

**INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA DE REVENIDO SOBRE LA
RESISTENCIA AL DESGASTE DE ACEROS PARA HERRAMIENTAS DE
TRABAJADO EN FRÍO**



**MAURO ARIZA CHACÓN
FREDDY ALEXANDER RUEDA CHANAGÁ
MIGUEL ÁNGEL SÁNCHEZ OROZCO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERIA METALURGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA
2006**

**INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA DE REVENIDO SOBRE LA
RESISTENCIA AL DESGASTE DE ACEROS PARA HERRAMIENTAS DE
TRABAJADO EN FRÍO**

**MAURO ARIZA CHACÓN
FREDDY ALEXANDER RUEDA CHANAGÁ
MIGUEL ÁNGEL SÁNCHEZ OROZCO**

**Trabajo de grado para optar al título de:
Ingeniero Metalúrgico**

**ING. AFRANIO CARDONA GRANADOS
Director**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERIA METALURGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA**

2006

Dedico este logro a mi madre GLORIA ESPERANZA CHACÓN, a mis abuelos maternos MAGDALENA GOMEZ y VITALIANO CHACON, a mi tío materno HENRY CHACÓN, a mi hijo SAMEC ARIZA y a la madre de mi hijo LUZ ANGELA LA ROTTA; por su apoyo moral y económico de manera incondicional.

Mauro

Dedico este logro a mi madre ISABEL CHANAGÁ, mis hermanas NANCY y CLAUDIA RUEDA, por su apoyo incondicional, por creer en mi y brindarme su cariño en todo momento.

Freddy Alexander

Dedico este triunfo a mis padres MARTHA LUCIA OROZCO y MIGUEL ANGEL SÁNCHEZ, a mis hermanos FELIPE ANDRES y LAURA MILENA a la mujer más especial que he podido encontrar DENIS NATALIA GUTIERREZ, quienes siempre estuvieron ahí para mi incondicionalmente.

Miguel Angel

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a:

A Dios con el que siempre contamos y no siempre lo tenemos presente.

A nuestras familias que nos apoyan y nos dan su amor.

A la universidad Industrial de Santander, que nos permitió formar parte de tan importante familia.

A la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales y a todos aquellos que pertenecen a ella, con quienes compartimos día a día siendo esta nuestro segundo hogar.

Al Ph.D. DARIO YESID PEÑA, por su colaboración desinteresada mostrándonos la simpleza de la sabiduría y lo que significa ser un maestro.

Al Ingeniero AFRANIO CARDONA (Director), por la oportunidad de trabajar con él.

A Aceros Böhler de Colombia S.A. por su infinita colaboración para con este trabajo.

A Dios que siempre me ilumino y me lleno de sabiduría en los momentos que más lo necesitaba.

A mi familia por su apoyo incondicional.

A las familias Gutiérrez Pérez y Roza Correa que me permitieron ser un integrante mas de estas, brindándome todo el apoyo que pudieron.

A Denis Natalia Gutiérrez que fue la brújula que me señalo mi destino y me enseñó como el amor nos puede llevar a la incondicionalidad.

A mis amigos que muchas veces se comportaron como hermanos y estuvieron siempre ahí aunque yo me olvidara de ellos.

MIGUEL ANGEL

RESUMEN

TITULO:

INFLUENCIA DEL TRATAMIENTO TÉRMICO DE REVENIDO SOBRE LA RESISTENCIA AL DESGASTE ADHESIVO DE ACEROS PARA TRABAJADO EN FRÍO*

AUTORES:

ARIZA MAURO
RUEDA FREDDY A.
SÁNCHEZ MIGUEL A.**

PALABRAS CLAVES:

Tribología, Desgaste, Dureza, Revenido, Microestructura.

DESCRIPCIÓN:

Este trabajo de investigación hace un estudio de desgaste adhesivo en aceros para trabajado en frío, para lo cual se trabajo con los aceros Böhler K110, K340 y K190PM, estos aceros en la industria son empleados para aplicaciones similares, su diferencia parte en el nivel tecnológico empleado en la fabricación de cada uno.

Para hacer un mejor análisis de la resistencia al desgaste adhesivo de estos aceros, se utilizaron como parámetros la dureza y la microestructura, que se obtienen por medio de los tratamientos térmicos, para este caso todos los aceros fueron austenizados a una temperatura de 1050 °C y se revinieron a diferentes temperaturas las cuales fueron 200, 300, 400, 500 y 600 °C, el medio de enfriamiento utilizado fue aire agitado.

Con este trabajo cuyos ensayos fueron realizados según norma ASTM G83-96, se buscó caracterizar estos aceros en el área tribologica específicamente en el desgaste adhesivo, también se hizo una comparación entre ellos, y se mostró que la dureza no es el único parámetro de selección para una pieza que va a ser utilizada en procesos de rodadura, sino que es necesario tener en cuenta la microestructura del material. En lo que se refiere a la dispersión de los ensayos esta estuvo por debajo de un 15% como lo exige la norma para ensayos realizados en la máquina de cilindros cruzados

* Trabajo de Grado

** Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Director. Ing. Afranio Cardona Granados

SUMMARY

TITLE:

INFLUENCES OF THE HEAT TREATMENT OF TEMPERING ON THE RESISTANCE TO THE ADHESIVE WEAR OF STEELS FOR WORK IN COLD.*

AUTHORS:

ARIZA MAURO
RUEDA FREDDY A.
SÁNCHEZ MIGUEL A.

KEY WORDS:

Tribology, Wear, Hardness, Tempering, Microstructure.**

ABSTRAC:

This work of investigation makes a study of adhesive wear in steel for work in cold, for which work with the steels Böhler K110, K340 and K190PM, these steels in the industry are used for similar applications, their difference starts off in the used technological level in the manufacture of each one.

In order to make a better analysis of the resistance to the adhesive wear of these steels, they were used like parameters the hardness and the microstructure, that is obtained by means of the heat treatments, for this case all the steels were austenized to a temperature of 1050 °C and they were tempered to different temperatures which were 200, 300, 400, 500 and 600 °C, the cooling enviroment used was anxious air.

With this work whose tests were made according to norm ASTM G83-96, It looked for to characterize these steels in the tribology area specifically in the adhesive wear, also a comparison among them was made, and it was showed that the hardness is not the only parameter of selection for a piece that is going to be used in friction processes, but is necessary to consider the microstructure of the material. In which one talks about the dispersion of the tests this was below a 15% as demands the norm for tests made in the crossed cylinder machine.

* Work of Degree

** School of Metallurgical Engineering and Science of Materials. Director. Ing. Afranio Cardona Granados

TABLA DE CONTENIDO

	Pag.
INTRODUCCION	20
1. OBJETIVOS	21
1.1 OBJETIVO GENERAL	21
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	22
3. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO	23
4. ALCANCES	24
5. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	25
5.1 DESGASTE	25
5.1.1. Medida del Desgaste	26
5.1.2. Cálculo del Desgaste	26
5.1.3. Clasificación de los Estados de Desgaste	26
5.1.4. Desgaste Adhesivo	28
5.2. TOPOGRAFÍA DE SUPERFICIES	31
5.2.1. Asperezas	31
5.2.2. Medida de la Rugosidad	32
5.3. CARACTERÍSTICAS DE LOS ACEROS TRABAJADOS	34
5.3.1. Acero para Herramientas Böhler K110	34
5.3.2. Acero para Herramientas Böhler K340	36
5.3.3. Acero para Herramientas Böhler K190 PM	38
5.4. EFECTOS DE LOS ELEMENTOS DE ALEACIÓN	41
5.4.1. Cromo	41
5.4.2. Molibdeno	42
5.4.3. Vanadio	42
5.4.4. Manganeso	43
5.4.5. Silicio	44

5.4.6.	Aluminio	44
5.4.7.	Niobio	44
5.5.	LOS CARBUROS	45
6.	ESTADO DEL ARTE	49
7.	DESARROLLO EXPERIMENTAL	50
7.1.	PROTOCOLO DE MANEJO DE LA MÁQUINA	52
8.	RESULTADOS	55
8.1.	DIAGRAMAS DE REVENIDO	55
8.2.	DIAGRAMAS DE DESGASTE vs. TIEMPO	56
8.3.	DIAGRAMAS DE DESGASTE vs. TEMPERATURA DE REVENIDO	58
8.4.	DIAGRAMAS DE DESGASTE vs. DUREZA	59
8.4.	METALOGRAFÍAS	60
8.5.	RUGOSIDAD	61
8.7.	D.R.X CUALITATIVO	64
8.7.1.	DRX PROBETAS	64
8.7.2.	DRX LIMADURAS	65
9.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	67
	CONCLUSIONES	72
	RECOMENDACIONES	74
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75
	ANEXOS	77

LISTA DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1. Curva Velocidad de desgaste vs. Distancia deslizada	27
Figura 2. Explicación de un desgaste adhesivo entre dos superficies y como sucede la fractura	28
Figura 3. Trazos idealizados de las asperezas de una superficie que muestran la misma altura entre crestas y valles, pero diferentes longitudes de onda.	31
Figura 4. Pendientes de las asperezas de una superficie erosionada (según Halliday)	32
Figura 5. Asperezas superficiales. R_t = altura máxima entre crestas y valles.	33
Figura 6. Metodología experimental.	50
Figura 7. Probeta típica del Ensayo de desgaste en la máquina de cilindros cruzados según norma ASTM G 83-96.	52
Figura 8. Máquina de cilindros cruzados, toma frontal, para el ensayo de desgaste adhesivo.	53
Figura 9. Máquina de cilindros cruzados para el ensayo de desgaste adhesivo, donde se puede observar el variador.	53
Figura 10. Montaje de las probetas en la máquina de cilindros cruzados.	54
Figura 11. Diagrama de revenido para los aceros Böhler K110, K340, K190.	55
Figura 12. Ensayo realizado con una carga 12.26 Kgf, 100 min. Y 800 RPM.	56
Figura 13. Ensayo realizado con una carga 12.26 Kgf, 100 min. Y 800 RPM.	56
Figura 14. Ensayo realizado con una carga 12.26 Kgf, 100 min. Y 800 RPM.	57
Figura 15. Ensayo realizado con una carga 12.26 Kgf, 800 RPM 100 min.	58
Figura 16. Ensayo realizado con una carga 7.26 Kgf, 400 RPM y 200 min.	58
Figura 17. Ensayo realizado con una carga 12.26 Kgf, 800 RPM y 100 min.	59
Figura 18. Ensayo realizado con una carga 7.26 Kgf, 400 RPM y 200 min.	59
Figura 19. Micrografías de los tres aceros utilizados a diferentes temperaturas de revenido; atacadas con nital 5% y 100x.	60
Figura 20. Huella en las probetas.	61

Figura 21.	Superficies al inicio y al final del ensayo de desgaste, Temperatura de revenido 500°C.	62
Figura 22.	Superficies al inicio y al final del ensayo de desgaste, Temperatura de revenido 500°C.	62
Figura 23.	Superficies al inicio y al final del ensayo de desgaste, Temperatura de revenido 300°C.	63

LISTA DE TABLAS

	Pag.
Tabla 1. Composición química del acero Böhler K110.	34
Tabla 2. Propiedades físicas del acero Böhler K110.	35
Tabla 3. Composición química del acero Böhler K340.	37
Tabla 4. Propiedades físicas del acero Böhler K340.	37
Tabla 5. Composición química del acero Böhler K190.	39
Tabla 6. Propiedades físicas del acero Böhler K190.	40
Tabla 7. Procedimiento para los ensayos según norma ASTM G83 – 96.	52
Tabla 8. Valor de linealización para cada temperatura de revenido.	56
Tabla 9. Valor de linealización para cada temperatura de revenido.	57
Tabla 10. Valor de linealización para cada temperatura de revenido.	57
Tabla 11. Rugosidad del acero Böhler K110 dada en micrómetros.	62
Tabla 12. Rugosidad del acero Böhler K340 dada en micrómetros.	63
Tabla 13. Rugosidad del acero Böhler K190 dada en micrómetros.	63
Tabla 14. DRX de la probeta K110.	64
Tabla 15. DRX de la probeta K340.	64
Tabla 16. DRX de la probeta K190.	65
Tabla 17. DRX de las limaduras del K110.	65
Tabla 18. DRX de las limaduras del K340.	65
Tabla 19. DRX de las limaduras K190.	66

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Presentación de los resultados como lo exige la norma ASTM G83-96

Anexo B. Reporte de datos de pérdida de peso sufrida durante los ensayos

Anexo C. Difractogramas

Anexo D. Procedimiento para el cambio de velocidades en el variador

INTRODUCCIÓN

A través de los años se ha visto la importancia del desgaste en los materiales, tanto es así que de manera inconsciente nuestros antepasados intentaron mejorar los procesos de rodadura con lubricantes o utilizando materiales que para ellos eran mejores para una aplicación determinada. Solo es hasta mediados del siglo pasado que la tribología comienza a tener una real importancia como ciencia, desde entonces se ha ido aumentando el estudio en esta área, tomando cada día mayor importancia.

Ahora también es cierto que la aleación más utilizada a nivel mundial es el acero y en la clasificación que este tiene lo que son llamados aceros para herramientas, este tiene un subgrupo conocido como aceros para trabajado en frío, los cuales presentan una alta resistencia al desgaste. Pero a nivel industrial como parámetro de selección de aceros, aunque sea para ser utilizado en procesos de rodadura es utilizado como parámetro solamente la dureza del material.

