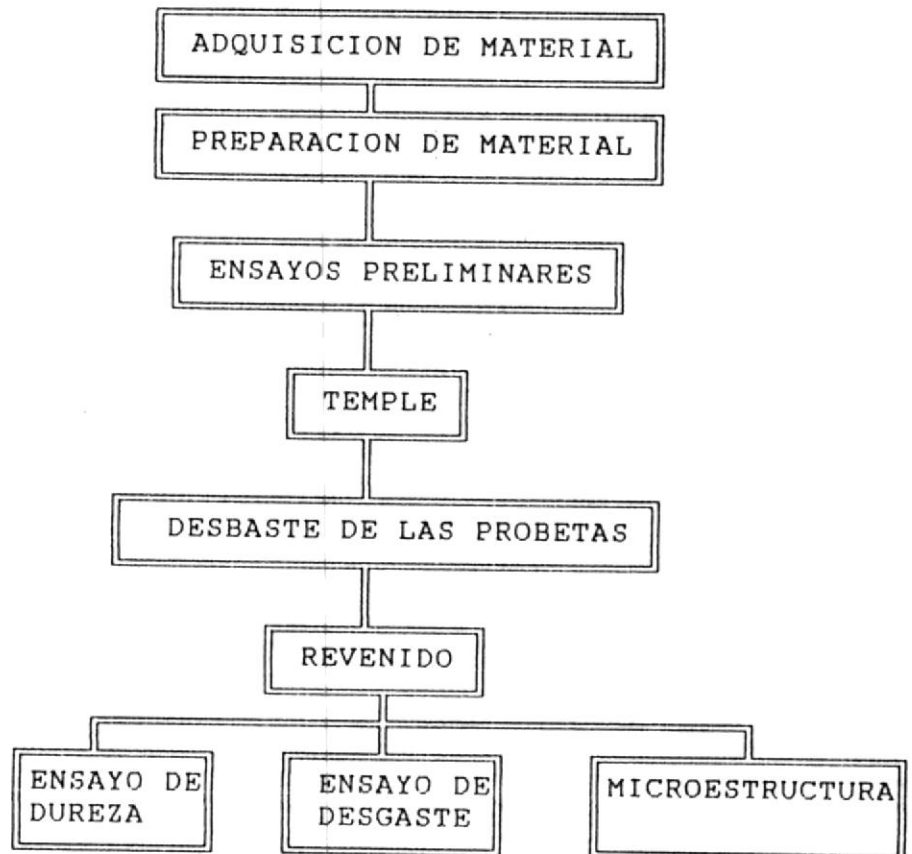
Debido a que esta resistencia a la abrasión depende en parte de la resistencia a la deformación plástica, la información de aceros esferoidizados confirma el efecto de las partículas de cementita en la resistencia al desgaste, siendo la dispersión más fina la de mejor resistente al desgaste.

## CAPITULO II

### 2. TRABAJO EXPERIMENTAL

#### 2.1.- Metodología de trabajo

La metodología seguida para esta tesis se la puede observar en el siguiente diagrama de flujo:



## 2.2.- Materiales

Se seleccionó cuatro tipos de aceros con diferente composición química, tal como se indica en la tabla I. De acuerdo a la norma ASTM G65 las probetas utilizadas tenían como dimensiones: 76 \* 25 \* 6 cm. (Ver fig. 11)

TABLA I

### COMPOSICION QUIMICA DE LOS ACEROS

|      | C    | Si  | Mn  | Cr  | Mo  | V   | W   |
|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1045 | 0.45 | 0.3 | 0.7 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| P20  | 0.4  | 0.3 | 1.5 | 2.0 | 0.2 | 0.0 | 0.0 |
| O1   | 0.95 | 0.3 | 1.1 | 0.5 | 0.0 | 0.2 | 0.6 |
| D3   | 2.0  | 0.2 | 0.3 | 12  | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

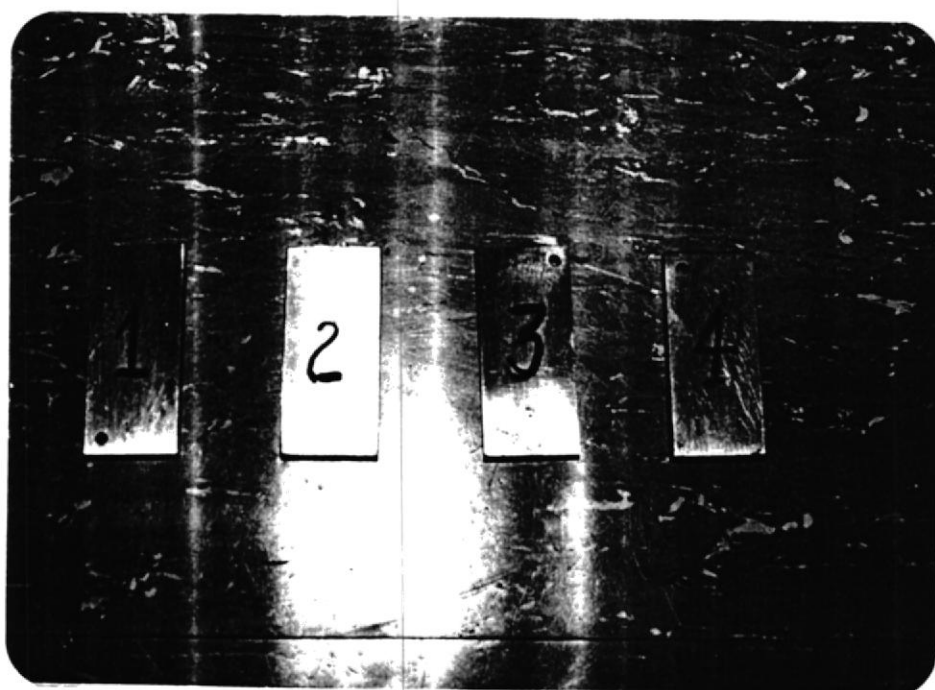
FUENTE: Catálogo de Aceros Especiales BOHLER

El acero O1 se encuentra entre los aceros para trabajado en frío y temple en aceite, el D3 pertenece a los aceros para trabajado en frío con alto carbono y alto cromo, el P20 pertenece al grupo de aceros para moldear y por último el acero 1045 contiene un porcentaje medio de carbono con muy pocos aleantes.

## 2.3.- Equipo

- Durómetro Rockwell (Marca: Wilson) (Fig.12)





1. 01
2. P20
3. 1045
4. D3

FIG. N° 11 PROBETAS

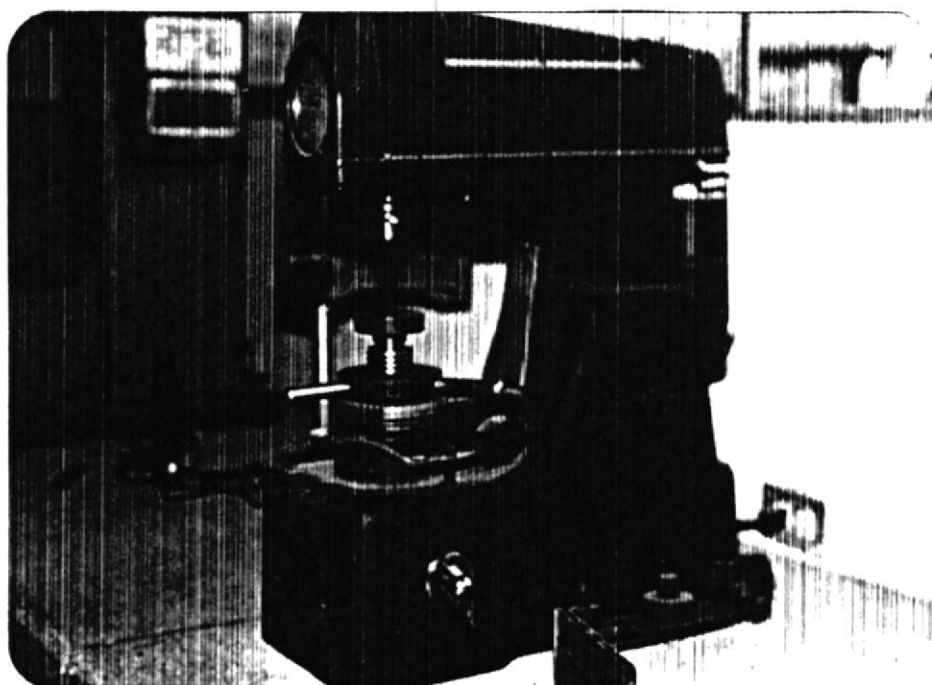


FIG. N 12: DUROMETRO ROCKWELL

- Microscopio metalográfico (Fig. 13)
- Máquina para medir el desgaste por abrasión  
(Construida en la ESPOL)(Fig. 14, 15)
- Balanza (sensibilidad 0.0001 gr.)(Fig. 16)
- Horno de mufla para tratamientos térmicos  
con control de temperatura y atmósfera  
controlada y a base de nitrógeno (Fig. 17)
- Cubas de temple

#### 2.4.- Ciclos de Tratamientos Térmicos

En el desarrollo de la parte experimental se realizó dos tipos de tratamiento térmico: temple y revenido.

Temple: En el templado ordinario se calienta el acero a una temperatura tal, que la estructura de recocido se transforma en una austenítica. Este calentamiento es seguido por un rápido enfriamiento ya sea en aceite o en agua dependiendo del contenido de carbono del material ensayado. (Ver fig. 18)

Revenido: Debido a los enormes esfuerzos que se desarrollan en el acero durante su templado, estos deben revenirse inmediatamente, a una temperatura apropiada. Esto da como resultado en la mayoría de casos una disminución de la dureza