En este trabajo se busca aclarar que aunque la dureza es un parámetro muy utilizado para piezas en desgaste o fricción no es el único parámetro a analizar, junto a esto las empresas que proveen este material en sus catálogos cuentan con una descripción cualitativa de la resistencia al desgaste. Por esto se pretende conocer cuantitativamente el desgaste adhesivo de algunos de estos aceros, hacer una comparación entre ellos y demostrar que la dureza no es el único parámetro de selección que hay que contar con la microestructura del material y que para esta aleación, estos parámetros se pueden obtener al practicarles un tratamiento térmico de revenido.

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Analizar la influencia del tratamiento térmico de revenido a diferentes temperaturas sobre la resistencia al desgaste, de los aceros para herramientas Böhler K110 y K340 y K190 PM.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ⤴ Hallar la relación existente entre la dureza, para las diferentes temperaturas de revenido y la resistencia al desgaste en estos aceros para herramientas y representarla gráficamente.
- ⤴ Analizar la resistencia al desgaste con relación a la microestructura de los aceros para herramientas tratados térmicamente a diferentes temperaturas de revenido.
- ⤴ Determinar las diferencias de resistencia al desgaste, dureza y microestructura entre los tres aceros de aplicaciones similares, elaborados con tecnología convencional (Böhler K110), tecnología media (Böhler K340) y alta tecnología (Böhler K190PM), los cuales fueron tratados térmicamente.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Debido a los procesos de desgaste se generan altos costos, lo que en países desarrollados representa el 7.5% del PIB, solo en la reposición de piezas desgastadas.

En Colombia existen diversas industrias que requieren para sus líneas de producción el uso de aceros para herramientas de trabajado en frío, los cuales, teniendo en cuenta sus aplicaciones son sometidos a procesos de rodadura, sufriendo de esta manera un desgaste superficial, lo que conlleva a una disminución de la vida útil del material, la cual no es tomada en cuenta a la hora de hacer la selección del acero.

La selección de los aceros para herramientas de trabajado en frío está basada en la dureza superficial, composición química y en las recomendaciones que las empresas comercializadoras dan a sus clientes sobre el material, sin tener en cuenta el comportamiento de los aceros frente a procesos de rozamiento, ni sobre el mejoramiento que los tratamientos térmicos pueden tener en éstos, con respecto a su resistencia al desgaste.

3. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

En la actualidad es indispensable estudiar los fenómenos de superficie de los materiales ya que la lubricación, la fricción y el desgaste, que se produce en uno o más tribosistemas, generan altos costos, debido a los elevados consumos energéticos necesarios para vencer la fricción y la continua reposición de piezas dañadas por desgaste. Por esta razón, el deterioro que los materiales sufren cuando son sometidos a rodadura es necesario cuantificarlo con el fin de determinar la vida útil del material para establecer su mejor aplicación.

Dentro de la gama de materiales cuya principal función es resistir el constante desgaste, se encuentran los aceros para herramientas de trabajado en frío, entre los cuales están los aceros Böhler K110, K340 y K190 PM, que difieren en su tecnología de fabricación pero tienen aplicaciones similares, tales como son, herramientas para roscado, corte, troquelado, para extrusión, cizallado, entre otras; en este proyecto se busca brindar un aporte a la industria, efectuando una investigación sobre la resistencia al desgaste de estos aceros correlacionándola con la microestructura obtenida por medio de los tratamientos térmicos.

En los catálogos que las empresas presentan a sus clientes para favorecer la selección del acero, se presentan tablas en las cuales se hacen comparaciones entre diferentes aceros con respecto a sus propiedades entre ellas la resistencia al desgaste, pero no presentan un valor cuantificado de esta propiedad del acero, lo que daría al comprador una mejor visión a la hora de la selección.

4. ALCANCES

1. Hallar la influencia del tratamiento térmico de revenido y la dureza sobre la resistencia al desgaste adhesivo, en los aceros para herramientas Böhler K110, K340 y K190 PM.
2. Determinar una temperatura de revenido que proporcione la mejor resistencia al desgaste de cada uno de los aceros estudiados, estableciendo la dureza y microestructura correspondiente.
3. Comparar la capacidad de resistencia al desgaste de los tres aceros estudiados.
4. Aplicar los conocimientos adquiridos en el área de tribología, para poder explicar el comportamiento de los aceros estudiados cuando son sometidos a fricción sufriendo un desgaste adhesivo.

5. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

5.1 DESGASTE

El desgaste es un proceso en el cual las capas superficiales de un sólido se rompen como resultado de la acción mecánica de otro cuerpo o medio¹, este se asocia normalmente con la pérdida de material que sucede cuando dos cuerpos en movimiento relativo entran en contacto. El desgaste es controlado por las propiedades del material, las condiciones ambientales y de operación y la geometría de los cuerpos en contacto. Se pueden identificar dos grupos de mecanismos de desgaste; el primero comprende aquellos dominados por el comportamiento mecánico de los materiales, y el segundo comprende aquellos definidos por la naturaleza química de los materiales. En casi todas las situaciones es posible identificar el mecanismo que gobierna el desgaste, el cual normalmente se determina por las propiedades mecánicas y la estabilidad química del material, la temperatura dentro de la zona de contacto, y las condiciones de operación.

Siempre que hay movimiento relativo entre dos sólidos que soportan una carga existe una situación potencial de desgaste. En términos generales, se sabe que el movimiento puede ser unidireccional o de vaivén, ya sea deslizante o de rodamiento. Puede existir una combinación de estos dos últimos, o el desgaste puede deberse a un movimiento oscilatorio de pequeñas amplitudes. Un etal uede interactuar con un no metal, o con líquidos, como aceite lubricante o agua de mar.

¹ MARTINEZ. P, Francisco. La Tribología México D.F: Limusa, 1997. p. 65-99

5.1.1. Medida del Desgaste

En pruebas con tribómetros las medidas de desgaste son típicamente descritas por cambios en geometría (lineal, sección transversal o volumen removido) o cambios en masa.

- Medidas de desgaste lineal: una medida del desplazamiento de una probeta hacia (o se aleja de) la otra denota un desgaste profundo. Permite un monitoreo constante.
- Sección transversal: la medida de una huella-desgaste.
- Volumen removido: desgaste relacionado al volumen removido. El material requiere la comparación con la densidad conocida y la corrección para anomalías en cambios de masa.
- Cambio de masa: La pérdida o ganancia de masa de la probeta durante la prueba. Las pérdidas de masa son solo convenientes para grandes cantidades de desgaste. La ganancia de masa puede resultar por reacciones químicas entre la probeta y el medio (por ejemplo la oxidación, absorción de agua, etc.), infiltración de lubricantes en poros, o si ocurre una transferencia de material.

5.1.2. Cálculo del Desgaste

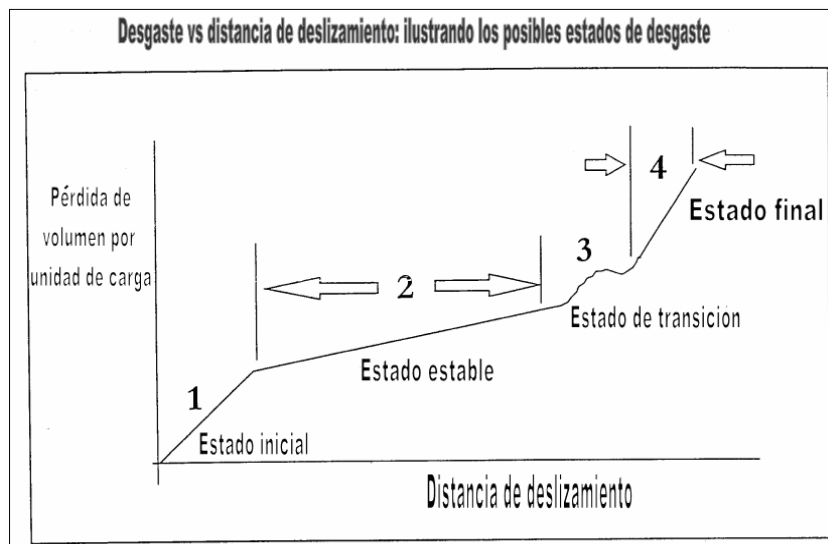
El coeficiente de desgaste adimensional, K , puede ser calculado si el volumen desgastado y la distancia deslizada se conocen. El cálculo de la velocidad de desgaste específica, k , asume que el desgaste es proporcional a la carga y generalmente se expresa en términos de volumen removido por unidad de distancia de deslizamiento por unidad de carga. El último es comúnmente más especificado.

5.1.3. Clasificación de los Estados de Desgaste

Es improbable que la velocidad de desgaste permanezca constante durante una prueba tribométrica. Un máximo de cuatro estados de desgaste son posibles, y se definen a continuación:

- 1) VELOCIDAD DE DESGASTE INICIAL: Velocidad de desgaste instantánea en el inicio de la prueba. Esta puede encontrarse por medio de la tangente a la curva del volumen perdido por unidad de carga contra la distancia de deslizamiento en el comienzo de la prueba.
- 2) DESGASTE EN ESTADO ESTABLE: Velocidad de desgaste sobre un periodo relativamente grande donde la velocidad de desgaste permanece prácticamente constante. Este estado se encuentra después del cambio inicial transitorio en las velocidades de desgaste que han ocurrido.
- 3) DESGASTE TRANSITORIO: Cambio repentino en la velocidad de desgaste quizás como un cambio del mecanismo de desgaste dominante.
- 4) DESGASTE FINAL: Medida de la velocidad de desgaste al final de la prueba².

Figura 1. Curva Velocidad de desgaste vs. Distancia deslizada



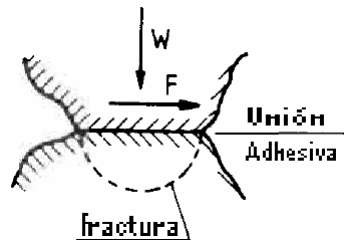
² European Space Agency. 3 ed. Space Tribology Handbook. Cheshire: AEA Technology plc; 2002.

5.1.4. Desgaste adhesivo

El desgaste adhesivo se encuentra invariablemente asociado con la formación de uniones adhesivas a la interfase. Para que una unión adhesiva se forme, las superficies en interacción deben estar en contacto íntimo. La fluencia de estas uniones depende en gran medida de la naturaleza físico-química de las superficies en contacto. Un número de pasos bien definidos que llevan a la formación de partículas de desgaste adhesivo, se pueden identificar así:

- I. Deformación de las asperezas en contacto.
- II. Remoción de la película superficial.
- III. Formación de uniones adhesivas (Figura 2).
- IV. Falla de las uniones y transferencia de material.
- V. Modificación de los fragmentos transferidos.
- VI. Remoción de los fragmentos transferidos y creación de las partículas de desgaste³.

Figura 2. Explicación de un desgaste adhesivo entre dos superficies y como sucede la fractura



El volumen de desgaste removido por el proceso adhesivo puede estimarse por la expresión propuesta por Archard.

$$V = K \frac{SL}{Pm} (1)$$

³ T.A. Stolarski. Tribology Desing Machine. Oxford: Butterworth-Heinemann; 2000. p. 19-20

Donde V es la pérdida de volumen por desgaste, S es la distancia de deslizamiento, L es la carga normal, P_m es la presión de flujo (dureza Vickers, la cual puede estimarse como una tercera parte del esfuerzo de fluencia del metal en cuestión, manteniendo la consistencia en las unidades) del más blando de los dos materiales y K es una constante (considerada por Archard de ser la probabilidad de la formación de una partícula de desgaste).

Si hay dos superficies compuestas de diferentes materiales, cada una tendrá un diferente valor de K asociado con su desgaste. Para calcular el desgaste total (el desgaste de ambas superficies), se deben sumar los dos valores de K . La cantidad K , útil en ingeniería, también se ha llamado coeficiente de desgaste. Los valores de K dependen ampliamente de las condiciones ambientales de deslizamiento.

La ecuación de Archard es fácil de usar y esta de acuerdo con las observaciones realizadas en estado estable. Esto predice que el desgaste: (a) es independiente del área nominal de contacto, (b) es directamente proporcional a la carga, (c) es inversamente proporcional a la dureza, y (d) es directamente proporcional a la distancia de deslizamiento.

La proporcionalidad entre el desgaste y la carga ocurre sólo cuando la presión normal sobre el área nominal de contacto es menor que el esfuerzo de fluencia de los materiales, lo cual es una situación común en ingeniería. Cuando la presión nominal está alrededor del esfuerzo de fluencia, el coeficiente de desgaste adhesivo de Archard no es completamente una constante, y puede aumentar rápidamente para pequeños incrementos en el esfuerzo. Es importante hacer notar que la pérdida de volumen por desgaste es determinado por la carga y no por la presión. La profundidad de la velocidad de desgaste, sin embargo, se relaciona con el esfuerzo aplicado.

$$\frac{h}{S} = \frac{V}{AS} = \frac{Kp}{P_m} \quad (2)$$

Donde (h/S) es la profundidad de desgaste por unidad de distancia deslizada y p es el esfuerzo nominal aplicado

Las características de desgaste de una combinación de metales, no es una propiedad de la suma de los metales, es una propiedad del sistema y depende de la temperatura en la superficie de contacto, ambiente químico, los materiales y sus propiedades, parámetros de operación, entre otras.

Para sistemas más complicados, las ecuaciones (1) y (2) son normalmente modificadas a las formas

$$V = K'SL \quad (3)$$

$$\frac{h}{S} = K'p \quad (4)$$

K' es equivalente al (K/Pm) para metales, y tiene dimensiones de $(m^2/Kg.)^4$.

Cuando la formación de la unión adhesiva es el resultado de la adhesión interfacial, que toma lugar en los puntos de contacto íntimo entre las asperezas superficiales, los mecanismos de falla de estas uniones no están bien definidos. Existen razones para pensar que los mecanismos de fractura juegan un papel importante en los mecanismos de falla de la unión adhesiva. Se conoce que tanto la adhesión como la fractura son muy sensibles a la contaminación superficial y al ambiente, por lo tanto, es extremadamente difícil desarrollar una correlación entre el desgaste adhesivo y la mayor parte de las propiedades del material. Se conoce, sin embargo, que el desgaste adhesivo es influenciado por los siguientes parámetros característicos de los cuerpos en contacto:

- I. Estructura electrónica.
- II. Estructura cristalina.
- III. Orientación del cristal
- IV. Fuerza adhesiva.

⁴ Eugene F, Adhesive Wear: A General Review of the State of Experimental Knowledge and Theory. Materials in Engineering Applications, Vol 1; April 1979.

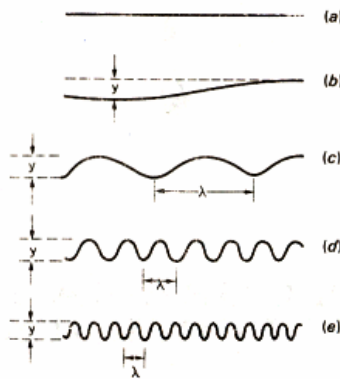
Por ejemplo, metales hexagonales (hcp), en general, son más resistentes al desgaste adhesivo que los metales cúbicos centrados (bcc) en el cuerpo y cúbicos centrados en las caras (fcc).

5.2 TOPOGRAFÍA DE SUPERFICIES

Es muy importante conocer la naturaleza original de las superficies a fin de comprender la interacción interfacial de las partes móviles de una maquinaria. Un aspecto importante de las superficies es saber si se encuentran libres de contaminantes u óxidos. Además, es necesario saber si una superficie es mecánicamente suave. Pero la premisa básica para comprender los mecanismos de fricción y desgaste es saber que no existe una superficie perfectamente plana a escala microscópica .

5.2.1. Asperezas

Figura 3 Trazos idealizados de las asperezas de una superficie que muestran la misma altura entre crestas y valles, pero diferentes longitudes de onda.



Una superficie perfectamente lisa, como la que se muestra en la figura 3a, nunca se obtiene mediante los métodos convencionales de preparación de superficies como son el maquinado, pulido, cepillado y demás. En estos casos las superficies presentan asperezas, o sea, ondulaciones en la forma de colinas y valles. En la figura 3 se puede observar que las superficies *b* a *e* tienen protuberancias, todas de la misma profundidad, pero la longitud de onda es macrogeométrica como en *b* o

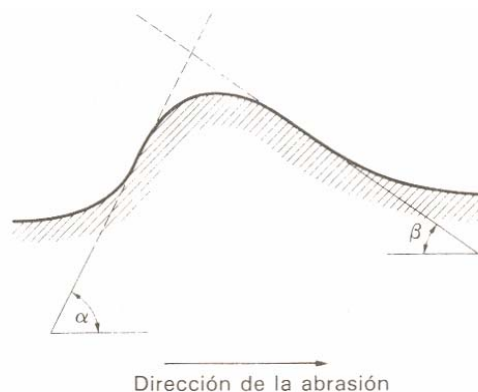
microgeométrica (figura 3e). La figura 3b muestra que las asperezas tienen una longitud de onda grande; este tipo de superficies se describe como lisa, pero no plana. La figura 3e tiene muchas protuberancias de longitud de onda corta y esta superficie se estima plana, pero rugosa. La naturaleza de las superficies cuya rugosidad esté entre la figura 3b y 3e se ilustra en las figuras 3c y 3d. En superficies reales, que han sido trabajadas, la altura de las crestas puede variar, dependiendo del método de producción, desde $0.05 \mu\text{m}$ hasta $50 \mu\text{m}$, mientras que el espaciamiento entre éstas es del orden de $0.5 \mu\text{m}$ a 5mm ⁵.

5.2.2. Medida de la Rugosidad

La rugosidad de las superficies se ha descrito en la siguiente forma:

1. La altura máxima de una cresta a un valle, R_t (figura 5)
2. La línea central media, (1 cm.) o R_a y la raíz media cuadrática, R_s .
3. La curva de apoyo.

Figura 4. Pendientes de las asperezas de una superficie erosionada



Como lo muestra la figura 3, superficies con diversos grados de rugosidad pueden tener el mismo valor R_t , así que la medición de la altura entre cresta y valle no describe totalmente una superficie. Es importante tener una estimación de la longitud de onda y

⁵ Sarkar. A.D. Desgaste de Metales. México D.F: Limusa; 1999. p. 27-45

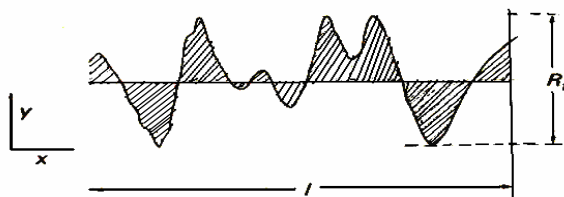
especificar el espaciamiento entre asperezas, para lo que se debe determinar el número de crestas en una determinada longitud. También puede citarse la distancia media de crestas a valles, ésta se conoce como la “Altura de diez puntos”, R_z , que es la media aritmética de las alturas de las cinco crestas más altas y un número igual de los valles más profundos. Un método común para expresar la altura promedio de las ondulaciones superficiales es establecer R_a o R_s . En los Estados Unidos de Norteamérica se prefiere la raíz cuadrática media, mientras que en la Gran Bretaña se prefiere el valor 1 cm.

Tómese y como la coordenada de altura y x como coordenada horizontal (figura 5), para una longitud l .

$$R_a \approx \frac{1}{l} \int_0^l |y| dx \quad (5)$$

De acuerdo a la figura 5 la altura promedio de las crestas se obtiene sumando las áreas sombreadas y dividiendo entre l . Las áreas se miden fácilmente con un planímetro.

Figura 5. Asperezas superficiales. R_t = altura máxima entre crestas y valles.



El valor de la raíz cuadrática media esta dado por la siguiente relación:

$$R_s \approx \left(\frac{1}{l} \int_0^l y^2 dx \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

5.3. CARACTERÍSTICAS DE LOS ACEROS TRATADOS EN EL PRESENTE TRABAJO.

5.3.1. Acero para Herramientas Böhler K110

Propiedades

Este acero es estable dimensionalmente, alto carbono, alto cromo (12%). Particularmente apropiado para endurecimiento al aire. Buena tenacidad.

Aplicaciones

Herramientas de corte de alto desempeño (moldes y punzonado), herramientas para vaciado y punzonado, herramientas para trabajar madera, cuchillas de corte de precisión, dados para trefilar, matrices para estirado y extrusión en frío, herramientas de presión, para la industria farmacéutica y cerámica, herramientas fijas para múltiples rodillos, instrumentos de medición, pequeños moldes para la industria del plástico, donde la excelente resistencia al desgaste es requerida.

Composición química. (Valores aproximados en %)

Tabla 1 Composición química del acero Böhler K110

C	Si	Mn	Cr	Mo	V
1,55	0,25	0,35	11,80	0,80	0,95

Propiedades físicas

Tabla 2 Propiedades físicas del acero Böhler K110

Densidad	20°C.	7.7	g/cm^3
Conductividad térmica	20°C.	20.0	$W/(m \cdot k)$
Resistencia eléctrica específica	20°C.	0.65	$\Omega mm^2/m$
Módulo de elasticidad	20°C.	210×10^3	N/mm^2
Calor específico	20°C.	460	$J/(Kg \cdot K)$

Tratamiento térmico

- **Recocido de ablandamiento:** 800–850°C., enfriamiento levemente controlado en horno a una velocidad de 10–20°C./h; bajando hasta aproximadamente 600°C., para un posterior enfriamiento en aire. Dureza después de un recocido de ablandamiento; 235 HB, máximo.
- **Relevo de tensiones:** 650–700°C., enfriamiento lento en el horno; intentando disminuir tensiones por maquinado intensivo, o en un laminado complejo. Después del calentamiento, detener en atmósfera neutra entre 1 a 2 horas.
- **Temple:** 1020–1040°C., si son chapas complejas se templean al aire; chapas simples en aire agitado, aceite o baño de sales (220–250°C. o 500–550°C.). El tiempo de permanencia después de igualar la temperatura, 15 a 30 minutos aproximadamente. Dureza obtenida de 63–65 HRC.

- **Revenido:** Calentamiento lento a temperatura de revenido inmediatamente después del temple. Tiempo en el horno: una hora por cada 20 mm. de espesor de la pieza, pero mínimo 2 horas, enfriamiento en aire.

5.3.2. Acero para Herramientas Böhler K340

Propiedades

Acero para trabajos en frío, auto templable, con buena estabilidad dimensional, de endurecimiento secundario con elevada tenacidad en grandes esfuerzos de compresión y elevada resistencia al desgaste. Muy buena estabilidad al revenido, muy adecuado para electroerosión. Excelente para nitrurar en baño, gas y plasma, muy indicado para revestimientos de PVD (Deposición Física en Fase Vapor).

Se puede temprar al vacío, gracias al tipo de aleación, los carburos son más finos y su distribución más uniforme que en los aceros al 12% de Cr. Así se obtiene una mayor tenacidad y disminuye el riesgo de aparición de grietas en la electroerosión.

Aplicaciones

- Herramientas para corte y troquelado, como por ej. matrices y punzones
- Herramientas para deformación en frío, como por ej. herramientas para estirado, embutido, extrusión, herramientas para acuñar, herramientas para laminado de roscas.
- Herramientas para hacer roscas por mecanizado.
- Herramientas de medición.

Composición química. (Valores aproximados en %)

Tabla 3 Composición química del acero Böhler K340

C	Si	Mn	Cr	Mo	V	+ aleantes especiales
1,10	0,90	0,40	8,30	2,10	0,50	Al (1.10) - Nb (0.13)

Propiedades físicas

Tabla 4 Propiedades físicas del acero Böhler K340

Densidad	20°C.	7.68	Kg/dm^3
Conductividad térmica	20°C.	20.0	$W/(m \cdot k)$
Resistencia eléctrica específica	20°C.	0.64	$\Omega mm^2/m$
Módulo de elasticidad	20°C.	211×10^3	N/mm^2
Calor específico	20°C.	460	$J/(Kg \cdot K)$

Tratamiento térmico

Recocido de ablandamiento:

800 – 850°C. Enfriamiento lento y controlado en el horno, 10-20°C./h, hasta 600°C. aprox., enfriamiento posterior, al aire. Dureza después del recocido de ablandamiento: máx. 235 HB.

Relevo de tensiones:

Aprox. 650°C. Enfriamiento lento en el horno. Para reducir la tensión después de un extenso arranque de virutas o en caso de herramientas de configuración complicada.

Tiempo de permanencia después del calentamiento a fondo: 1 - 2 horas en atmósfera neutra.

Temple:

1040 - 1080°C. / aceite, baño de sal, aire comprimido, aire.

Tiempo de permanencia después del calentamiento a fondo: 15 - 30 minutos.

Dureza obtenible: 61 - 63 HRC.

Revenido:

Calentamiento lento a temperatura de revenido inmediatamente después del temple.

Tiempo de permanencia en el horno: una hora por cada 20 mm. de espesor de la herramienta, pero por lo menos dos horas y enfriamiento al aire.

5.3.3. Acero para Herramientas Böhler K190PM

Propiedades

Acero para trabajo en frío, con distribución uniforme de carburos, carburos finos, composición química uniforme a lo largo de toda la sección transversal y longitudinal, propiedades uniformes, propiedades prácticamente isotrópicas por su homogeneidad y por estar libre de segregaciones, excelente tenacidad, altísima resistencia al desgaste, rectificado óptimo también en caso de grabados profundos en el centro de la herramienta, con buena estabilidad dimensional y uniforme en tratamientos térmicos, alta seguridad en el temple contra sobrecalentamiento y exceso de tiempo de permanencia, templable al vacío, óptimo para la electroerosión, gran facilidad de pulido, facilidad para troquelado en frío tras un recocido especial, alta resistencia a la presión. Excelente para recubrimientos con materiales duros, por ejemplo PVD, CVD.

Aplicaciones

- Herramientas para corte (matrices, punzones), cuchillas de cizallar para material de poco espesor.
- Herramientas de conformación en frío, como por ej. herramientas de extrusión (en frío y caliente), embutición y embutición profunda, estampado/troquelado, herramientas para laminado, roscado y laminadores de bastidores de múltiples rodillos, mandriles para laminación en frío con paso peregrino, matrices para martillar en frío.
- Herramientas para arranque de viruta, como herramientas para trabajar la madera y herramientas de virutaje para aplicaciones especiales.
- Herramientas para materiales plásticos, como cilindros y sinfines, alimentadores para extrusión, insertos en moldes, boquillas de inyección y válvulas de reflujo.
- Herramientas para desgaste, como herramientas de prensar para la industria cerámica y farmacéutica, herramientas para sinterizar.