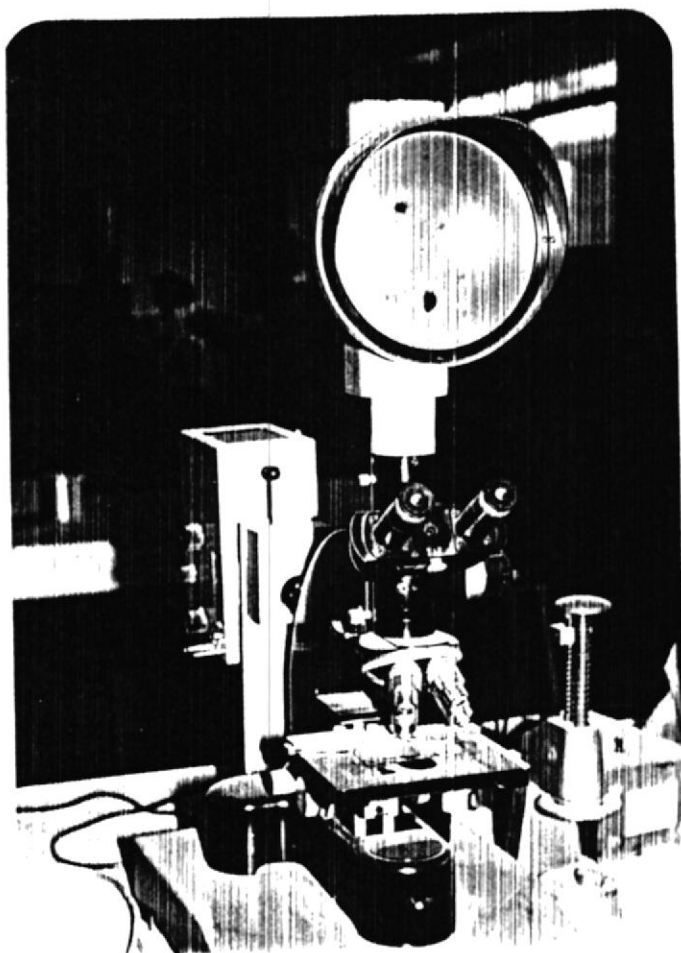


FIG. N 13: MICROSCOPIO METALOGRAFICO

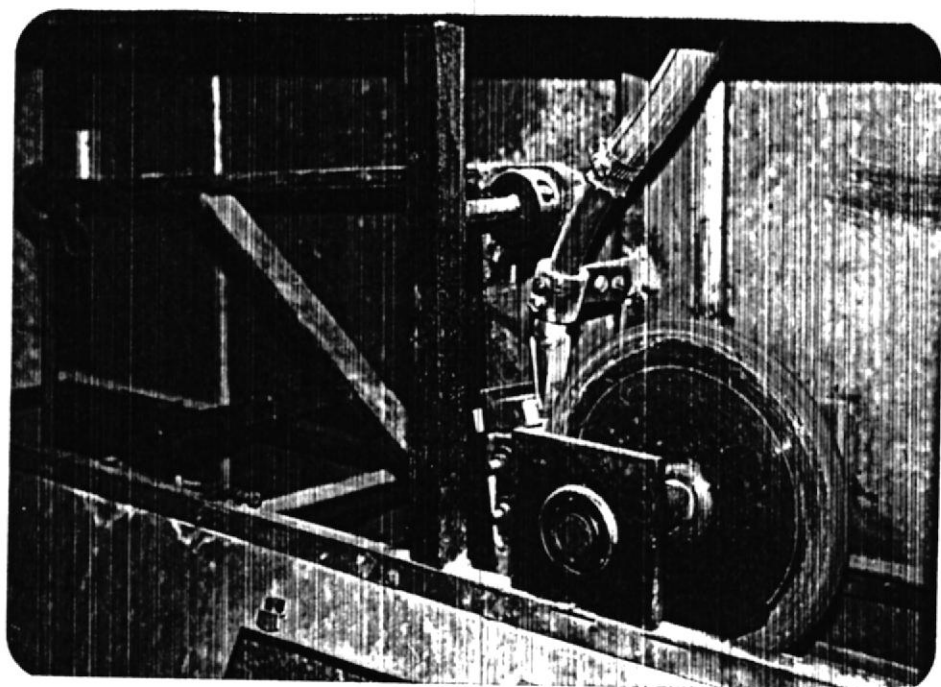
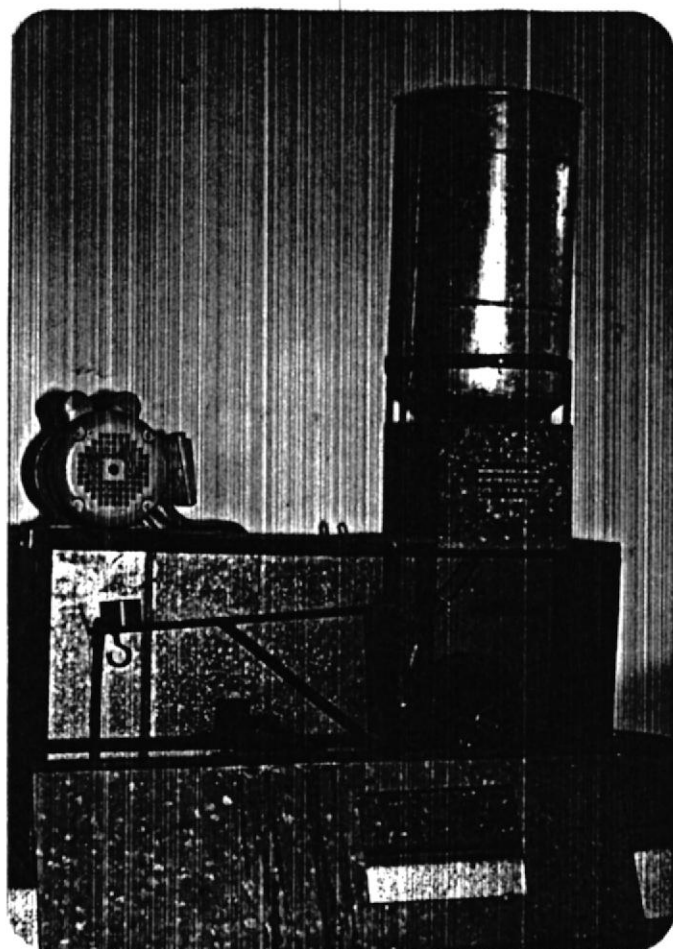


FIG. N 14 Y 15: MAQUINA DE ABRASION

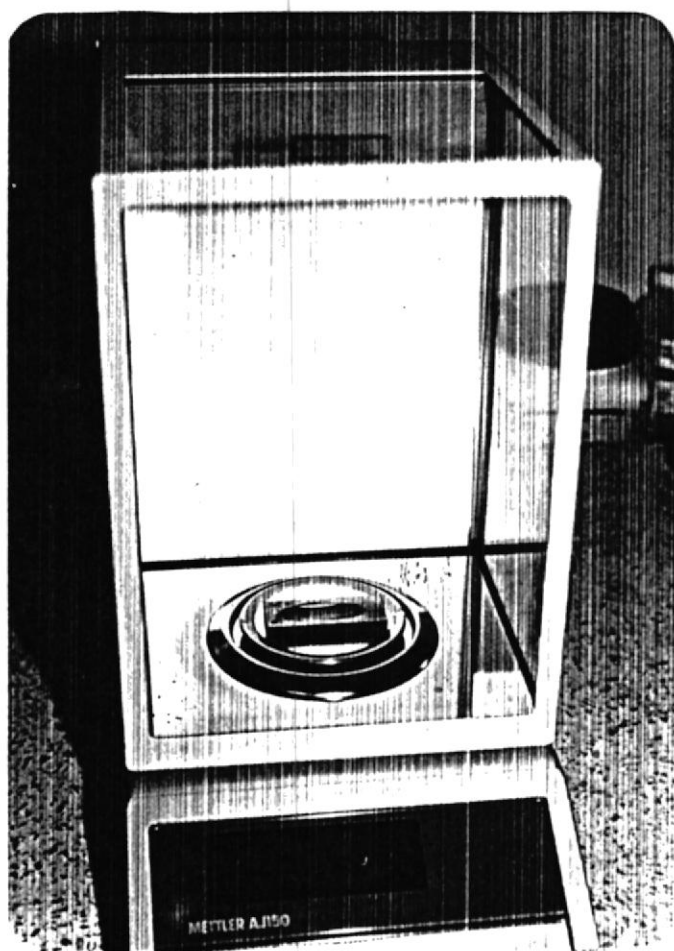


FIG. N 16: BALANZA DE PRECISION

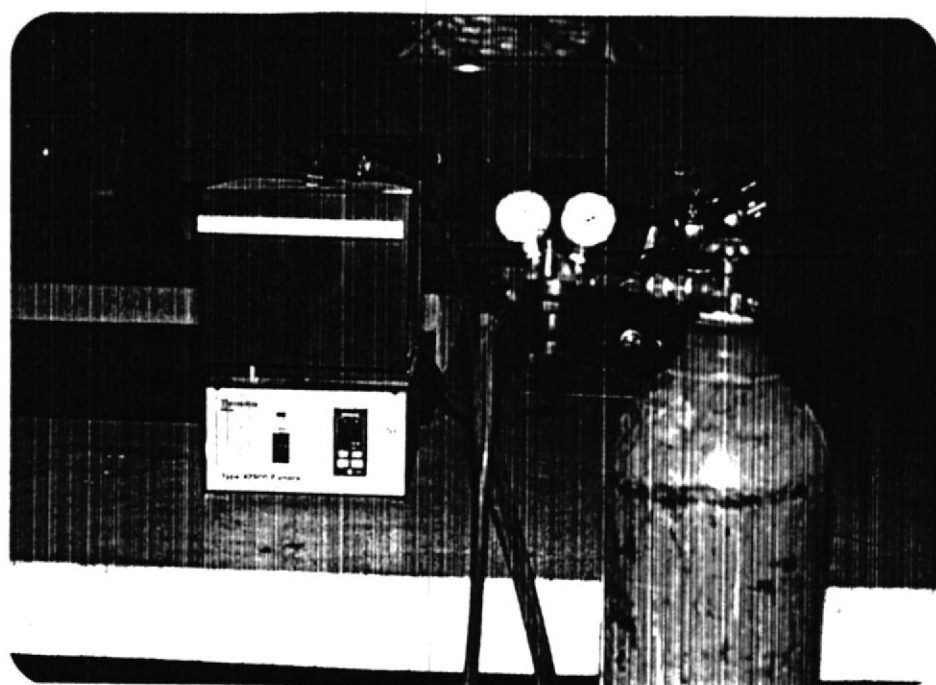


FIG. N 17: HORNO PARA TRATAMIENTOS TERMICOS

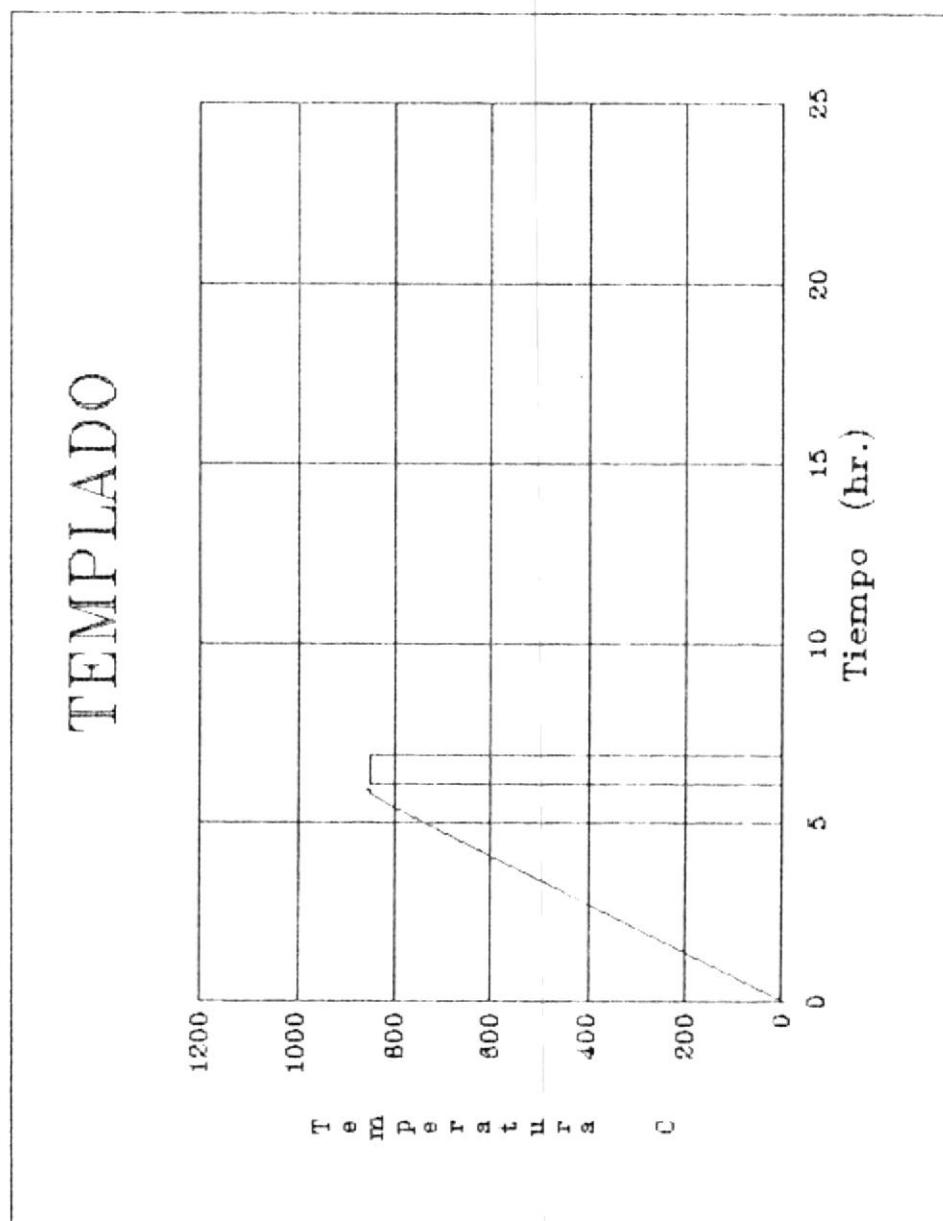


FIG. N 18: ILUSTRACION GRAFICA DEL PROCESO DE TEMPLADO



y aumento en la tenacidad del material. Sin embargo, ciertos aceros de herramientas alta aleación incrementan su dureza a cierta temperatura de revenido, debido al llamado endurecimiento secundario. (Ver fig. 19)

Protección contra descarburización y oxidación: A menos que esté protegida por algún medio apropiado, la superficie del acero se descarburizará y oxidará cuando se caliente a temperaturas arriba de 600 y 700 C. Puede obtenerse la protección necesario empacándolo en una caja con viruta de hierro gris, carbón de coke, mica, etc. envolviendolo en lámina de acero inoxidable, calentándolo en un baño de sal, mediante un gas protector, o bien al vacío. En este caso, se utilizó nitrógeno, como atmósfera protectora.

Tiempo de calentamiento y tiempo de mantenimiento:

El tiempo de calentamiento depende del peso y forma de las piezas que van a templarse, del tipo de horno y energía que se disponga. Por lo tanto, el cálculo del tiempo necesario para cada caso individual con objeto de lograr un calentamiento uniforme, puede ser complicado.