Composición química. (Valores aproximados en %)

Tabla 5 Composición química del acero Böhler K190

C	Si	Mn	Cr	Mo	V
2,30	0,40	0,40	12,50	1,10	4,00

Propiedades físicas

Tabla 6 Propiedades físicas del acero Böhler K190

Densidad	20°C.	7.60	Kg/dm^3
Conductividad térmica	20°C.	21.5	$W/(m \cdot k)$
Resistencia eléctrica específica	20°C.	0.59	$\Omega mm^2/m$
Módulo de elasticidad	20°C.	-	N/mm^2
Calor específico	20°C.	460	$J/(Kg \cdot K)$

Tratamiento térmico

Recocido de ablandamiento:

800 – 850°C. en atmósfera neutra, Enfriamiento lento regulado en el horno, 10-20°C./h, hasta 600°C. aprox., enfriamiento posterior, al aire.

Dureza después del recocido de ablandamiento: máx. 260 HB.

Relevo de tensiones:

650 a 700°C. tras calentamiento a fondo manteniendo constante la temperatura en atmósfera neutra durante 1 a 2 horas / enfriamiento lento en el horno.

Temple:

1050 - 1150°C. / aceite, baño caliente (220-250°C. o 500-550°C.), aire o gas, en atmósfera neutra, debe enfriarse con cierta rapidez. Mantener constante la temperatura

tras el calentamiento total durante 20 a 30 min. El tiempo de mantenimiento depende del tamaño de la pieza y de los parámetros del horno. Se recomienda temple en vacío. Para obtener alta tenacidad y para piezas complejas se recomienda templar a temperaturas de austenización más bajas que para el temple recomendado. Para obtener alta resistencia al desgaste se recomienda templar a partir de la temperatura superior de austenización.

Dureza obtenible: 62 - 67 HRC.

Revenido:

Calentamiento lento a temperatura de revenido inmediatamente después del temple, el tiempo de permanencia en el horno es: una hora por cada 20 mm. de espesor de la herramienta, pero por lo menos dos horas/enfriamiento al aire. Es aconsejable realizar un doble revenido⁶.

5.4. EFECTO DE LOS ELEMENTOS DE ALEACIÓN

Los aceros aleados no sólo poseen propiedades físicas más convenientes, sino que también permiten una mayor amplitud en el proceso de tratamiento térmico. Los efectos principales de los elementos de aleación más comunes en los aceros especiales, se mencionan a continuación:

5.4.1. Cromo

Los efectos más significativos del cromo en los aceros para herramientas son:

- Se introducen dos nuevos carburos al acero, Cr_7C_3 y $Cr_{23}C_6$, donde ambos presentan una muy buena solubilidad con el hierro.
- Permite la formación de la austenita.

⁶ Böhler. Manual Interactivo 2.0; 2003

- Promueve la estabilidad de la ferrita, cuando se presenta en cantidades mayores al 12%, fija un mínimo contenido de carbono bajo el cual no se puede obtener una estructura austenítica, completamente endurecida.

5.4.2. Molibdeno

Se especifica en muchos de los aceros aleados para ingeniería, debido a los siguientes efectos benéficos:

El molibdeno tiene, con el manganeso y el cromo, un mayor efecto sobre la templabilidad por unidad añadida que cualquier otro elemento comúnmente usado.

Como el molibdeno es un elemento no oxidable que da una gran medida de la templabilidad del acero, es útil donde se desee un control preciso de la templabilidad.

Los aceros que contienen molibdeno son menos susceptibles a la fragilidad de revenido.

Aparte de esto en los aceros para trabajado en frío, forman carburos los cuales precipitan para dar un endurecimiento secundario, lo que mejora la resistencia al desgaste.

5.4.3. Vanadio

Se usa en los aceros para herramientas, para refinar el grano y mejorar el balance en las propiedades mecánicas. El vanadio es un fuerte desoxidante y promueve un tamaño fino de grano, también aumenta la tenacidad del acero

La templabilidad en los aceros con medio carbono es aumentada con un efecto mínimo en el tamaño de grano con adiciones de vanadio de aproximadamente 0.04 a 0.05%; por encima de este contenido, la templabilidad disminuye con las temperaturas de

temple normales, debido a la formación de carburos insolubles. Sin embargo, la templabilidad puede aumentarse con mayores contenidos de vanadio aumentando las temperaturas de austenización.

Al igual que el molibdeno interviene en forma de carburos en el endurecimiento secundario lo que da como resultado una mejora significativa en la resistencia al desgaste.

5.4.4. Manganeseo

El manganeso se agrega a todos los aceros como agente de desoxidación y desulfuración, pero si el contenido de manganeso es superior a 1%, el acero se clasifica como un acero aleado al manganeso. Reduce el intervalo crítico de temperatura de formación de la austenita.

El manganeso aparece prácticamente en todos los aceros, debido, principalmente, a que se añade como elemento de adición para contra resta la perniciosa influencia del azufre, que siempre suelen contener los aceros cuando se encuentran en estado líquido en los hornos durante el proceso de fabricación. El manganeso actúa también como desoxidante y evita, en parte, que en la solidificación del acero se desprendan gases que den lugar a la formación de porosidades perjudiciales en el material.

Este se suele usar también como elemento de aleación. Al aumentar de 0,6 a 1,6% aproximadamente el porcentaje de manganeso en los aceros, se aumenta ligeramente su resistencia, se mejora su templabilidad, siendo interesante destacar que el manganeso es un elemento de aleación relativamente barato.

5.4.5. Silicio

Este elemento se agrega como desoxidante a todos los aceros, este es más energético que el manganeso. Cuando se adiciona a aceros de muy baja cantidad de carbono, produce un material frágil con baja pérdida por histéresis y alta permeabilidad magnética. El uso principal del silicio, junto con otros elementos de aleación, como manganeso, cromo y vanadio, para estabilizar la ferrita.

Las adiciones de silicio se hacen durante la fabricación, suelen ser relativamente pequeñas y variables (0,2- 0,35% de Si).

5.4.6. Aluminio

El aluminio se emplea como elemento de aleación en los aceros de nitruración, que suelen contener 1% aproximadamente de aluminio. También se usa en algunos aceros resistentes al calor. El aluminio es un elemento desoxidante muy energético y es frecuente añadir 300 gr por tonelada de acero para desoxidarlo y afinar el grano.

5.4.7. Niobio

El contenido en niobio alrededor de 0.10% en los aceros de trabajado en frío, juega una parte muy importante (micro-aleaciones) en la formación de carburos estables durante el tratamiento térmico, puesto que él inhibe el crecimiento del grano de austenita y resulta en una estructura de grano fino que mejora las propiedades de tenacidad. La adición de 0.10% de niobio a un acero de media aleación que es usado para laminado en frío (composición estimada 0.8% C, 2% Cr, 0.5% Mo y 0.2% V) resulta en una mejora de la dureza, y una reducción de la austenita retenida y así proporcionar un mejor comportamiento comparado al grado no micro-aleado.

5.5. Los Carburos

Los carburos poseen una dureza y resistencia al desgaste elevada, incluso a elevadas temperaturas. Actualmente, en los aceros se buscan altos contenidos de carburos sobre todo si estos aceros van a ser utilizados para corte, conformado de metales, la minería y componentes susceptibles de padecer un desgaste excesivo.

El carburo está constituido por una parte no metálica y una metálica. La parte no metálica es la que soporta las cargas a las cuales se somete el material, mientras que la parte metálica, por el contrario, aporta tenacidad al conjunto.

Entre los parámetros microestructurales de los carburos se encuentran:

- *Fracción en volumen de la fase metálica:* Al aumentar la fracción en volumen de la fase metálica, como se trata de un material mucho más dúctil que el carburo de la fase cerámica, aumentará la tenacidad del material, disminuyendo a la vez su dureza.
- *Tamaño de partícula del carburo:* Se trata de un parámetro relevante, ya que condiciona de forma muy importante las propiedades del carburo, de manera contraria a los efectos producidos por el contenido de la parte metálica del material: un tamaño de partícula pequeña dará más dureza al metal, pero también disminuirá su tenacidad.
- *Contigüidad (c):* Se define como la fracción de área específica superficial de carburo compartida por partículas de la misma fase. Es una medida de la conectividad entre las partículas de carburo. La medición de este parámetro se hace linealmente a partir de microfotografías del material. Así, una fase completamente coherente posee un factor de contigüidad de 1, mientras que una fase con granos aislados entre ellos dará un factor de contigüidad igual a 0.

Las propiedades más importantes de los carburos son:

- *Resistencia a la ruptura transversal:* Debido a su extrema dureza, este tipo de materiales no responde bien frente a esfuerzos de tensión, de modo que para determinar su resistencia mecánica se utiliza el ensayo de ruptura transversal.
- *Dureza:* Aumentando el contenido en la fase metálica de estos compuestos, así como el tamaño de las partículas de carburo, se reduce la dureza, pero se mejora la resistencia al impacto mecánico. Este es un resultado esperado, puesto que la dureza del metal es menor que la del carburo, por lo tanto al añadir más contenido de metal, la dureza del compuesto disminuirá.
- *Resistencia al desgaste abrasivo:* Está directamente relacionada con la dureza del compuesto, de modo que cuanto menor sea el contenido de metal en el compuesto y las partículas de carburo sean más finas, más resistente al desgaste abrasivo será el compuesto.
- *Resistencia al impacto:* Se incrementa cuanto mayor es el contenido en la fase metálica y cuanto mayor es el tamaño de la partícula. El mismo efecto se observa con la resistencia al choque térmico.
- *Resistencia a la corrosión:* El componente cerámico (carburo) no se ve afectado por un medio corrosivo, pero la fase ligada sí se ve afectada, dejando expuestos a la corrosión los granos angulares de carburo. Para aumentar esta resistencia a la corrosión se debería disminuir el contenido de la parte metálica, así como el tamaño de la partícula de carburo, de modo que menos metal estaría expuesto al medio corrosivo.

Uno o más de los siguientes seis tipos de carburos pueden presentarse en los aceros para herramientas:

- M_3C , se presenta casi siempre como un carburo rico en hierro con estructura ortorrómbica de cementita, también se presenta el M_3C pero de manera muy esporádica de tungsteno, vanadio o molibdeno, junto con cantidades moderadamente bajas de cromo. Sin embargo, puede presentarse en forma de carburos complejos en este caso el manganeso puede ser alto. El metal M, puede ser hierro, manganeso, o cromo con muy poco tungsteno, molibdeno o vanadio.
- Cr_7C_3 , presenta una estructura hexagonal. Esto está generalmente confinado a aceros de medio a alto cromo con moderadas adiciones de otros elementos aleantes. En estos aceros al cromo, el carburo solo se disuelve parcialmente, permitiendo un exceso de partículas duras en la estructura para lograr una buena resistencia al desgaste abrasivo en el acero.
- $Cr_{23}C_6$, con estructura cúbica centrada en las caras. Este tiene una buena capacidad para formar carburos complejos con el hierro aunque muy mala para la formación de estos con el tungsteno y el molibdeno. Cuando suficiente tungsteno o molibdeno están presentes en este carburo, el cromo puede ser totalmente reemplazado por el hierro para formar carburos con aproximadamente las siguientes fórmulas, $Fe_{21}W_2C_6$ o $Fe_{21}Mo_2C_6$.
- M_6C , este carburo los metales más comunes en su formación son el tungsteno o molibdeno, presentando una estructura cúbica centrada en las caras, con un rango de estabilidad aproximado correspondiente a las fórmulas Fe_4W_2C - Fe_3W_3C (Fe_4Mo_2C - Fe_3Mo_3C). Este carburo puede también contener moderadas cantidades de Cr, V, y Co. El M_6C permite un exceso de partículas de carburos duros en la estructura, proporcionándole al acero un aumento en la resistencia al desgaste.
- M_2C solo presenta carburos de tungsteno o molibdeno con una estructura hexagonal correspondiente al W_2C o Mo_2C . Este carburo presenta una buena solubilidad para el cromo pero disuelve relativamente poco hierro. El M_2C no se encuentra en aceros recocidos. Este carburo se presenta solo después de un tratamiento térmico de temple y revenido cerca al punto donde ocurre el endurecimiento secundario, un fenómeno del cual el M_2C puede ser responsable.

- MC, es un carburo principalmente de vanadio con estructura cúbica centrada en las caras tipo NaCl. El Ti, Cb, Ta, y Zr también forman este tipo de carburos. Debido a la fuerte tendencia de formar carburos de estos elementos, el MC aparece consistentemente en aceros con un contenido moderadamente alto de vanadio, sin tener en cuenta las demás adiciones de elementos aleantes. La mayoría de los restos de MC como partículas en exceso en la estructura endurecida imparten una buena resistencia al desgaste abrasivo excepcional al acero. Las pequeñas cantidades de MC que están disueltas precipitan en el revenido, como partículas muy finas y parecen ser las responsables del endurecimiento secundario observado en los aceros con vanadio⁷.

⁷ Roberts G, Cary R. Tool Steel. 4 ed. United State of America: ASM; 1980. p. 183-226

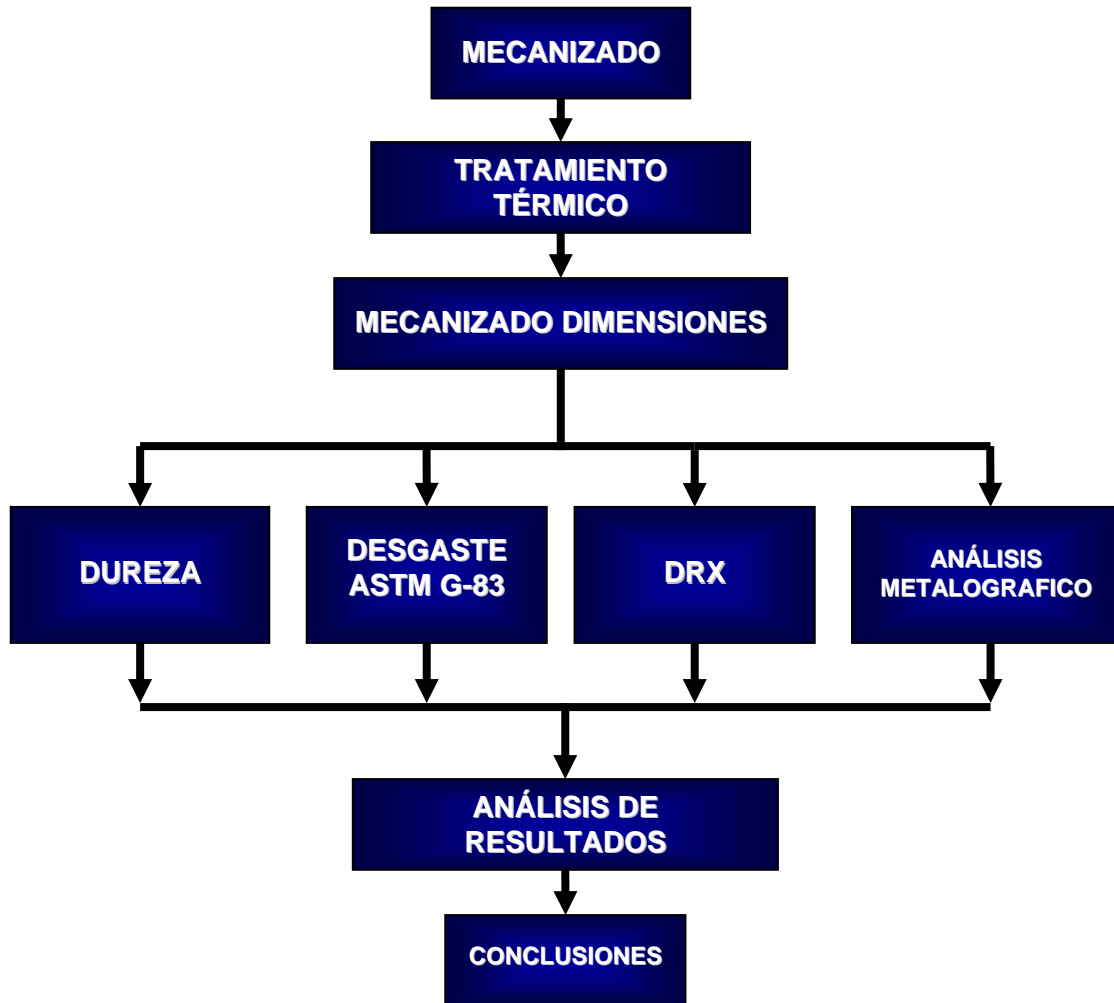
6. ESTADO DEL ARTE

Si bien los estudios y trabajos realizados a los aceros para herramientas de trabajado en frío son amplios, tales como son los realizados para el AISI D2, AISI D6, entre otros, dichos aceros son comunes en el medio industrial, sin embargo ellos se ven limitados por no cumplir con las elevadas propiedades mecánicas requeridas en determinados sectores industriales; por tal razón, Böhler-Uddeholm se ha preocupado por satisfacer estas necesidades y así crear aceros para herramientas especiales como son los aceros Böhler K110, K340 y K190PM, con el único fin de facilitar, mejorar y enfocar a cada uno de los aceros para que cumpla una aplicación específica y así su desempeño no se vea entorpecido con una inadecuada selección del material, sino que por el contrario su desempeño cumpla las más altas exigencias del mercado mundial en los aceros grado herramienta. En consecuencia, los estudios y avances realizados de los aceros para herramientas ya mencionados, en cuanto a su fabricación, composición, tratamientos térmicos, etc., son hechos a nivel interno de industrias Böhler-Uddeholm, y es allí donde se encuentra gran parte de su referencia.

Las últimas investigaciones realizadas en el campo de acción de los aceros para herramientas de trabajado en frío apuntan a la caracterización de los recubrimientos duros; que los señores K. Taube y K. Bewilogua, han definido brevemente. Además los señores Arup Gangopadhyay, Gary Barber y Han Zhao, desarrollaron una investigación en herramientas de corte donde gracias a la acción externa de una corriente eléctrica, el desgaste en estas se reduce.

7. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Figura 6. Metodología experimental



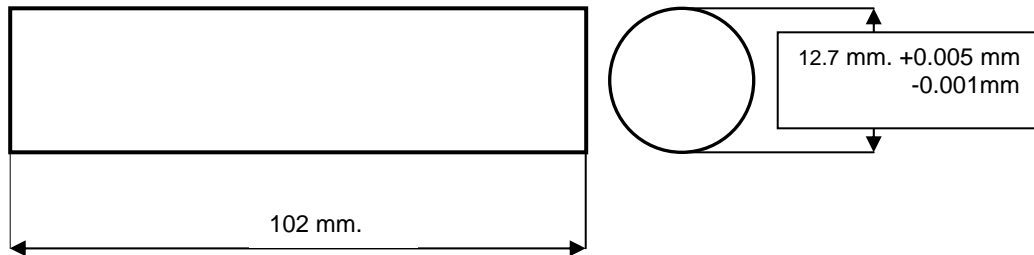
1. Mecanizado de la probeta.

1.1. Selección por muestreo de los aceros Böhler K110, K340, K190 PM, en los diferentes lotes ubicados dentro de las instalaciones de la empresa Aceros Böhler De Colombia S.A .

1.2. Corte del metal a partir de retazos, en piezas con las dimensiones adecuadas para mecanizar.

- 1.3. Mecanizado de la piezas hasta las dimensiones exigidas por la norma Figura 7.
2. Desarrollo del tratamiento térmico
 - 2.1. Temple de la probetas a 1050°C en aire agitado.
 - 2.2. Revenido de las probetas a 600, 500, 400, 300, 200°C.
3. Análisis metalográfico
 - 3.1. Pulido grueso de las probetas en papel esmeril N° 80, 150, 220, 280, 400, 600
 - 3.2. Pulido fino de las probetas en paño grueso y alumina.
 - 3.3. Pulido fino de las probetas en paño fino y alumina.
 - 3.4. Ataque químico de las probetas con Nital .
 - 3.5. Observación y registro de la microestructura por medio del analizador de imágenes.
4. Ensayo de dureza
 - 4.1. Tomas de dureza Vickers.
 - 4.2. Tomas de dureza Rockwell C.
5. Ensayo de desgaste
 - 5.1. Rectificado de las probetas hasta alcanzar la rugosidad y las dimensiones recomendadas por la norma ASTM G83.
 - 5.2. Desarrollo del ensayo por medio del procedimiento descrito en la norma ASTM G83.
6. Ensayo de DRX.
7. Análisis de resultados.
8. Conclusiones.

Figura 7. Probeta típica del Ensayo de desgaste en la máquina de cilindros cruzados según norma ASTM G 83-96



7.1. PROTOCOLO DE MANEJO EN EL ESTADO ACTUAL DE LA MÁQUINA DE CILINDROS CRUZADOS

La maquina de cilindro cruzados se encuentra normalizada, por medio de la norma ASTM G83 – 96, la cual describe los siguientes procedimientos.

Tabla 7. Procedimiento para los ensayos de desgaste adhesivo según norma ASTM G83 – 96

Procedimiento	Fuerza aplicada	Revoluciones	Velocidad Rev./min.	Tiempo (min.)
A	7.26 Kgf.	80 000	400	200
B	7.26 Kgf.	40 000	400	100
C	7.26 Kgf.	10 000	100	100

Figura 8. Máquina de cilindros cruzados, toma frontal, para el ensayo de desgaste adhesivo.

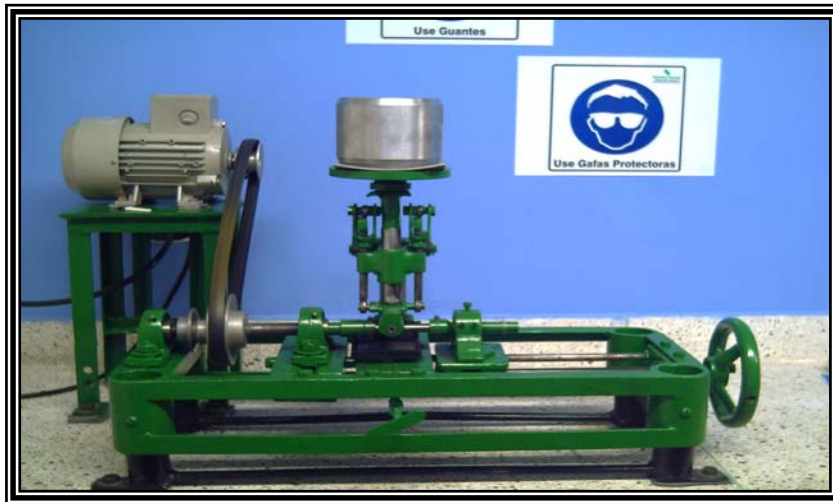
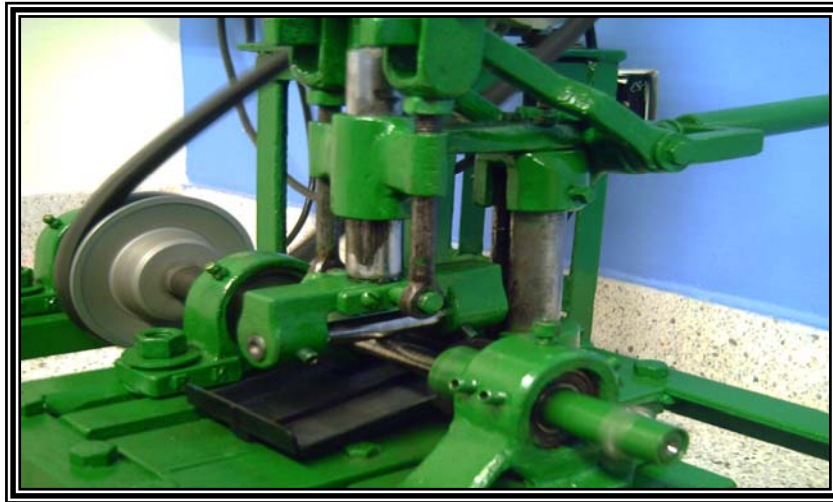


Figura 9. Máquina de cilindros cruzados para el ensayo de desgaste adhesivo., donde se puede observar el variador.



Figura 10. Montaje de las probetas en la maquina de cilindros cruzados



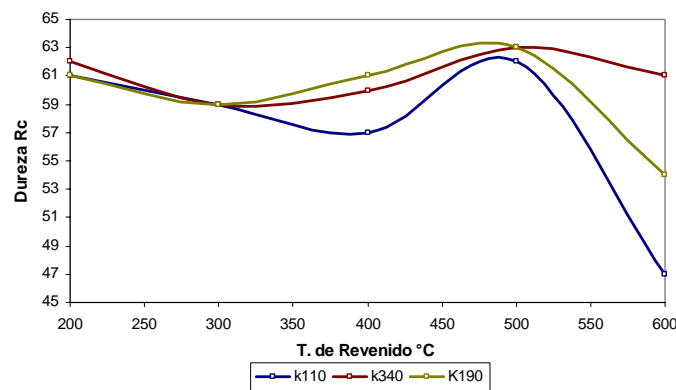
1. Limpiar, secar, y desmagnetizar las probetas antes de pesarlas, ya que la superficie de estas debe estar libre de residuos, grasa y humedad.
2. Pesar la probetas, con una precisión cercana a los 0.0001 g.
3. colocar una probeta sobre el portaprobeta dinámico, es importante que al girar la probeta a la velocidad de ensayo, esta mantenga la concéntrica, especialmente en el lugar donde se formará la huella.
4. Colocar la otra probeta sobre el portaprobeta estático y luego situarla sobre la probeta dinámica, asegurándose que la carga presionada sobre esta corresponde a la exigida por la norma (7.26Kgf).
5. Encender la máquina, poner a rodar la probeta dinámica al número de revoluciones estipulado en la norma (100 o 400 Rev./min.).
6. Cuando el número de revoluciones deseado haya sido alcanzado, levantar la probeta estática sobre la dinámica.
7. retirar las probetas y limpiarlas de los residuos de desgaste
8. Volver a pesar las probetas con una precisión cercana a los 0.0001 g.

8. RESULTADOS

Todos los ensayos de desgaste adhesivo en la máquina de cilindros cruzados que fueron realizados, se hicieron entre los mismos aceros, o sea, K110 con K110, K340 con K340 y K190 con K190 y a la misma temperatura de revenido.

8.1. DIAGRAMAS DE REVENIDO

Figura 11 Diagrama de revenido para los aceros Böehler K110, K340, K190.



En la grafica anterior se muestra la relación existente entre la dureza Rocwell C y las diferentes temperaturas de revenido.