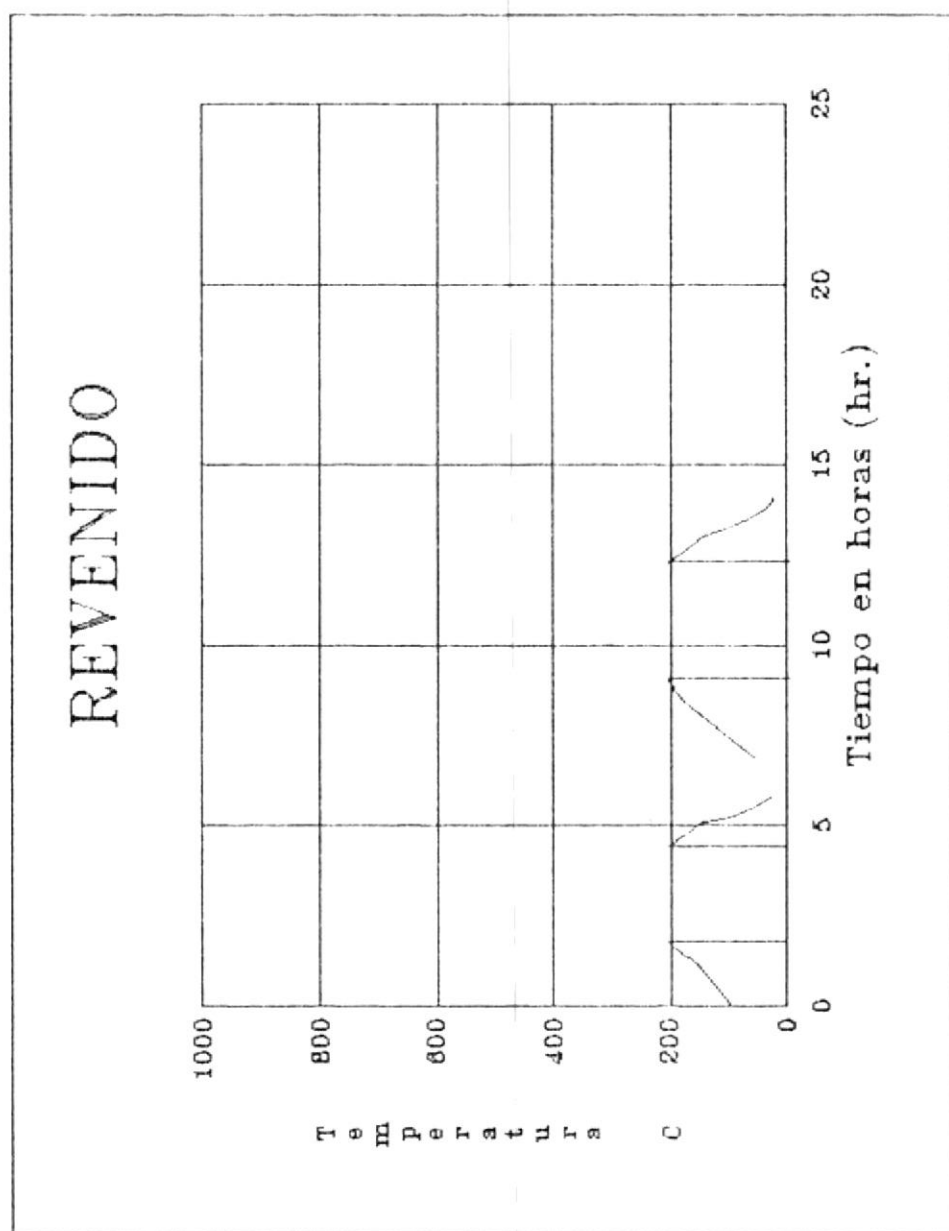


FIG. N 19: ILUSTRACION GRAFICA DEL PROCESO DE REVENIDO

Sin embargo, se han desarrollado ciertos factores que pueden ser útiles en el momento del cálculo. Estos factores se presentan a continuación en la Tabla II (9):

TABLA II

SELECCION DE TIEMPO DE CALENTAMIENTO

| Tipo de Horno       | Rango de Temperat. | Tiempo de cal. (hr) | Notas            |
|---------------------|--------------------|---------------------|------------------|
| Horno de convección | Max 500 C          | $e * 0.015$         | No empa-<br>cada |
| Horno de mufla      | 700-1000 C         | $e * 0.025$         | No empa-<br>cada |
| Horno de mufla      | 700-1000 C         | $e * 0.03$          | Empacada         |
| Horno de sal        | Max. 500 C         | $g * 0.007$         |                  |
| Horno de sal        | 700-1000 C         | $g * 0.005$         |                  |

FUENTE: Manual de tratamiento Térmicos (A55AB)

Tiempo de mantenimiento a temperatura de austenización:

El tiempo de mantenimiento a temperatura de austenización, depende del grado de acero. Esta temperatura viene dada en tablas para cada acero.

Teóricamente, el tiempo de mantenimiento debe también incrementarse al aumentarse el espesor de la pieza, pero en la práctica normal, esta condición puede despreciarse si el tiempo de calentamiento se calcula como se indica en la tabla anterior. En realidad para una pieza de cierto espesor, y de acuerdo al rango de temperatura que asegure la disolución de los carburos, se encuentra en el tiempo de calentamiento, el cual aumentará en proporción al espesor.

A continuación se tiene los ciclos de tratamientos térmicos para cada acero en las Fig. 20, 21, 22 y 23. Para poder relacionar los diferentes aceros se les realizó un tratamiento térmico de temple y revenido a diferentes temperaturas dependiendo del tipo de acero para obtener aproximadamente las mismas durezas para todos.

## **2.5.- Ensayos de Evaluación**

### **2.5.1.- Ensayo de Abrasión**

Esta prueba cubre los procedimientos seguidos para determinar la resistencia a la abrasión de materiales metálicos por medio de la prueba de la Rueda de caucho con Arena seca. Se realizan pruebas con una probeta con dimensiones definidas. El abrasivo se introduce entre la probeta y la rueda giratoria

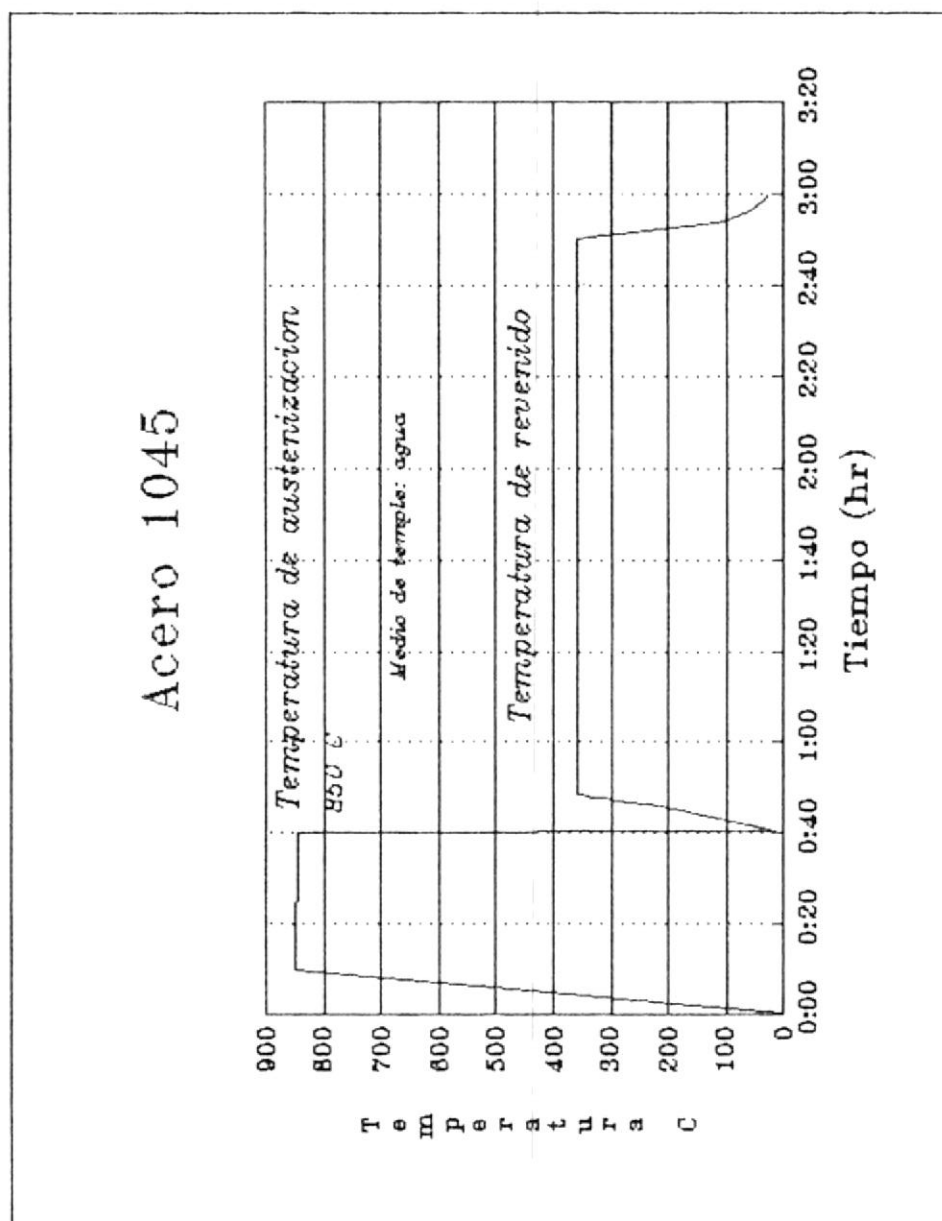


FIG. Nº 20 : REPRESENTACION ESQUEMATICA DEL CICLO UTILIZADO DURANTE EL TEMPLE Y REVENIDO DEL ACERO AISI 1045

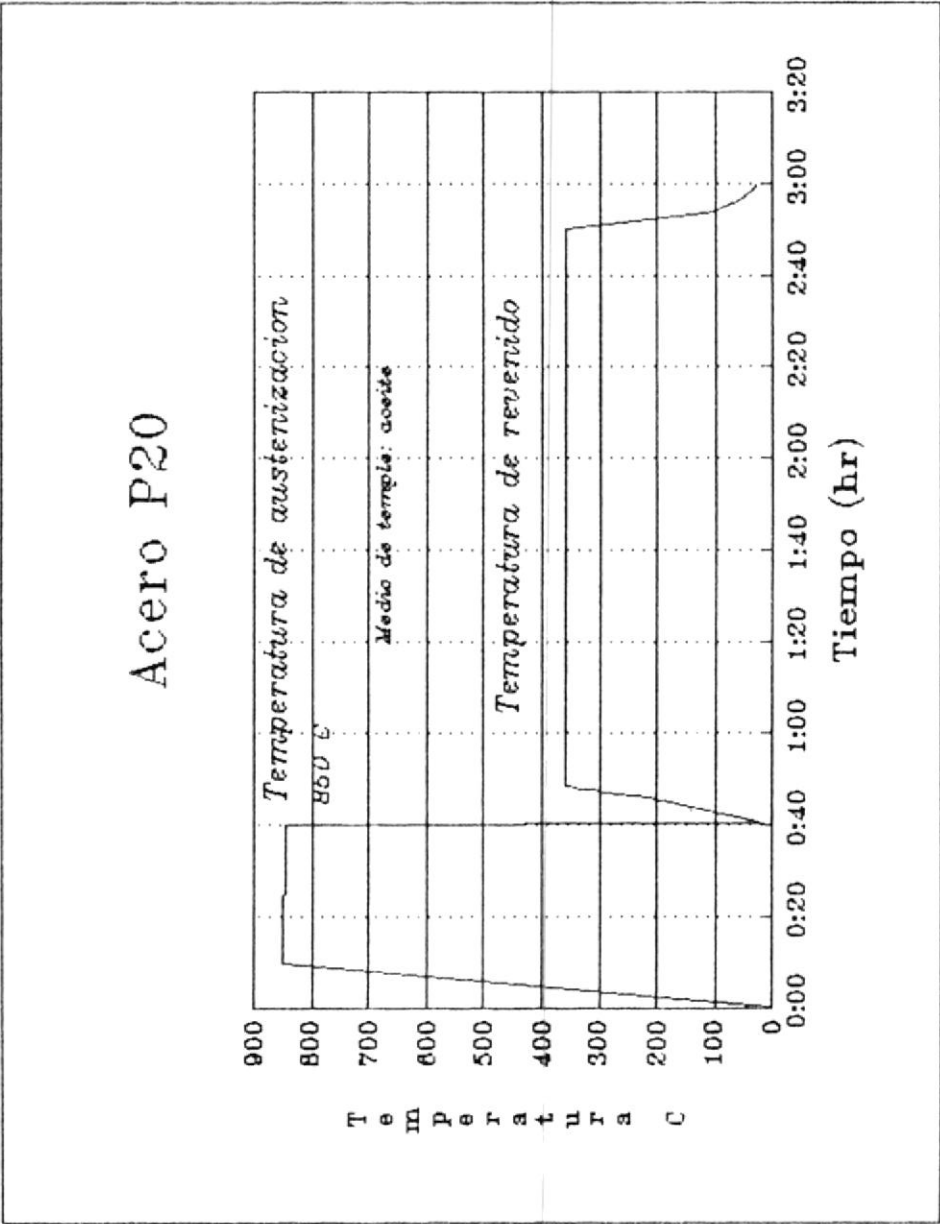


FIG. N° 21 : REPRESENTACION ESQUEMATICA DEL CICLO UTILIZADO DURANTE EL TEMPLE Y REVENIDO DEL ACERO AISI P20

## Acero 01

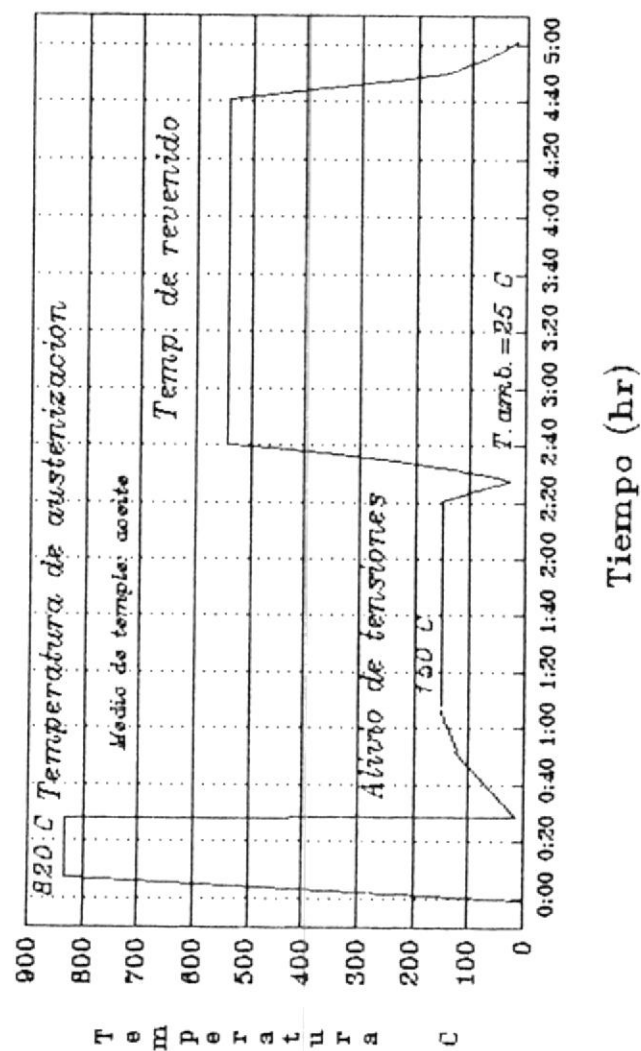


FIG. Nº 22 : REPRESENTACION ESQUEMATICA DEL CICLO UTILIZADO DURANTE EL TEMPLE Y REVENIDO DEL ACERO AISI 01

# ACERO D3

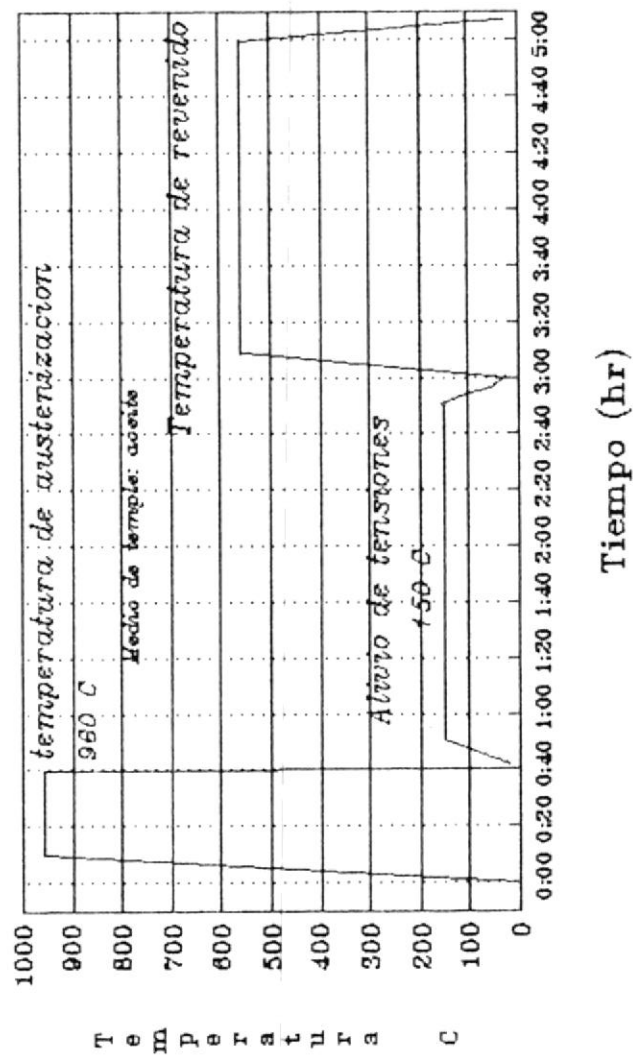


FIG. Nº 23 : REPRESENTACION ESQUEMATICA DEL CICLO UTILIZADO DURANTE EL TEMPLE Y REVENIDO DEL ACERO AISI D3



con dureza específica. La probeta es presionada hacia la rueda por medio de una fuerza debida a pesos puestos en el extremo del brazo.

La rotación de la rueda es tal que su superficie de contacto se mueve en dirección del flujo de arena. La duración de la prueba y la fuerza aplicada dependen del procedimiento usado. Las probetas son pesadas antes y después de la prueba y la pérdida de masa convertida en medida de volumen será la medida de la resistencia al desgaste (10).

Parámetros para la prueba.-

Dimensiones de la probeta:

76 \* 25 \* 6 mm.

Abrasivo: Arena de Sílice AFS 50-70

Rueda: Poliuretano

Dureza: 62 +- 3 short A

Procedimiento: A

Fuerza contra la probeta: 30 lb.

Flujo de arena: 340 g/min.

Rev. de rueda: 210 rev./min.

# de rev. total: 6000 rev./min.

tiempo prueba aprox.: 30 min.

#### 2.5.2.- Ensayo de Dureza

El ensayo de dureza se lo realizó en la máquina rockwell, con el identador de diamante, con 150 kg. de peso. Se midió la dureza de todas las probetas en

condición de recocido, templado y con las distintas temperaturas de revenido. Para este ensayo se siguió el procedimiento descrito por la Norma E 18 (11).

#### 2.5.3.- Ensayo Metalográfico

Este ensayo se lo realizó en las probetas en condición de recocido, templado, y con una sola temperatura de revenido (la que da la dureza mínima).

#### 2.6.- Resultados Obtenidos

Ensayo de dureza: Estos resultados se los puede observar en las Tablas III, IV, V, VI y en las Fig. 24 y 25.

TABLA III

## ENSAYO DE DUREZA DEL ACERO 1045

| CONDICION<br>DEL<br>ACERO | DUREZA<br>D1<br>[RC] | DUREZA<br>D2<br>[RC] | DUREZA<br>D3<br>[RC] | DUREZA<br>PROM.<br>[RC] |
|---------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-------------------------|
| SUMINISTRO                | 12.0                 | 14.0                 | 12.0                 | 12.7                    |
| SIN<br>REVENIR            | 55.5                 | 56.0                 | 55.0                 | 55.5                    |
| REV. 250                  | 55.5                 | 55.0                 | 55.5                 | 55.3                    |
| REV. 400                  | 44.5                 | 45.5                 | 45.0                 | 45.0                    |
| REV. 430                  | 35.0                 | 37.0                 | 36.0                 | 36.0                    |

TABLA IV

## ENSAYO DE DUREZA DE ACERO P20

| CONDICION<br>DEL<br>ACERO | DUREZA<br>D1<br>[RC] | DUREZA<br>D2<br>[RC] | DUREZA<br>D3<br>[RC] | DUREZA<br>PROM.<br>[RC] |
|---------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-------------------------|
| SUMINISTRO<br>(*)         | 26.0                 | 26.5                 | 26.0                 | 26.3                    |
| SIN<br>REVENIR            | 53.0                 | 54.0                 | 55.0                 | 54.0                    |
| REV. 250                  | 50.0                 | 51.0                 | 52.0                 | 51.0                    |
| REV. 400                  | 46.5                 | 45.5                 | 45.5                 | 45.8                    |
| REV. 580                  | 37.0                 | 36.0                 | 38.0                 | 37.0                    |

\* Bonificado

TABLA V

## ENSAYO DE DUREZA PARA EL ACERO 01

| CONDICION<br>DEL<br>ACERO | DUREZA<br>D1<br>[RC] | DUREZA<br>D2<br>[RC] | DUREZA<br>D3<br>[RC] | DUREZA<br>PROM.<br>[RC] |
|---------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-------------------------|
| SUMINISTRO                | 15.0                 | 16.0                 | 15.5                 | 15.5                    |
| SIN<br>REVENIR            | 63.5                 | 62.5                 | 63.0                 | 63.0                    |
| REV. 300                  | 56.5                 | 56.0                 | 55.5                 | 56.0                    |
| REV. 480                  | 49.5                 | 49.0                 | 49.0                 | 49.3                    |
| REV. 550                  | 39.5                 | 41.0                 | 40.5                 | 40.3                    |

TABLA VI

## ENSAYO DE DUREZA PARA EL ACERO D3

| CONDICION<br>DEL<br>ACERO | DUREZA<br>D1<br>[RC] | DUREZA<br>D2<br>[RC] | DUREZA<br>D3<br>[RC] | DUREZA<br>PROM.<br>[RC] |
|---------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-------------------------|
| SUMINISTRO                | 19.0                 | 20.5                 | 19.5                 | 19.6                    |
| SIN<br>REVENIR            | 64.0                 | 63.0                 | 63.0                 | 63.3                    |
| REV. 350                  | 56.5                 | 55.5                 | 56.5                 | 56.1                    |
| REV. 550                  | 48.0                 | 48.5                 | 48.5                 | 48.3                    |
| REV. 630                  | 37.5                 | 37.0                 | 37.0                 | 37.2                    |

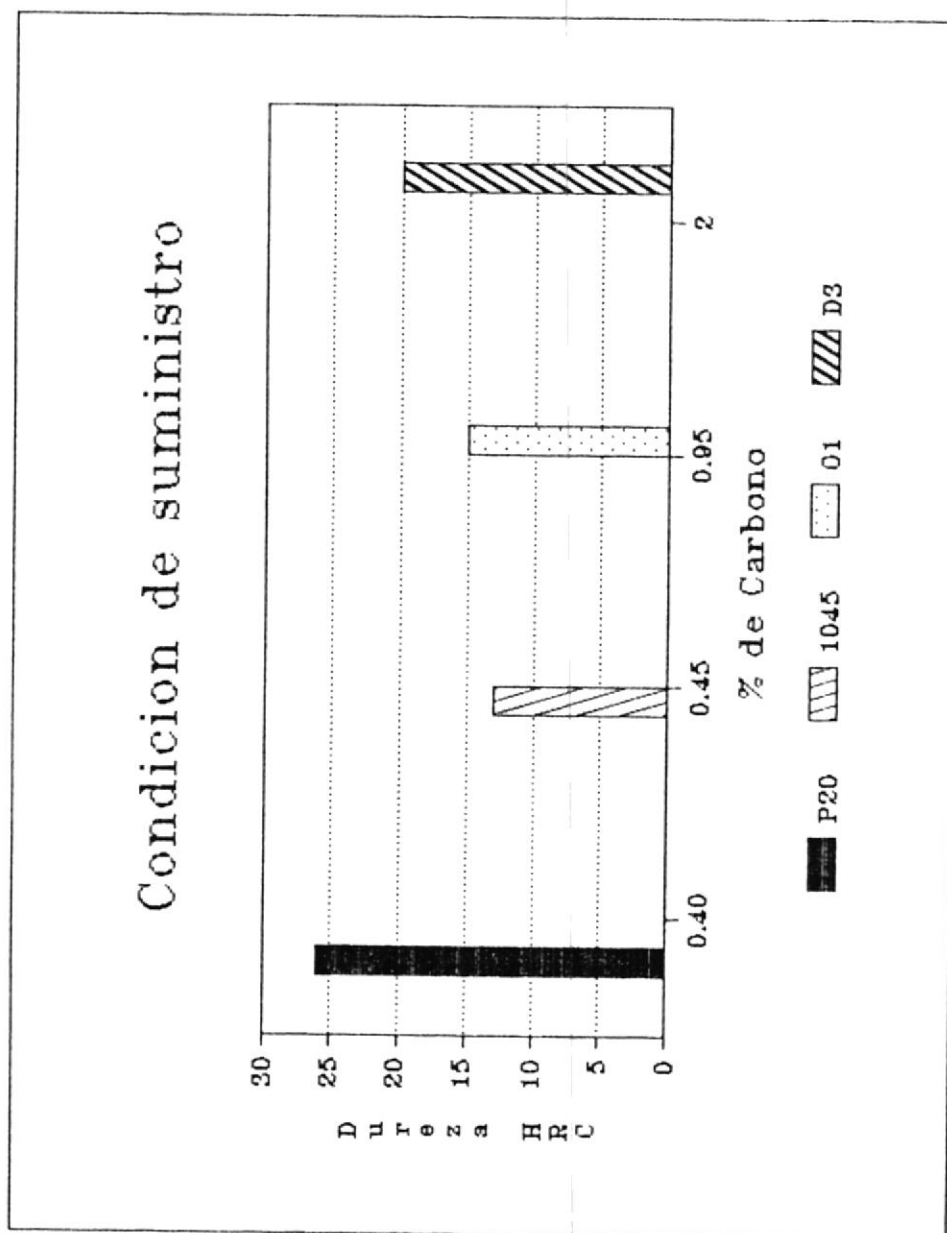


FIG. Nº 24: RELACION ENTRE LA DUREZA Y EL CONTENIDO DE CARBONO EN LA CONDI-  
CION DE SUMINISTRO.