8.2. DIAGRAMAS DESGASTE VS TIEMPO

Figura 12. Ensayo realizado con una carga 12.26 Kgf, 100 min. y 800 RPM

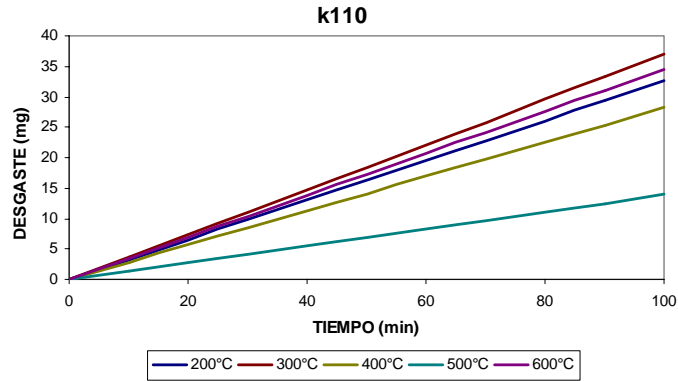


Tabla 8 Valor de linealización para cada temperatura de revenido

Temperatura de revenido	R ²
200	0.9943
300	0.9932
400	0.998
500	0.997
600	0.9928

Figura 13. Ensayo realizado con una carga 12.26 Kgf , 100 min. y 800 RPM

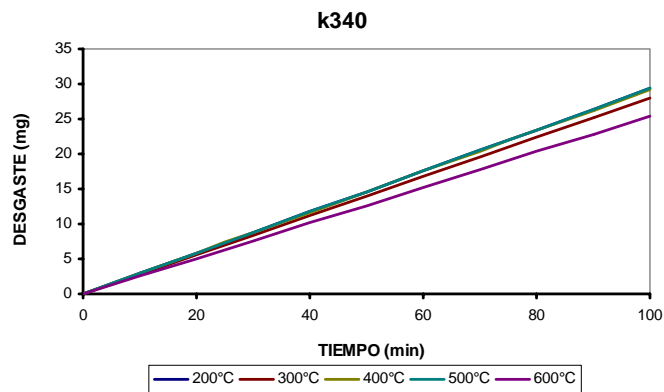


Tabla 9 Valor de linealización para cada temperatura de revenido

Temperatura de revenido	R ²
200	0.9978
300	0.9968
400	0.9988
500	0.9774
600	0.996

Figura 14. Ensayo realizado con una carga 12.26 Kgf, 100 min. y 800 RPM

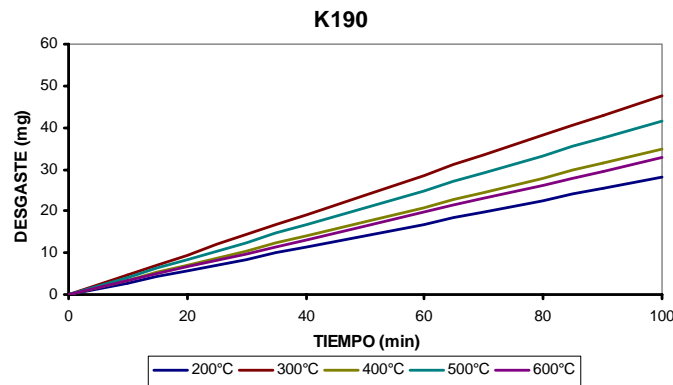


Tabla 10 Valor de linealización para cada temperatura de revenido

Temperatura de revenido	R ²
200	0.9918
300	0.9957
400	0.9966
500	0.9961
600	0.9985

En las figuras 12, 13 y 14 se muestran los diferentes perfiles de desgaste producidos en los tres aceros utilizados a diferentes temperaturas de revenido, después de los ensayos realizados en la máquina. Estos se realizaron bajo las siguientes condiciones, severas: a 12.26 Kgf, 100 minutos y 800 RPM, las menos severas se realizaron a 7.26

Kgf, 200 minutos y 400 RPM, ambas condiciones se mantuvieron a una temperatura de 30°C. y a la humedad relativa de 40%.

8.3. DIAGRAMAS DESGASTE VS TEMPERATURA DE REVENIDO

Figura 15. Ensayo realizado con una carga 12.26 Kgf, 800 RPM y 100 min.

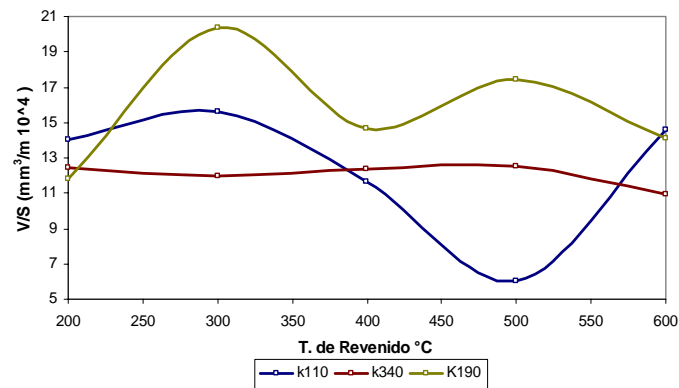
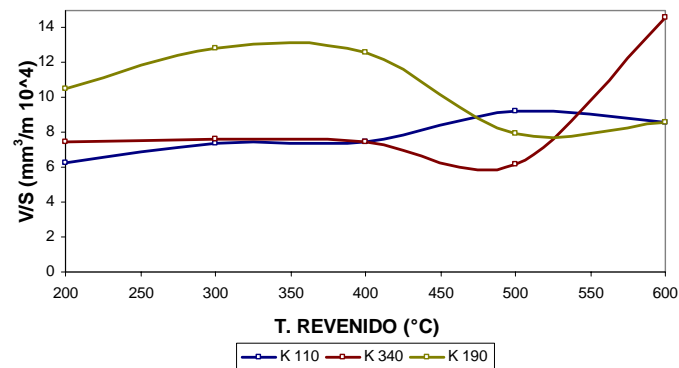


Figura 16. Ensayo realizado con una carga 7.26 Kgf, 400 RPM y 200 min.



En las figuras 15 y 16 se muestra una correlación entre la constante de desgaste (V/S) y la temperatura de revenido para cada acero utilizado.

8.4. DIAGRAMAS DESGASTE VS DUREZA

Figura 17. Ensayo realizado con una carga 12.26 Kgf, 800 RPM y 100 min.

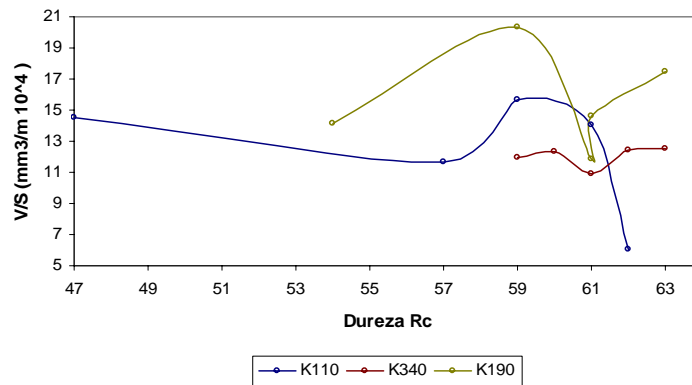
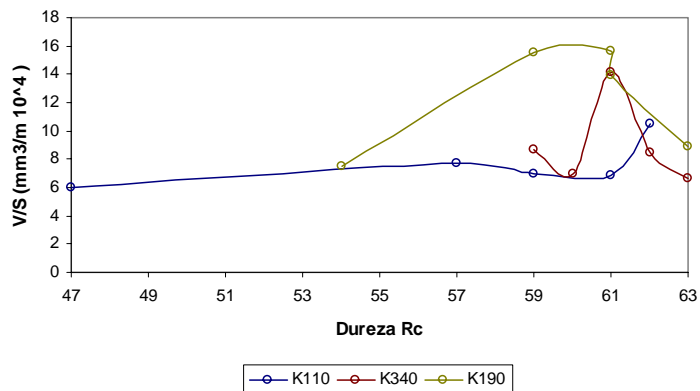


Figura 18. Ensayo realizado con una carga 7.26 Kgf, 400 RPM y 200 min.

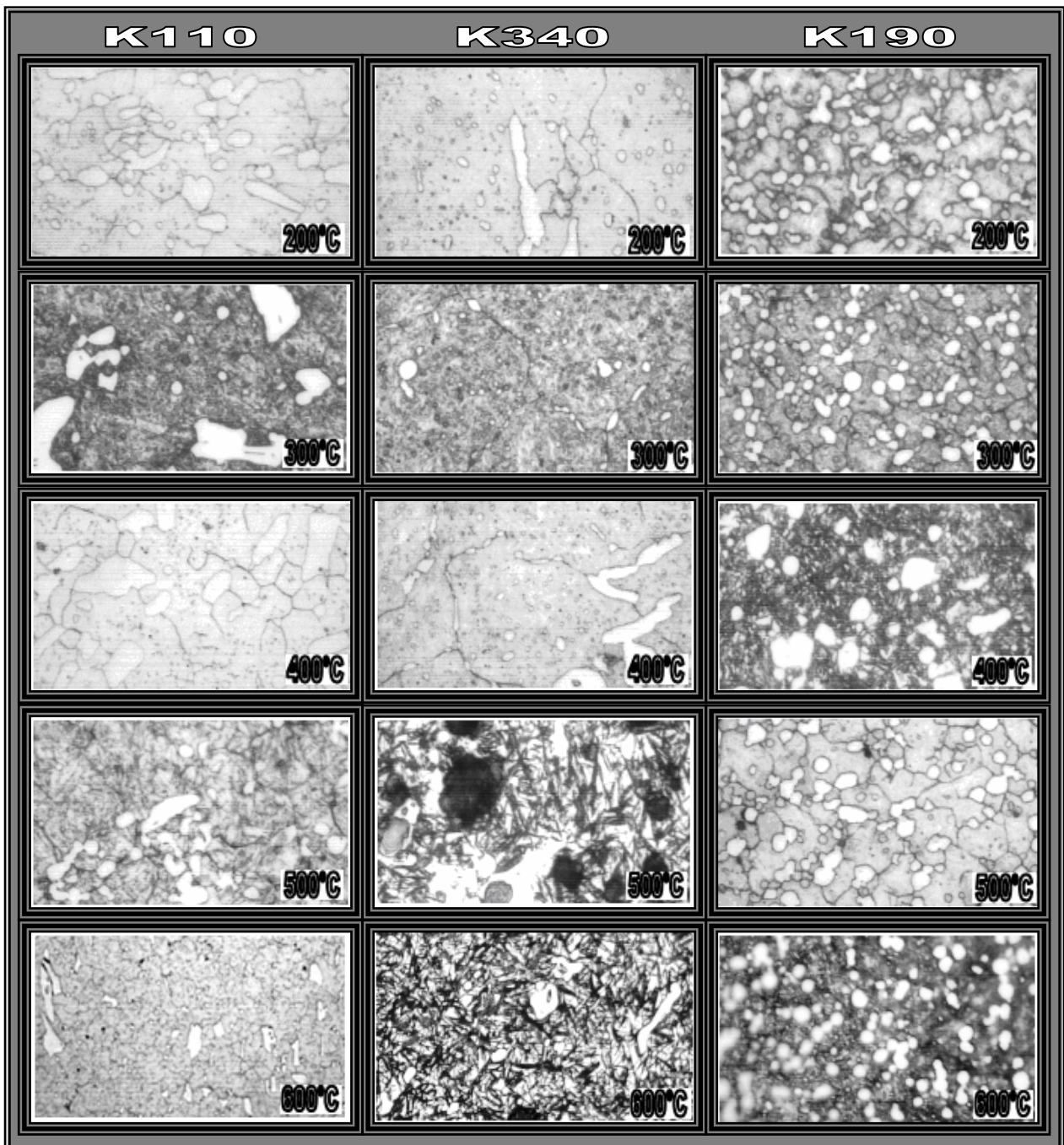


En las figuras 17 y 18, se presenta la relación existente entre la velocidad de desgaste y la dureza de los aceros a diferentes temperaturas de revenido.

8.5. METALOGRAFÍAS

En la figura 19 se observa que los tres aceros presentan una matriz martensítica y en los tratados a menos de 500°C. se presenta bainita.

Figura 19. Micrografías de los tres aceros utilizados a diferentes temperaturas de revenido; atacadas con nital 5% y 1000x.



Los tres aceros presentan carburos, siendo el K190 el único que los tiene distribuidos uniformemente y son prácticamente esféricos, mientras que el K110 son más grandes y menos esféricos y el K340 presenta carburos alargados.

8.6. RUGOSIDAD

La rugosidad fué tomada con el rugosímetro que se encuentra en el grupo de investigación en corrosión y se tomo en Ra

Figura 20. Huella en las probetas

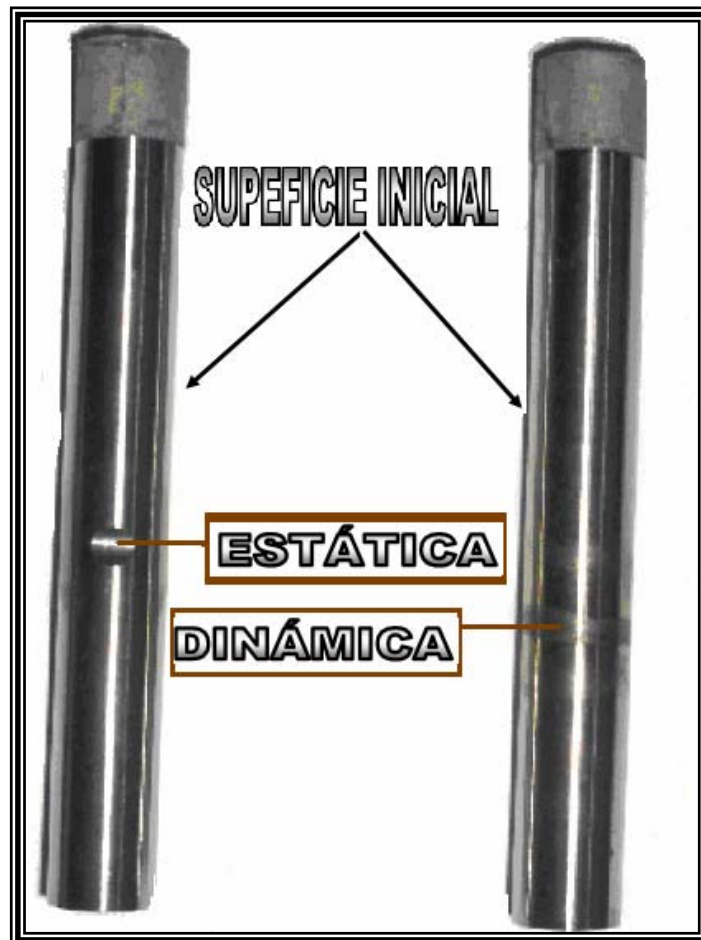


Figura 21. Superficies al inicio y al final del ensayo de desgaste, T de revenido 500°C.