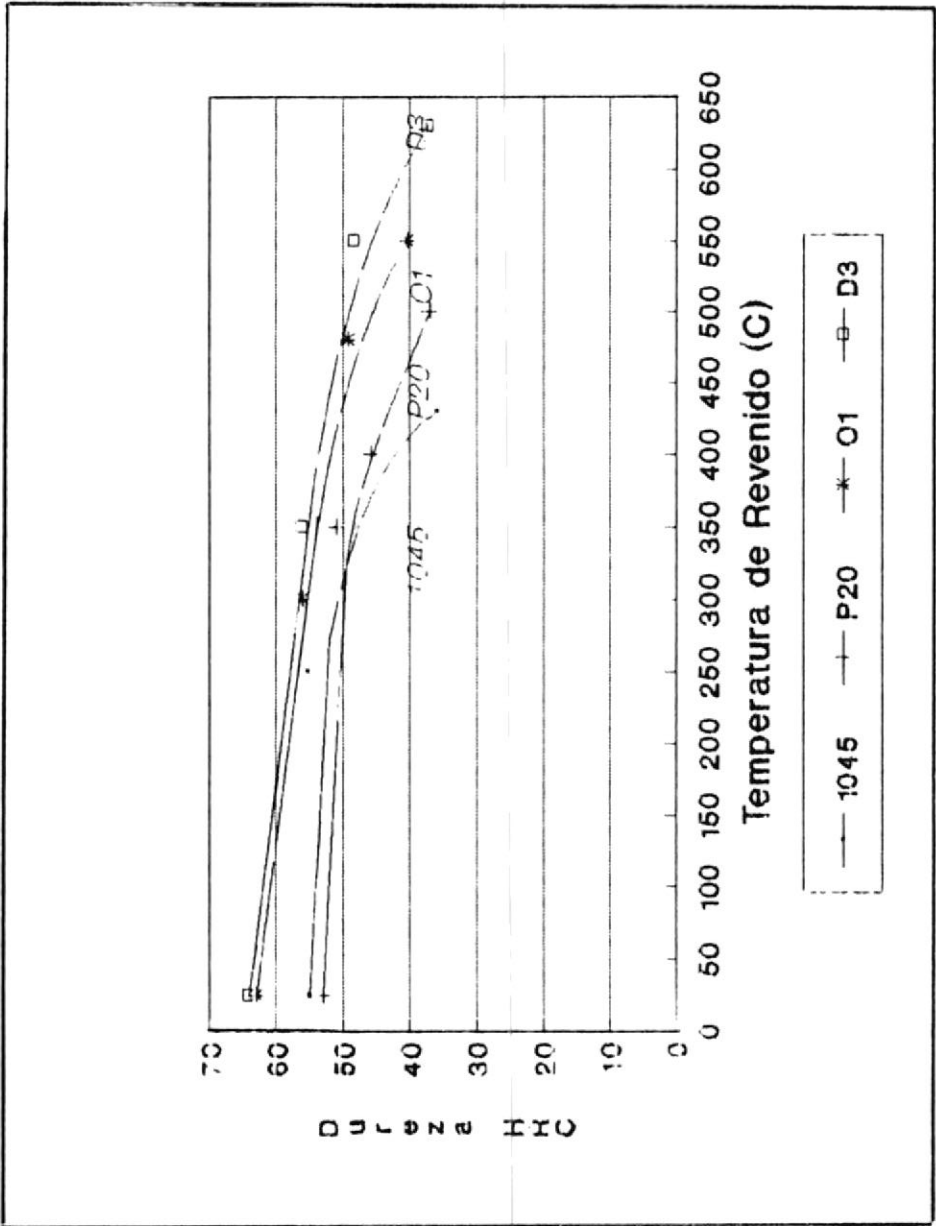


FIG. N° 25: DUREZA OBTENIDA DESPUES DEL REVENIDO REALIZADO A DIFERENTES TEMPERATURAS

Ensayo de desgaste: Para el ensayo de desgaste, se tuvieron parámetros controlados, los mismos que se utilizaron para todas las pruebas, estos son:

Carga: 30 Lb.

Flujo de arena: 340 gr./min.

Revoluciones de la rueda: 210 rev./min.

(Ver Tablas VII, VIII, IX, X y Fig. 26 y 27.)

TABLA VII

ENSAYO DE DESGASTE PARA EL ACERO 1045

|     | Masa <sub>i</sub><br>(gr.) | Masa <sub>f</sub><br>(gr.) | Masa<br>Perd.<br>(gr.) | Vol.<br>Perd.<br>(mm <sup>3</sup> .) | Vol.<br>Ajust.<br>(mm <sup>3</sup> ) |
|-----|----------------------------|----------------------------|------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| CS  | 65.253                     | 62.684                     | 2.569                  | 329.4                                | 354.7                                |
|     | 65.343                     | 62.645                     | 2.698                  | 345.9                                | 364.8                                |
| T   | 65.191                     | 63.340                     | 1.851                  | 237.3                                | 255.5                                |
|     | 65.983                     | 64.031                     | 1.952                  | 250.3                                | 269.5                                |
| 250 | 65.624                     | 63.807                     | 1.817                  | 232.9                                | 250.8                                |
|     | 66.001                     | 64.205                     | 1.796                  | 230.3                                | 247.9                                |
| 400 | 65.029                     | 62.601                     | 2.428                  | 311.3                                | 335.2                                |
|     | 65.322                     | 62.791                     | 2.531                  | 324.5                                | 349.4                                |
| 430 | 63.463                     | 60.795                     | 2.668                  | 342.5                                | 368.8                                |
|     | 64.225                     | 61.500                     | 2.725                  | 349.4                                | 376.2                                |

TABLA VIII

## ENSAYO DE DESGASTE PARA EL ACERO 01

|     | Masa <sub>1</sub><br>(gr.) | Masa <sub>2</sub><br>(gr.) | Masa<br>Perd.<br>(gr.) | Vol.<br>Perd.<br>(mm <sup>3</sup> .) | Vol.<br>Ajust.<br>(mm <sup>3</sup> ) |
|-----|----------------------------|----------------------------|------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| CS  | 67.271<br>66.235           | 65.736<br>64.220           | 1.985<br>2.015         | 254.5<br>258.3                       | 265.9<br>270.2                       |
| T   | 66.852<br>66.563           | 66.018<br>65.765           | 0.834<br>0.798         | 106.9<br>102.3                       | 111.8<br>107.0                       |
| 300 | 65.563<br>66.351           | 64.589<br>65.516           | 0.974<br>0.835         | 124.9<br>107.1                       | 130.7<br>112.7                       |
| 480 | 61.091<br>63.100           | 59.673<br>61.755           | 1.418<br>1.345         | 181.2<br>172.4                       | 189.6<br>180.4                       |
| 550 | 63.668<br>64.258           | 61.615<br>62.264           | 2.053<br>1.994         | 263.3<br>255.6                       | 275.5<br>267.4                       |

TABLA IX

## ENSAYO DE DESGASTE PARA EL ACERO P20

|     | Masal<br>(gr.)   | Masaf<br>(gr.)   | Masa<br>Perd.<br>(gr.) | Vol.<br>Perd.<br>(mm <sup>3</sup> .) | Vol.<br>Ajust.<br>(mm <sup>3</sup> ) |
|-----|------------------|------------------|------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| CS  | 69.967<br>68.554 | 68.122<br>66.742 | 1.845<br>1.812         | 236.5<br>232.3                       | 254.7<br>250.1                       |
| T   | 66.096<br>65.992 | 65.009<br>64.841 | 1.087<br>1.151         | 139.4<br>147.6                       | 150.1<br>158.9                       |
| 250 | 68.553<br>67.566 | 66.464<br>65.611 | 2.089<br>1.955         | 267.8<br>250.6                       | 288.4<br>269.8                       |
| 400 | 68.194<br>66.947 | 65.965<br>64.891 | 2.229<br>2.056         | 285.7<br>263.4                       | 307.6<br>283.6                       |
| 580 | 69.655<br>68.624 | 67.339<br>66.099 | 2.316<br>2.525         | 297.3<br>323.7                       | 320.3<br>348.6                       |



TABLA X

## ENHAYO DE DESGASTE PARA EL ACERO D3

|     | Masa <sub>1</sub><br>(gr.) | Masa <sub>2</sub><br>(gr.) | Masa<br>Perd.<br>(gr.) | Vol.<br>Perd.<br>(mm <sup>3</sup> .) | Vol.<br>Ajust.<br>(mm <sup>3</sup> ) |
|-----|----------------------------|----------------------------|------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| CS  | 64.234                     | 62.519                     | 1.715                  | 219.8                                | 236.1                                |
|     | 64.562                     | 62.868                     | 1.694                  | 217.2                                | 233.3                                |
| T   | 63.216                     | 62.621                     | 0.595                  | 76.3                                 | 81.9                                 |
|     | 65.147                     | 64.533                     | 0.614                  | 78.7                                 | 84.5                                 |
| 350 | 66.004                     | 65.332                     | 0.672                  | 86.2                                 | 92.6                                 |
|     | 65.286                     | 64.591                     | 0.695                  | 89.1                                 | 95.7                                 |
| 550 | 62.288                     | 61.330                     | 0.958                  | 122.8                                | 131.9                                |
|     | 63.351                     | 62.350                     | 1.001                  | 128.3                                | 137.8                                |
| 630 | 61.818                     | 60.598                     | 1.220                  | 156.4                                | 168.0                                |
|     | 63.005                     | 61.649                     | 1.356                  | 173.8                                | 186.7                                |

# Condicion de suministro

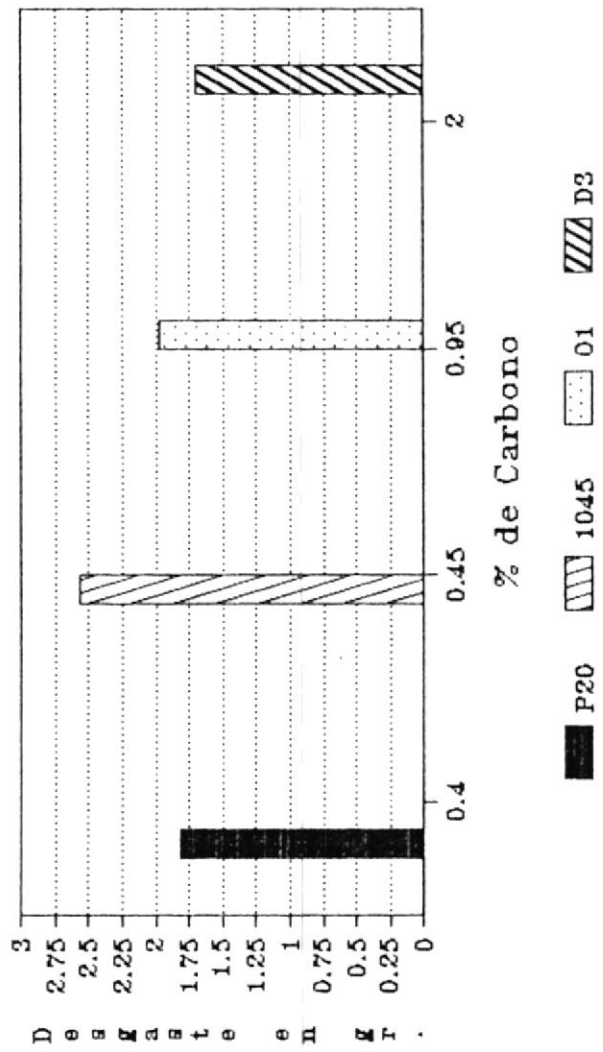


FIG. N° 26: RELACION ENTRE EL DESGASTE Y EL PORCENTAJE DE CARBONO

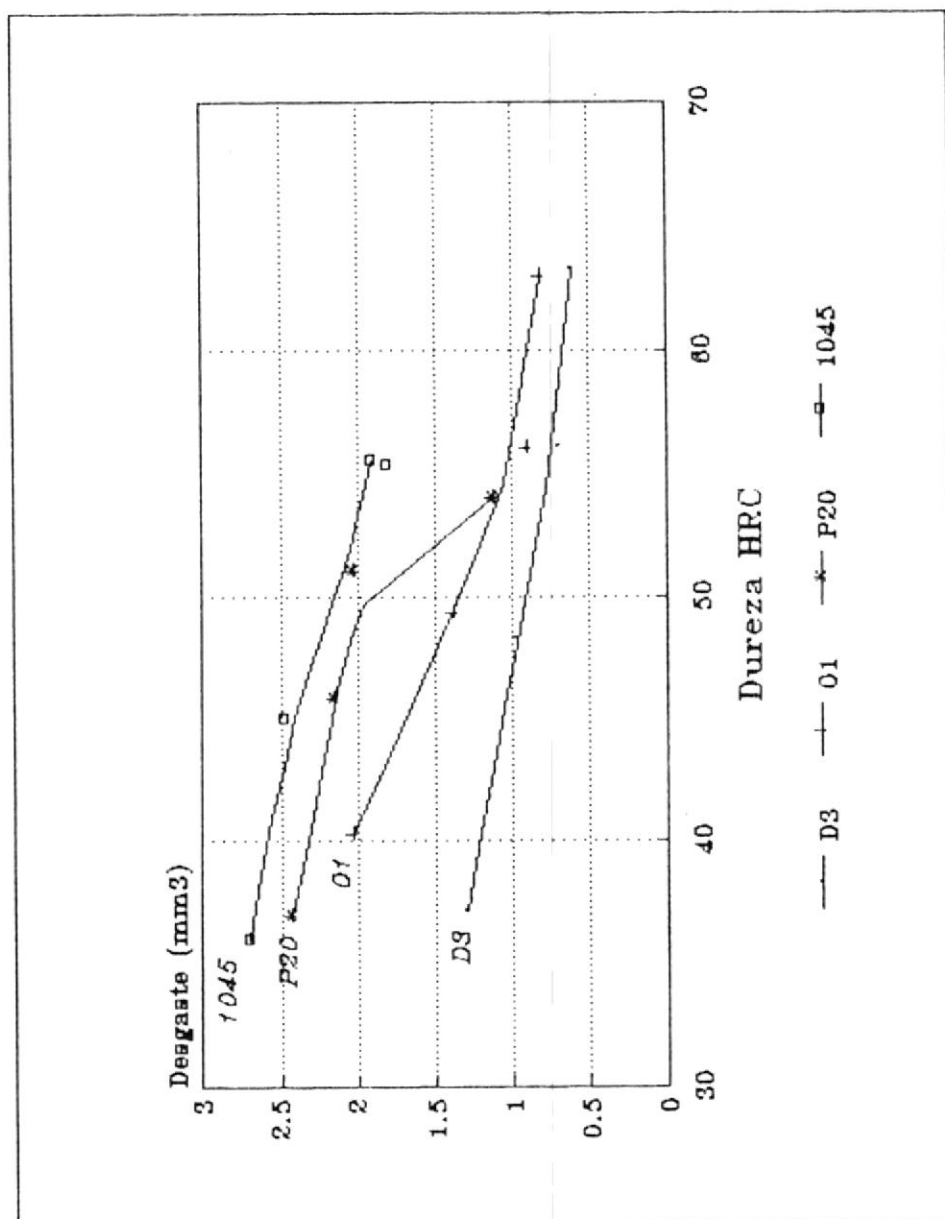
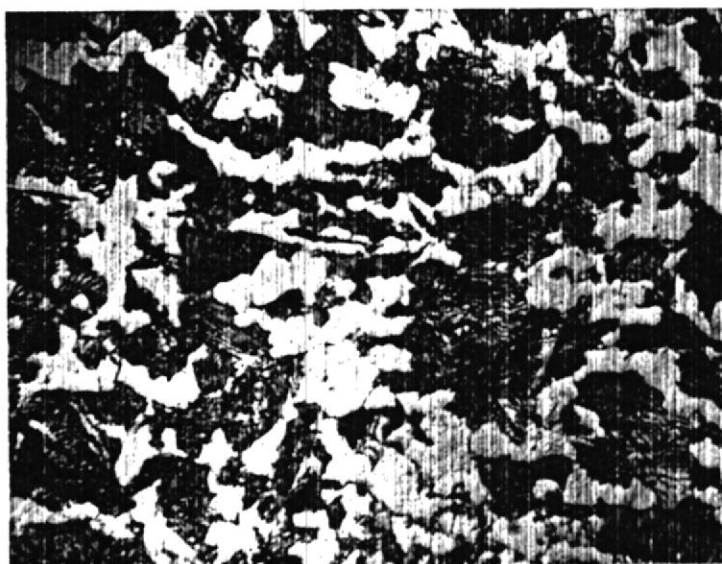
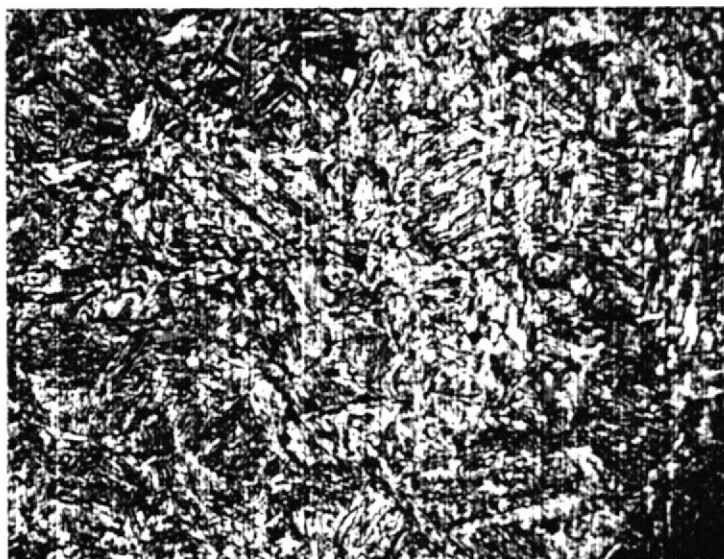


FIG. N° 27: DESGASTE OBTENIDO DESPUES DEL REVENIDO REALIZADO A DIFERENTE TEMPERATURA

Ensayo Metalográfico: Para el ensayo metalográfico sólo se analizaron probetas para cada tipo de acero, en condición de suministro, templadas (sin revenir), y la última a de mayor temperatura de revenido, que da dureza mínima como se puede observar en las Fig. 28 a 39 en su orden.



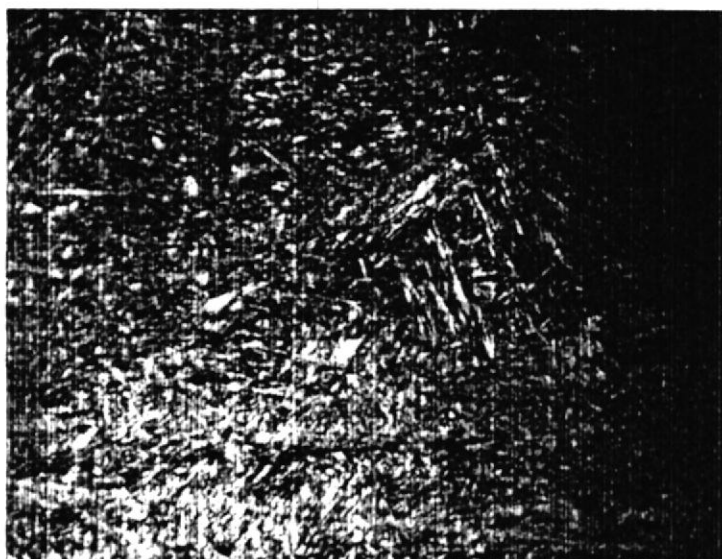
NITAL 2% AUMENTO 750  
FIG. N 28: MICROESTRUCTURA OBSERVADA EN EL ACERO AISI 1045, EN LA CONDICION DE SUMINISTRO. SE OBSERVA UNA MATRIZ DE FERRITA Y PERLITA.



NITAL 2%

AUMENTO 750

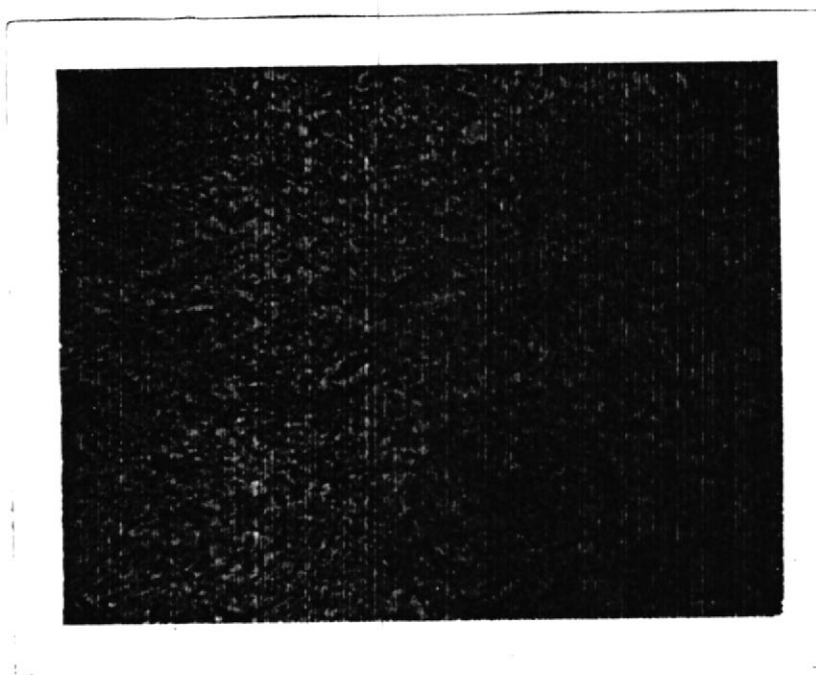
FIG. Nº 29: MICROESTRUCTURA OBSERVADA EN EL ACERO AISI 1045 EN LA CONDICION DE TEMPLADO. SE OBSERVA UNA MATRIZ MARTENSITICA.



NITAL 2%

AUMENTO 750

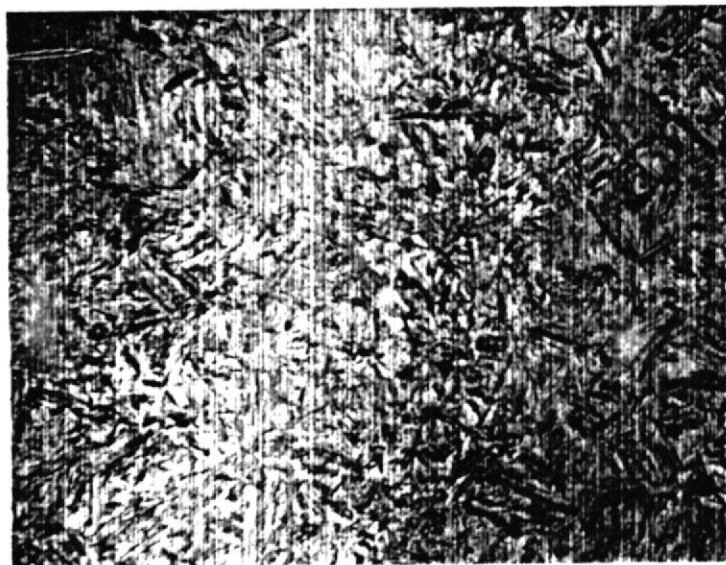
FIG. Nº 30: MICROESTRUCTURA OBSERVADA EN EL ACERO AISI 1045, EN LA CONDICION DE REVENIDO T:430 DUREZA: 36. SE OBSERVA MATRIZ DE MARTENSITA REVENIDA.



NITAL 2%

AUMENTO 750

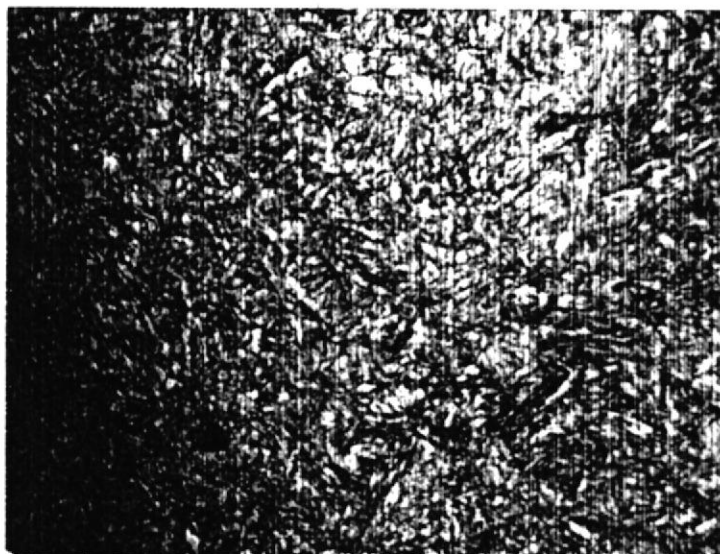
FIG. Nº 31: MICROESTRUCTURA OBSERVADA EN EL ACERO - AISI P20, EN LA CONDICION DE SUMINISTRO. SE OBSERVA UNA MATRIZ MARTENSITA REVENIDA.



NITAL 2%

AUMENTO 750

FIG. Nº 32: MICROESTRUCTURA OBSERVADA EN EL ACERO - AISI P20 EN LA CONDICION DE TEMPLADO. SE OBSERVA - UNA MATRIZ MARTENSITICA Y CARBUROS PEQUEÑOS.



NITAL 2%

AUMENTO 750

FIG. Nº 33: MICROESTRUCTURA OBSERVADA EN EL ACERO - AISI P20 EN LA CONDICION DE REVENIDO T:580 DUREZA : 37 HRC. SE OBSERVA UNA MATRIZ MARTENSITA MAS CARBUROS.