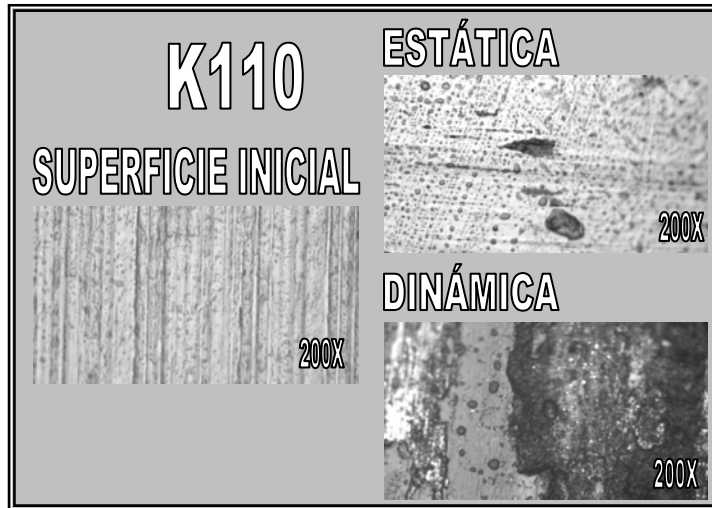


Tabla 11 Rugosidad del acero Böhler K110 dada en micrómetros

T. REVENIDO	ESTÁTICA	DINÁMICA
200	0.36	1.24
300	0.33	0.34
400	0.22	0.16
500	0.67	0.8
600	0.4	0.55

Figura 22. Superficies al inicio y al final del ensayo de desgaste, T de revenido 500°C.



Tabla 12 Rugosidad del acero Böhler K340 dada en micrómetros

T. REVENIDO	ESTÁTICA	DINÁMICA
200	0.55	0.53
300	0.65	0.31
400	0.38	0.51
500	0.65	0.72
600	5.10	5.35

Figura 23. Superficies al inicio y al final del ensayo de desgaste, T de revenido 300°C.



Tabla 13 Rugosidad del acero Böhler K190 dada en micrómetros

T. REVENIDO	ESTÁTICA	DINÁMICA
200	0.28	1.95
300	1.93	0.62
400	3.75	3.15
500	3.04	0.93
600	0.3	0.48

Con las figuras 21, 22 y 23 se observa como fue el desgaste en los aceros observando características del desgaste adhesivo, como es el desprendimiento de partículas y adhesión de éstas entre las superficies en contacto. En cuanto a las tablas 11, 12 y 13, representan las rugosidades de los aceros a diferentes temperaturas de revenido,

pudiendo observar como para el K110 y el K340, tienen casi todos sus datos según norma al contrario del K190, donde muestra una rugosidad alta.

8.7. DRX CUALITATIVO

8.7.1. DRX PROBETAS

Tabla 14. DRX de la probeta K110

FASE		No. DE TARJETA PDF-2	NOMBRE
CRISTALINOS	Cr_3Mo	65-4140	Molibdeno Cromo
	Cr	85-1336	Cromo
	Fe	65-4140	Hierro
	(Fe,Cr)	41-1466	Cromo Hierro
	CrC	665-896	Carburo de Cromo
	$\text{CFe}_{2.5}$	36-1248	Carburo de Hierro
	$\text{Fe}_{0.3}\text{Mn}_{27}\text{C}$	20-522	Carburo Hierro Manganeso

Tabla 15. DRX de la probeta K340

FASE		No. DE TARJETA PDF-2	NOMBRE
CRISTALINOS	Cr	6-694	Cromo
	Fe	87-721	Hierro
	$\text{Cr}_2\text{Fe}_{14}\text{C}$	89-7245	Carburo Hierro Cromo
	Cr_7C_3	89-7244	Carburo de Cromo
	AlFe_3	50-955	Hierro Aluminio
	V_8C_7	73-394	Carburo de Vanadio

Tabla 16. DRX de la probeta K190

FASE		No. DE TARJETA PDF-2	NOMBRE
CRISTALINOS	CV	65-8818	Carburo de Vanadio
	CrMo	65-9000	Molibdeno Cromo
	VCr	65-68199	Vanadio Cromo
	Cr	89-4055	Cromo
	Fe	85-1410	Hierro
	Cr ₇ C ₃	36-1482	Carburo de Cromo
	C _{0.055} Fe _{1.945}	44-1290	Carburo de Hierro
	Fe _{0.3} Mn ₂₇ C	20-522	Carburo Hierro Manganeso

8.7.2. DRX LIMADURAS**Tabla 17.** DRX de las limaduras del K110

FASE		No. DE TARJETA PDF-2	NOMBRE
CRISTALINOS	Cr	85-1336	Cromo
	Fe ₃ O ₄	75-449	Magnetita
	Fe _{2.887} O ₄	86-1335	Oxido de Hierro
	Cr ₃ O	72-528	Oxido de Cromo
	Cr _{0.003} Fe _{0.97}	65-4607	Hierro Cromo

Tabla 18. DRX de las limaduras del K340

FASE		No. DE TARJETA PDF-2	NOMBRE
CRISTALINOS	Cr	6-694	Cromo
	Fe ₂ O ₃	87-721	Hematita
	Fe	89-7245	Hierro
	FeOCr ₂ O ₃	89-7244	Cromita
	NbO _{0.76}	50-955	Oxido de Niobio
	Cr ₃ O	73-394	Oxido de Cromo

Tabla 19. DRX de las limaduras K190

FASE		No. DE TARJETA PDF-2	NOMBRE
CRISTALINOS	Cr	89-4055	Cromo
	Fe ₂ O ₃	85-599	Hematita
	Fe ₃ O ₄	75-449	Magnetita
	FeCr ₂ O ₄	89-2618	Cromita

Los resultados de difracción de rayos x presentados en las tablas 14 a 19 y cuyos difractogramas se encuentran en el anexo C. Se pudo observar que se presentan en las probetas los carburos de interés y en las limaduras óxidos que se forman en el proceso.

9. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la Figura 11 se observa, que los aceros adquieren un notable endurecimiento secundario alrededor de los 500°C., esto se produce por la combinación de dos procesos:

1. La austenita retenida después del temple se convierte en martensita durante el revenido.
2. A la precipitación y dispersión fina de carburos, pero no son todos los carburos los que están involucrados en la dureza secundaria, solo los carburos de Mo, V, W, son los que intervienen en esta dureza secundaria. Para este caso solo se tienen en cuenta los dos primeros, siendo el Vanadio el principal responsable.

En las Figuras 12, 13, y 14, se puede observar un comportamiento lineal de desgaste en cada una de las curvas correspondientes a cada temperatura de revenido, este comportamiento está de acuerdo a la segunda fase de la curva ideal de desgaste – estado estable –, la razón por la cual no se observa la fase inicial es porque ésta ocurre muy rápido, presentándose casi durante el primer minuto. La última fase no se observa puesto que el material no alcanza a sufrir un desgaste considerable. La linealidad en las curvas implica que la velocidad de desgaste que se presenta en el material es constante, esto asegura la acción predominante de un mecanismo de desgaste adhesivo. Cuando se trabajó bajo condiciones menos severas el comportamiento de las curvas fue similar. Para tener un mejor entendimiento sobre estos resultados se recomienda observar el anexo B, donde se presentan las tablas de pérdida de peso para cada uno de los materiales trabajados.

Las Figuras 15 y 16, presentan la correlación entre el desgaste y la temperatura de revenido para los tres aceros, siendo las condiciones de la figura 15 más severas. Este cambio en las condiciones estuvo basado en un aumento en la carga y en las

revoluciones, éste último se pudo realizar por el variador agregado a la máquina de cilindros cruzados. Para saber su funcionamiento se da una breve explicación en el anexo D.

En la figura 15 se observa que para el acero Böhler K110 bajo estas condiciones, la correlación se presenta como la función inversa a la relación dada entre la dureza y la temperatura de revenido (Figura 11), lo que confirma un comportamiento para este acero dado por la ley lineal de desgaste o ecuación de Archard para el desgaste adhesivo. Es decir, el desgaste en el acero a cargas y distancias de deslizamientos iguales, solo va depender de su presión de flujo (Dureza Vickers).

En la figura 16 bajo condiciones menos severas (carga 7.26 Kgf, 400 RPM y 200 min), la resistencia al desgaste de este acero se comporta de forma casi constante, que es un resultado no esperado, debido a que las condiciones, aunque fueron menos severas, su tiempo de ensayo fue más prolongado, permitiendo que el material estuviera en mayor contacto con el medio ambiente. Debido a que, en el laboratorio se presentó humedad (40%) durante los ensayos, que permitió una formación de óxidos sobre los límites de grano; ya que bajo estas condiciones la temperatura en la superficie de contacto es menor, lo cual no favorece la formación de una capa de óxido como sí ocurre a las condiciones más severas (figura 15). De tal manera que el material al desgastarse permite el desprendimiento de carburos y principalmente los carburos del endurecimiento secundario, los cuales se presentan en los límites de grano, junto a los óxidos formados, quienes facilitan este desprendimiento, lo que explica la disminución de la resistencia al desgaste a la temperatura de revenido a 500°C.; como se observa en la figura 16.

Se observa en la figura 15 y 16 que para el acero Böhler K340 la resistencia al desgaste permanece casi constante con respecto a la temperatura de revenido, esto entre las temperaturas de 200 y 400°C., lo que indica que la resistencia al desgaste es independiente de ésta. Esto se debe a que bajo las condiciones de trabajo se favorece

la formación de una película de óxidos sobre la superficie inhibiendo parcialmente la acción directa de los carburos. La razón por la cual en la figura 15 permanece aproximadamente constante después de los 400°C., es porque en ella la película de óxidos se recupera rápidamente entre los procesos, como en las otras temperaturas de revenido y esto se debe a que las condiciones de temperatura entre las superficies son aptas para que se forme esta película y se mantenga inhibiendo la acción de los carburos, igual que en las otras temperaturas de revenido, mientras que en la figura 16 el comportamiento después de los 400°C., no es el mismo, debido a que bajo estas condiciones de trabajo, la temperatura entre las superficies es menor que las de la figura 15, lo cual conlleva a que la película formada sea más delgada y su recuperación más lenta, permitiendo la acción de los carburos y aumentando la resistencia al desgaste.

Para el K190, la figura 15 muestra un comportamiento muy variable, esto es debido a que la rugosidad es alta, cuyo valor está por fuera de norma, una rugosidad alta implica la presencia de asperezas de mayor tamaño, el efecto de este tipo de asperezas sobre el desgaste puede afectar de dos formas; puede presentarse un aumento en el desgaste, si los esfuerzos son lo suficientemente grandes para romperlas o una disminución en el desgaste, si los esfuerzos no rompen las asperezas, éstas simplemente se desgastarán de una manera continua desde su cima. Si sucede de la primera forma, el tamaño de las limaduras es más grande que si sucede la segunda forma. Bajo estas condiciones de trabajo se presentaron ambos casos y esto se puede observar con los datos de rugosidad dados en la tabla 13. Por lo mencionado anteriormente, también se puede decir que hay la posibilidad que haya instantes en el ensayo en que se presente un desgaste adhesivo de tres cuerpos, que es cuando están al mismo tiempo tres superficies en contacto, en este caso, serían las dos probetas y el tercer cuerpo sería las asperezas arrancadas del acero.

En tanto que para este acero en la figura 16 muestra una coherencia en los resultados, que están de acuerdo con la ley lineal de desgaste (figura 14). Para estas condiciones

de trabajo se obtuvieron condiciones aptas de rugosidad, garantizando asperezas más uniformes y de menor tamaño.

En cuanto a la comparación de aceros se observa que para las condiciones de trabajo de la figura 15, el acero que presentó mayor resistencia al desgaste es el K110, esto debido a que en el K340 se forma una película de óxidos estable que como ya se había dicho bloquea parcialmente el efecto de los carburos lo cual no sucede con el K110. Con respecto al K190 como también se había mencionado, las asperezas de mayor tamaño hacen que el material perdido sea mayor y aumente el desgaste, lo cual tampoco se presenta en el K110.