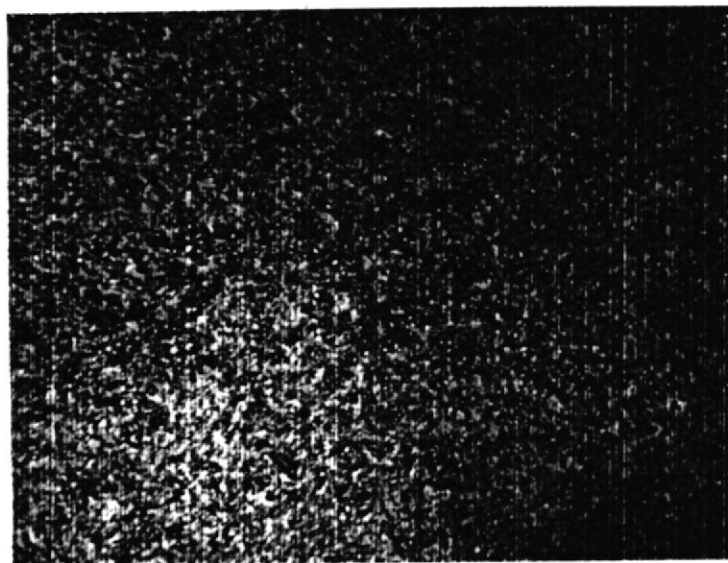


NITAL 2%

AUMENTO 750

FIG. Nº 34 MICROESTRUCTURA OBSERVADA EN EL ACERO AISI 01, EN LA CONDICION DE SUMINISTRO. SE OBSERVA UNA MATRIZ DE FERRITA MAS CARBUROS ESFEROIDALES.

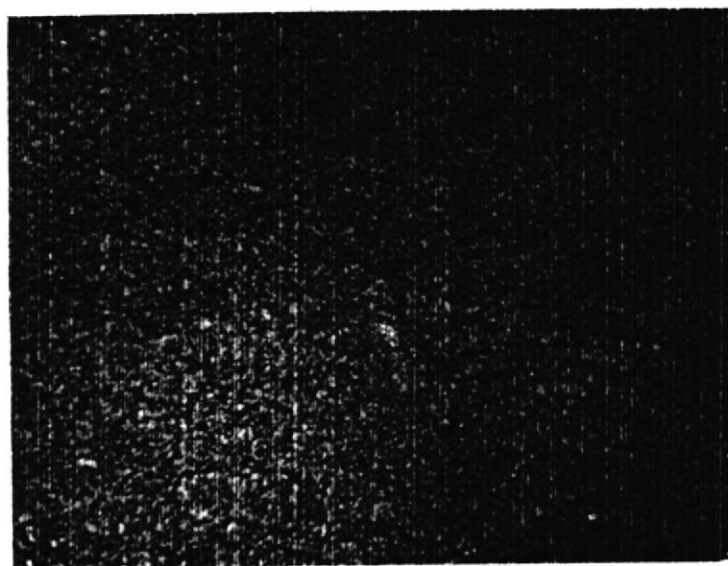




NITAL 2%

AUMENTO 750

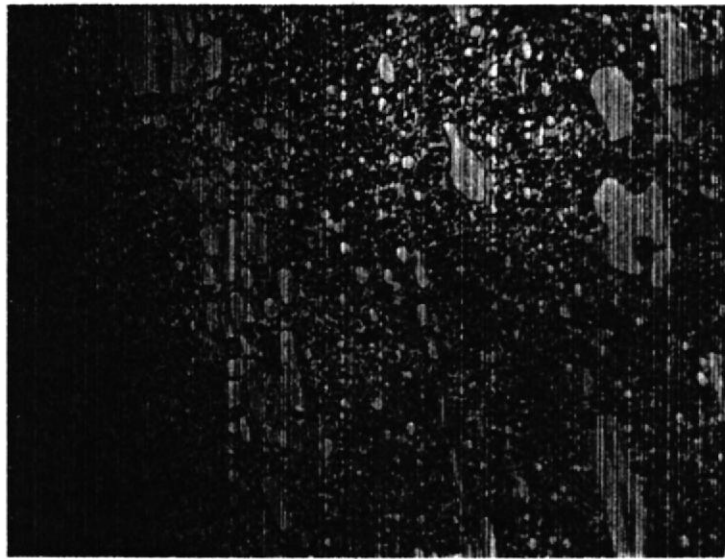
FIG. Nº 35: MICROESTRUCTURA OBSERVADA EN EL ACERO AISI 01, EN LA CONDICION DE TEMPLADO. SE OBSERVA UNA MATRIZ MARTENSITICA y AUSTENITA RETENIDA



NITAL 2%

AUMENTO 750

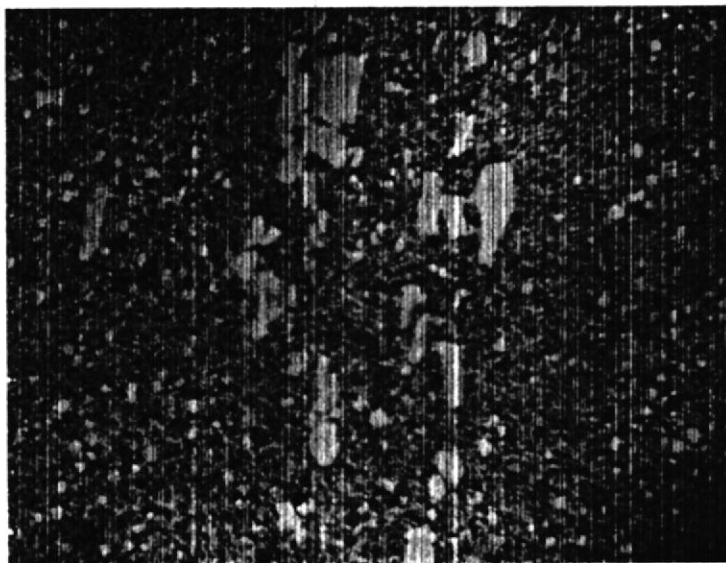
FIG. Nº 36: MICROESTRUCTURA OBSERVADA EN EL ACERO AISI 01 EN LA CONDICION DE REVENIDO T:580 DUREZA: 37 HRC. SE OBSERVA UNA MATRIZ DE MARTENSITA REVENIDA Y CARBUROS ESFEROIDALES.



NITAL 2%

AUMENTO 750

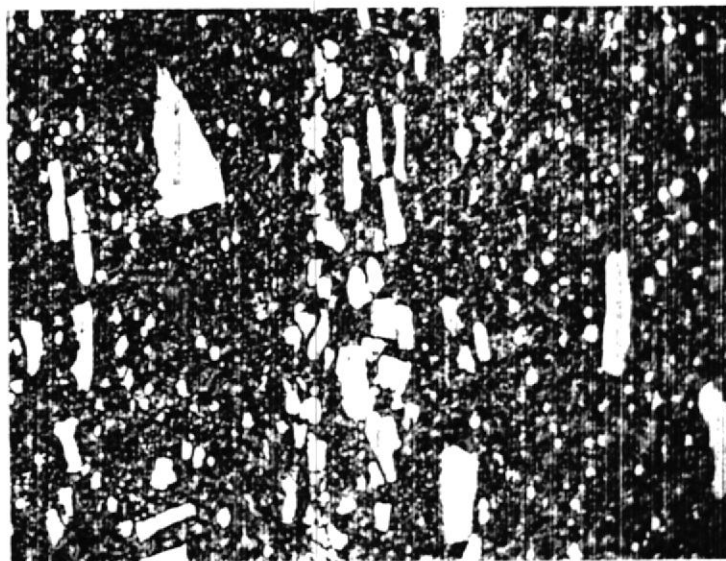
FIG. Nº 37: MICROESTRUCTURA OBSERVADA EN EL ACERO AISI D3 EN LA CONDICION DE SUMINISTRO. SE OBSERVA UNA MATRIZ DE FERRITA MAS CARBUROS



NITAL 2%

AUMENTO 750

FIG. Nº 38: MICROESTRUCTURA OBSERVADA EN EL ACERO AISI D3, EN LA CONDICION DE TEMPLADO. SE OBSERVA UNA MATRIZ MARTENSITICA, CARBUROS Y AUSTENITA RETENIDA.



NITAL 2%

AUMENTO 750

FIG. Nº 39: MICROESTRUCTURA OBSERVADA EN EL ACERO AISI D3, EN LA CONDICION DE REVENIDO T: 630 DUREZA: 37.2 HRC. SE OBSERVA UNA MATRIZ DE MARTENSITA REVENIDA Y CARBUROS.

### CAPITULO III

#### 3. Análisis de resultados.

De los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio realizadas (dureza, desgaste y microestructura) en los materiales seleccionados, se puede analizar lo siguiente:

De los datos de dureza observados en la Fig. 24 y de las microestructura de las Fig. 28, 31, 34, y 37 en la condición de suministro, vemos que a excepción del P20 el cual tiene un tratamiento de bonificado (temple más revenido), la dureza aumenta a medida que aumenta el contenido de carbono a pesar de que existen diferencias en la estructura como en el acero 1045 en que observamos ferrita más perlita laminar, mientras que en el O1 y D3 tenemos perlita globulizada (ferrita más globulos de carbono). La diferencia existente en la dureza entre el O1 y el D3, se debe a la mayor fracción volumétrica de carburos en este último, debido a las diferencias existentes tanto en el contenido de carbono, así como al tipo de carburo presente,  $M_3C$  (840-1100 HV) para O1 y  $M_7C_3$  (1100-1800 HV) para el D3. (12)

La Fig. 25, muestra los valores de dureza obtenidos

después del proceso de temple y revenido. Las diferencias existentes en la dureza debido a la condición de templado (sin revenir), se deben exclusivamente al contenido de carbono de la martensita para el caso del 1045 y el P20, mientras que para el 01 y D3 también influye la fracción volumétrica de carburos que sobreviven al proceso de austenizado y presencia de austenita retenida, la cual puede ser causada por temperaturas y tiempos de austenización demasiado elevados, elementos aleantes que disminuyen las temperaturas de inicio y final de transformación de la martensita, tal como observamos en las Fig. 29, 32, 35 y 38.

Al aumentar la temperatura de revenido, vemos que la dureza en todos los aceros ensayados disminuye debido a la descomposición de la martensita por precipitación de carburos en cada una de las etapas del proceso de revenido. Las diferencias existentes en la razón de pérdida de dureza se debe a que la presencia de elementos aleantes retarda dicha razón.

Al comparar los diferentes tipos de acero se hace notorio que tres de los cuatro materiales son aceros para herramientas, los mismos que se caracterizan por un alto porcentaje de carbono, un alto contenido de elementos aleantes, alta templabilidad y debido a la

presencia de una cantidad de carburos en la microestructura tienen una alta resistencia al desgaste; y son precisamente el tipo, tamaño y distribución de estos carburos los que influyen en las propiedades del desgaste.

De la figura 26, podemos observar que a medida que aumenta el contenido de carbono aumenta la resistencia al desgaste abrasivo a pesar de las diferencias existentes en la microestructura, las que fueron explicadas anteriormente. La gran diferencia existente al ser comparada la resistencia al desgaste del 1045, 01 y D3, con el P20 se debe a que es suministrado en la condición bonificada.

Si comparamos el AISI D3 y el 01, los cuales presentan igual estructura de ferrita más cementita globular, se puede indicar que la diferencia existente en resistencia al desgaste se debe a que el D3 por tener un mayor contenido de carbono y elementos aleantes (Cr), presenta una mayor fracción volumétrica de carburos del tipo  $M_7C_3$ .

Al evaluar la resistencia al desgaste después de aplicar un tratamiento de temple y revenido, se observa que el desgaste aumenta a medida que la dureza disminuye por un aumento de la temperatura de revenido. Esta tendencia con mayor o menor intensidad se observó en todos los

materiales evaluados.

Esta pérdida en la resistencia al desgaste se debe básicamente a la descomposición de la martensita, la cual pierde carbono debido a la precipitación de carburos de transición que dependen del rango de temperaturas utilizadas durante el revenido.

Al analizar las cuatro curvas obtenidas, vemos que el acero AISI D3 es el que tiene mayor resistencia al desgaste y el acero AISI 1045 menor resistencia. Este comportamiento se debe a las diferencias existentes en la composición química que se refleja en la dureza de la martensita obtenida y la presencia de carburos del tipo  $M_3C$  o  $M_7C_3$  para el caso del D3 y O1.

Cuando comparamos el O1 con el D3 se puede observar que cuando aumenta la cantidad de carburos la resistencia al desgaste aumenta.

De igual manera la variación de la resistencia al desgaste con la dureza obtenida después del revenido varía casi uniformemente en los aceros O1 y D3. Este comportamiento puede ser debido a que los carburos existentes en la estructura no se modifican durante el revenido, por lo que la pérdida de la resistencia se debe exclusivamente a la disminución de la dureza de la matriz martensítica.

## CAPITULO IV

### 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Al aumentar el contenido de carbono, aumenta la la resistencia al desgaste para todas las condiciones ensayadas.

2. De los aceros evaluados se encontró que el AISI D3 posee la mejor resistencia al desgaste.

3. Las propiedades del desgaste dependen del tamaño, forma, distribución, cantidad y composición de los carburos existentes, así como de las propiedades de la matriz.

4. Un factor importante que influye en la selección de materiales resistentes al desgaste por abrasión es el costo. Es por esto, que en una aplicación específica como es la fabricación de martillos de molienda como los utilizados en la fábrica de aceites La Favorita para moler palmiste, se está utilizando acero 1045, con un tratamiento térmico de templeado en agua a una temperatura de austenización de 850 C, teniendo una capacidad de 4000 ton.

Estos martillos se hubieran podido fabricar de un



acero especial como el D3, el cual evidentemente es más resistente al desgaste, pero además del factor resistencia al impacto que se necesita para dichos martillos, siendo el 1045 mejor resistente al impacto, influyó el factor costo en la selección del material.

5. Extender el estudio realizado a otro tipo de materiales para tratar de disminuir costos en la fabricación de partes de maquinarias utilizadas en procesos de molienda.

6. Implementar un laboratorio básico para que este disponible para la evaluación de otras formas de desgaste, ayudando así al desarrollo de la industria nacional.

## CITAS BIBLIOGRAFICAS

- (1) Holderbank Management and Consulting Ltd. Manual de mantenimiento, Desgaste, Principios y Protección
- (2) Metal Handbook, Wear Resistant, Vol I, pag. 597
- (3) Metal Handbook, Wear Resistant, Vol I, pag. 597
- (4) Metal Handbook, Wear Resistant, Vol I, pag. 597
- (5) Tribology and Wear, C.S. Yust, pag.150
- (6) Metal Handbook, Wear Resistance, pag. 600
- (7) Norma ASTM G85, Prueba Estándar para medir la resistencia al desgaste usando la rueda de caucho y arena seca, Vol. 10
- (8) Metal Handbook, Wear Resistance, pag. 611
- (9) ASSAB, Folleto de tratamiento térmico de los aceros para herramientas
- (10) Norma ASTM G85, Prueba Estándar para medir la resistencia al desgaste usando la rueda de caucho y arena seca, Vol. 10
- (11) Norma ASTM E18, Prueba Estándar para medir dureza Vol. 10
- (12) Heat Treatment of ferrous Alloys pag. 162

## BIBLIOGRAFIA ADICIONAL

- ASM INTERNATIONAL. Guide To Selecting Engineered  
Materials Vol. 4, Ohio 1989, 132p.
- ASM. Metal Handbook, Atlas of Microstructures of  
Industrial Alloys, Ohio, 1973, 366p.
- ASSAB DF-2. Cold Work Tool Steel, Suecia, 6p.
- ASSAB XW-5. Herramientas para Trabajos en Frio, México,  
6p.
- ASTM. Standard Practices and Procedures for Steels,  
ASTM, Ohio, 1985, 493p.
- ASTM. Standard Test Method for Measuring Abrasion Using  
Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus. p. 239 a p.251.
- BOHLER, Manual de Aceros Especiales, 28p.
- BORIK, F. Testing for Abrasive Wear, ASTM, 1976, p.30 a  
p. 44
- BROOKS, CHARLIE R. Heat Treatment of Ferrous Alloys,  
Mc. Graw Hill, Nueva York, 261p.
- DIESBURG D.E. & BORIK F. Optimizing Abrasion Resistance  
and Toughness in Steels and  
Irons for the Mining Industry,  
S/F, p. 94 a p.192.
- HOLDERBANK. Procesos y Tecnología, Curso de  
Mantenimiento, Management and Consulting  
Ltd., Suiza, 44p.

KRAUS G. Principles of Heat Treatment of Steel, ASM,  
Ohio, 1985, 291p.

RIGNEY, DAVID A. Wear Resistance, Metal Handbook, Vol.  
1, p. 597 a p.661.

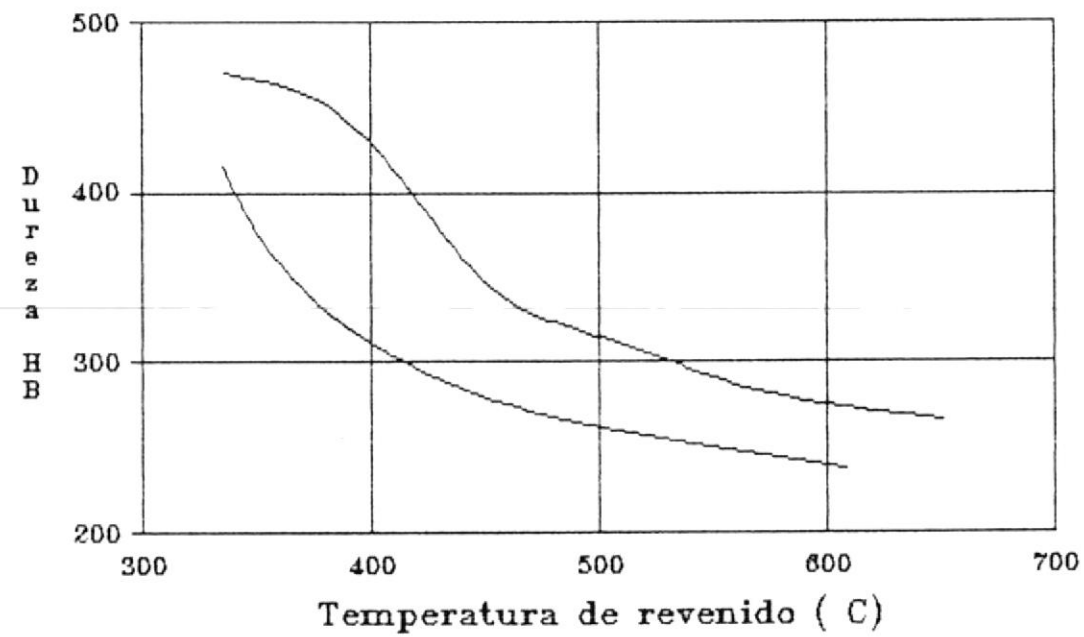
SOLANO M., VICENTE. Reconstrucción de Partes de  
Maquinarias usando recubrimientos  
duros con Soldadura de Arco  
Eléctrico, ESPOL, Tesis de Grado,  
Guayaquil, 1988, 355p.

YUST, C. S., Tribology and Wear, Internationals Metals  
Reviews, Vol 30, #3, Tennessee, 1985, p.  
141 a p.153.

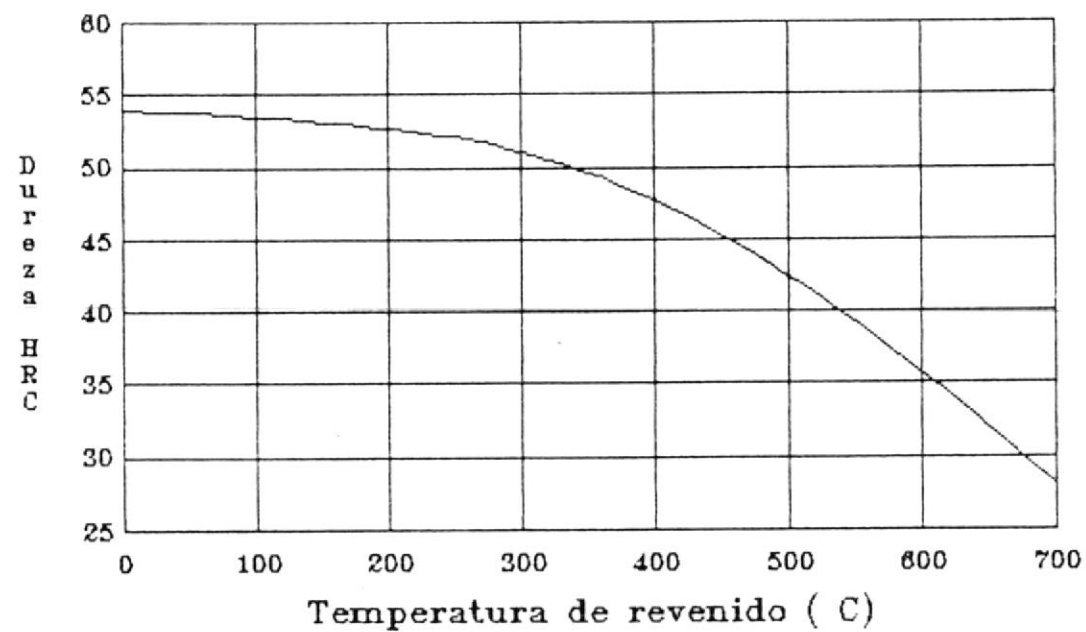


A N E X O S

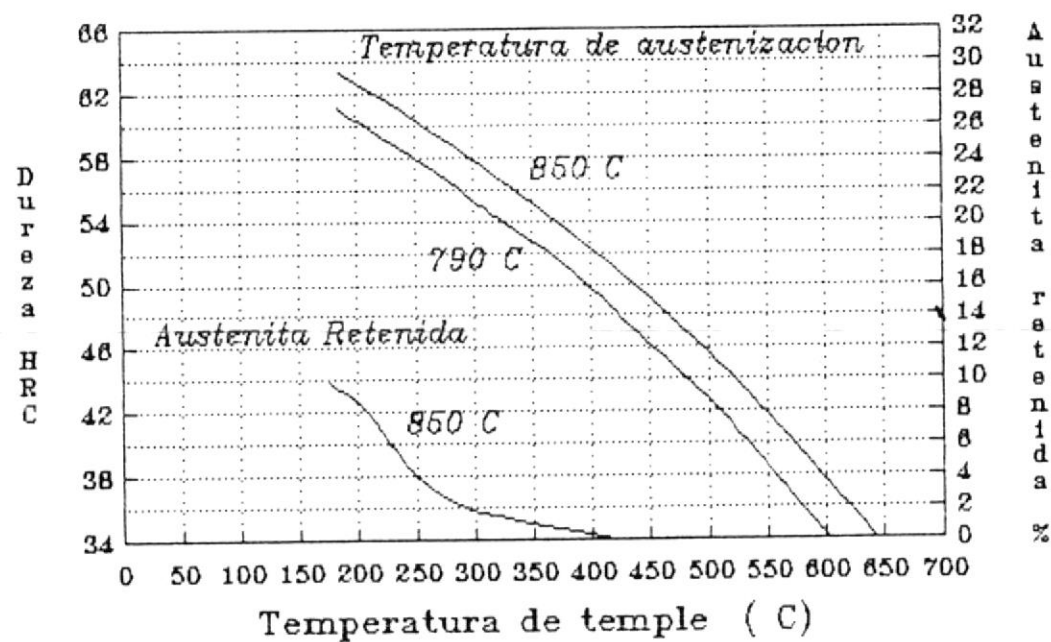
## Diagrama de Revenido Acero 1045



## Diagrama de Revenido Acero P20

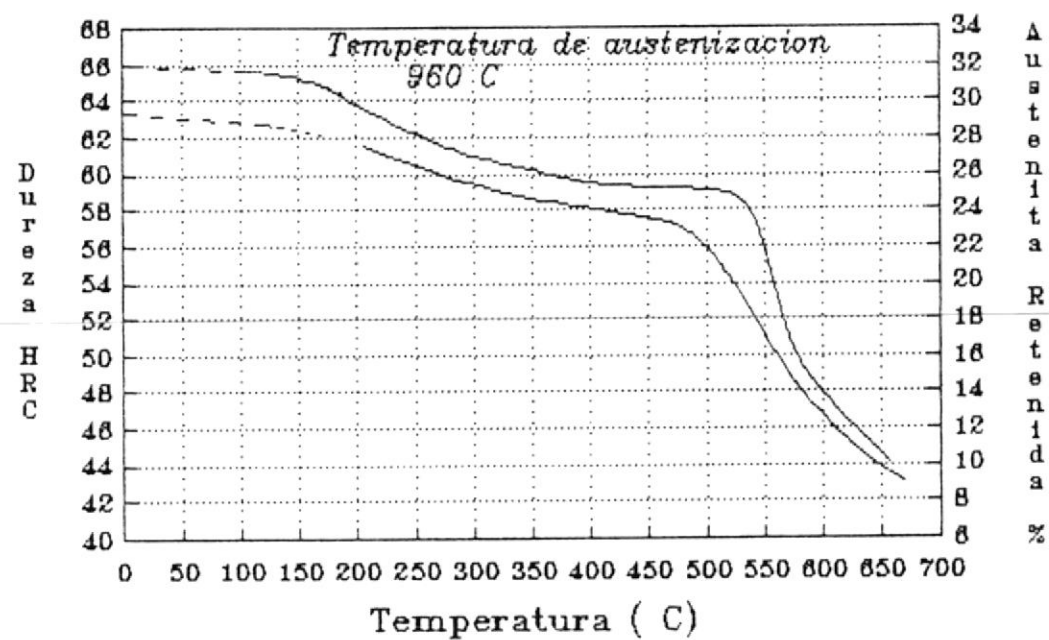


## Diagrama de Revenido Acero 01





## Diagrama de Revenido Acero D3





A.F. 143527