La correlación entre el desgaste adhesivo y la dureza, se puede observar en las figuras 17 y 18 donde las condiciones de los ensayos en la figura 17 fueron 12.26 Kgf, 100 min y 800 RPM, lo que se han llamado condiciones severas, en la que se ratifica lo observado en la figura 15, que la mayor resistencia al desgaste la tiene el K110 a 500°C., lo que concuerda con la dureza de 62 Rc. Para esta misma figura el K340 presenta su mayor resistencia al desgaste a una dureza de 61 Rc., que corresponde a la temperatura de revenido de 600°C.; cabe mencionar que en este punto la rugosidad no está entre los parámetros dados por la norma lo que pudo influir en los resultados del ensayo. En cuanto al K190 en la figura 17, presenta su mayor resistencia al desgaste a una dureza de 61 Rc. que corresponde a 200°C.

Para la figura 18 (7.26 Kgf, 200 min y 400 RPM), la mayor resistencia al desgaste la presentó el K110, donde su comportamiento fue aproximadamente constante hasta la dureza de 61 Rc, después de esta dureza presenta un decrecimiento en la resistencia al desgaste, lo cual se explicó en el análisis de la figura 16. El K340 presentó su mayor resistencia en dos puntos, a durezas de 60 y 63 Rc., siendo este desgaste muy similar al del K110. Al igual que en el K340, el K190 presentó su máxima resistencia al desgaste similar al K110 pero a una dureza de 54 Rc. Estas variaciones en la

resistencia al desgaste en los aceros a diferentes durezas se debe a su microestructura, por esta razón es de suma importancia determinarla.

Para ensayos de DRX realizados, ver resultados en las tablas 14 a la 19 y sus difractogramas en el anexo C, se puede decir que aunque fueron análisis cualitativos permitió comprobar la presencia de carburos, y ya que todas las muestras no presentan la misma temperatura de revenido, también se puede decir que los aceros cuya temperatura de revenido fue de 500°C se detectaron mayor cantidades de carburos, debido al endurecimiento secundario. También se le realizó DRX a las limaduras producidas en el ensayo de desgaste detectándose altos contenidos de óxidos, los cuales no se detectaron en el estado inicial exceptuando al acero K340, el cual sí presentó unos óxidos de cromo, lo que permitió decir que esta formación de óxidos intervino directamente en el desgaste de los aceros como ya se había mencionado.

En cuanto al error estadístico que presentan los ensayos de desgaste adhesivo en la máquina de cilindros cruzados se puede decir que todos están bajo la norma G83-96 donde dice que el error debe estar por debajo del 15% para ensayos del mismo material en la misma máquina.

CONCLUSIONES

Se comprobó que los aceros estudiados tienen una muy buena resistencia al desgaste ya que la pérdida de peso del material fue baja y que en los diagramas de desgaste vs tiempo (figuras 12,13 y 14), no se observó el tercer estado (ruptura), aún trabajando bajo condiciones más severas que las estipuladas en la norma. Para las condiciones severas y menos severas se pudo observar que la mejor resistencia al desgaste la presentó el K110.

Lo anterior se ratifica con el hecho que los aceros fueron ensayados entre ellos mismos bajo lo que son unas condiciones severas, ya que estos aceros a nivel industrial son utilizados en corte, para hacer roscas por laminado de materiales de durezas muy inferiores a las de estos aceros, para trabajar en madera, troqueles, herramientas para desgaste.

Se determinó que la resistencia al desgaste tiene una relación directa con la dureza del material, para esto se deben cumplir ciertas condiciones, como son, una rugosidad por debajo de $1\ \mu\text{m}$, tal como establece la norma, ya que como se pudo observar, una alta rugosidad en los aceros disminuye su resistencia al desgaste, también una baja humedad relativa para evitar la formación de la capa de óxidos y garantizar un comportamiento adhesivo.

Se encontró que el parámetro de dureza en los aceros estudiados no es una condición suficiente para su selección cuando estos van a ser utilizados bajo condiciones de fricción, aunque la correlación con la resistencia al desgaste sea directa, como ya se había mencionado, ya que también influye la microestructura del material, sabiendo que se puede obtener durezas similares con diferentes microestructuras, pero su resistencia al desgaste es diferente.

Se obtuvo una correlación entre microestructura y dureza con respecto a la resistencia al desgaste en los aceros, donde se observó que la mayor resistencia al desgaste para los tres aceros se presenta cerca a la temperatura de revenido donde ocurre el endurecimiento secundario, mostrando la dependencia de la resistencia al desgaste a estos dos parámetros.

RECOMENDACIONES

Hacer un análisis que correlacione la rugosidad del material con respecto a la velocidad de desgaste variando las condiciones de trabajo, desde mayores hasta menores cargas.

Adaptar una celda de carga a la máquina de cilindros cruzados, que pueda registrar los pesos de las limaduras, ahorrando tiempo a la hora de determinar las curvas de Desgaste vs Tiempo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

European Space Agency. Space. 3 ed. Space Tribology Handbook. Cheshire: AEA Technology plc; 2002

STOLARSKI. T, Tribology In Machine Desing, Linacre House, Jordan Hill, Oxford: BUTTERWORTH-HEINEMANN; 2000.

SHACKELFORD, James y ALEXANDER, William, Materials Science And Engineering Handbook, 3 ed, United States Of America CRC Press; 2001.

SARKAR. A.D. Desgaste de Metales. Mexico D.F: Limusa; 1999.

MARTINEZ. P, Francisco. La Tribología. México D.F: Limusa,1997

METALS Handbook. Properties and selection of metals, 9 ed; Vol. 1. 1978

ASM Handbook. Properties and selection: Irons, Steel, and High – performance alloys. 10 ed; Vol. 1. 1990.

VAN – STRAHLEN CASALINS, Jesús David. Evaluación de la Resistencia al Desgaste Adhesivo de Materiales por Medio de la Norma ASTM G83-96. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2004.

BÁEZ PIMIENTO, Sandro, Evaluación del Desgaste por Fricción de Algunos Metales Ferrosos y no Ferrosos, con una Máquina de Cilindros Cruzados, Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2002.

NORMA ASTM G83-96, Standard Test Method for Wear Testing with a Crossed-Cylinder Apparatus.

NORMA ASTM E18-03, Standard Test Method for Rockwell Hardness and Rockwell Hardness of Metallic Materials.

Böhler, Manual interactivo versión 2.0., 2003

G. Robers y R. Cary. Tool Steel. 4 ed. United State of America: ASM; 1980.

F. FINKIN, Eugene. Adhesive Wear: a General Review of the State of Experimental Knowledge and Theory. Materials in Engineering Applications, Vol 1, Abril 1979.

BOURITHIS, L. Comparison of Wear of Tool Steel AISI D2 and O1 with the Same Hardness. Tribology International 39 (2006) 479-489.

FONTALVO G.A. Microstructural Aspects Determining the Adhesive Wear of Tool Steel. Wear (2005).

KOSHY, P., High Speed and Milling of Hardened AISI D2 Tool Steel (~58 HRC). Journal of Materials Processing Technology 127 (2002) 266-273.

CHOU, Y. Kevin. Tool Wear Mechanism in Continuous Cutting of Hardened Tool Steel. Wear 212 (1997) 59-65.

B. Gary, Z. Han y G. Arup, Tool Wear Reduction Through an Externally Applied Electric Current. Wear (2005).

SCHERGE, M. Fundamental Wear Mechanism of Metals. Wear 255 (2003) 395-400.

ANEXOS

ANEXO A. PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS COMO LO EXIGE LA NORMA ASTM G83-96

TIPO DE APARATO	CILINDROS CRUZADOS			
TIPO DE MOVIMIENTO	DELIZAMIENTO SIMPLE			
TIPO DE LUBRICACIÓN	SIN LUBRICACIÓN			
DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL	ACERO PARA HERRAMIENTAS DE TRABAJO EN FRÍO K110 (600 °C.)			
CARGA	7.26 Kg.			
VELOCIDAD	400 RPM			
TIEMPO	200 min.			
DESGASTE K110 (600 °C.)				
Ensayo No	Probeta Estática		Probeta Dinámica	Desgaste Total
	Pérdida de Peso mg.	Diámetro huella mm.	Pérdida de Peso mg.	Pérdida de peso mg.
1	7.7	3.4	11	18.7
2	7	3.275	13.8	20.8
3	8.9	3.35	13.6	22.5
4	7.2	3.5	10.5	17.7
5	8.8	3.375	12.8	21.6
\bar{x}	7.92	3.38	12.34	20.26
R	1.9	0.125	3.3	4.8
d2	2.326	2.236	2.326	2.326
S	0.81681	0.0537375	1.41867	2.06352
V	0.103132576	0.015898669	0.114965154	0.101851925
%V	10.31325758	1.589866864	11.4965154	10.1851925

TIPO DE APARATO	CILINDROS CRUZADOS			
TIPO DE MOVIMIENTO	DELIZAMIENTO SIMPLE			
TIPO DE LUBRICACIÓN	SIN LUBRICACIÓN			
DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL	ACERO PARA HERRAMIENTAS DE TRABAJO EN FRÍO K110 (500 °C.)			
CARGA	7.26 Kg.			
VELOCIDAD	400 RPM			
TIEMPO	200 min.			
DESGASTE K110 (500 °C.)				
Ensayo No	Probeta Estática		Probeta Dinámica	Desgaste Total
	Pérdida de Peso mg.	Diámetro huella mm.	Pérdida de Peso mg.	Pérdida de peso mg.
1	11.2	3.85	9.2	20.4
2	12.6	3.95	10.9	23.5
3	13.4	4.05	7.8	21.2
4	10.7	3.725	10.5	21.2
5	10.6	3.85	9.6	20.2
\bar{x}	11.7	3.885	9.6	21.3
R	2.8	0.325	3.1	3.3
d2	2.326	2.236	2.326	2.326
S	1.20372	0.1397175	1.33269	1.41867
V	0.102882051	0.03596332	0.138821875	0.066604225
%V	10.28820513	3.596332046	13.8821875	6.660422535

TIPO DE APARATO	CILINDROS CRUZADOS			
TIPO DE MOVIMIENTO	DELIZAMIENTO SIMPLE			
TIPO DE LUBRICACIÓN	SIN LUBRICACIÓN			
DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL	ACERO PARA HERRAMIENTAS DE TRABAJO EN FRÍO K110 (400 °C.)			
CARGA	7.26 Kg.			
VELOCIDAD	400 RPM			
TIEMPO	200 min.			
DESGASTE K110 (400 °C.)				
Ensayo No	Probeta Estática		Probeta Dinámica	Desgaste Total
	Pérdida de Peso mg.	Diámetro huella mm.	Pérdida de Peso mg.	Pérdida de peso mg.
1	9.9	4	6	15.9
2	10.8	3.925	7.9	18.7
3	8.9	3.9	6.9	15.8
4	9.1	3.85	7.8	16.9
5	12	4.2	8.4	20.4
\bar{x}	10.14	3.975	7.4	17.54
R	3.1	0.35	2.4	3.5
d2	2.326	2.236	2.326	2.326
S	1.33269	0.150465	1.03176	1.50465
V	0.131428994	0.03785283	0.139427027	0.085783922
%V	13.14289941	3.785283019	13.9427027	8.578392246

TIPO DE APARATO	CILINDROS CRUZADOS			
TIPO DE MOVIMIENTO	DELIZAMIENTO SIMPLE			
TIPO DE LUBRICACIÓN	SIN LUBRICACIÓN			
DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL	ACERO PARA HERRAMIENTAS DE TRABAJO EN FRÍO K110 (300 °C.)			
CARGA	7.26 Kg.			
VELOCIDAD	400 RPM			
TIEMPO	200 min.			
DESGASTE K110 (300 °C.)				
Ensayo No	Probeta Estática		Probeta Dinámica	Desgaste Total
	Pérdida de Peso mg.	Diámetro huella mm.	Pérdida de Peso mg	Pérdida de peso mg.
1	8	3.425	9	17
2	9.5	3.95	9	18.5
3	10.1	3.825	7.5	17.6
4	10.1	3.75	6.7	16.8
5	10.2	3.575	7.1	17.3
\bar{x}	9.58	3.705	7.86	17.44
R	2.2	0.525	2.3	1.7
d2	2.326	2.236	2.326	2.326
S	0.94578	0.2256975	0.98877	0.73083
V	0.098724426	0.060917004	0.12579771	0.04190539
%V	9.872442589	6.091700405	12.57977099	4.190538991

TIPO DE APARATO	CILINDROS CRUZADOS			
TIPO DE MOVIMIENTO	DELIZAMIENTO SIMPLE			
TIPO DE LUBRICACIÓN	SIN LUBRICACIÓN			
DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL	ACERO PARA HERRAMIENTAS DE TRABAJO EN FRÍO K110 (200 °C.)			
CARGA	7.26 Kg.			
VELOCIDAD	400 RPM			
TIEMPO	200 min.			
DESGASTE K110 (200 °C.)				
Ensayo No	Probeta Estática		Probeta Dinámica	Desgaste Total
	Pérdida de Peso mg.	Diámetro huella mm.	Pérdida de Peso mg.	Pérdida de peso mg.
1	9.7	3.44	5.2	14.9
2	11.4	3.855	5	16.4
3	9.5	3.69	4.3	13.8
4	9	3.53	4.1	13.1
5	10.5	3.605	4.2	14.7
\bar{x}	10.02	3.624	4.56	14.58
R	2.4	0.415	1.1	3.3
d_2	2.326	2.236	2.326	2.326
S	1.03176	0.1784085	0.47289	1.41867
V	0.10297006	0.049229719	0.103703947	0.097302469
%V	10.29700599	4.922971854	10.37039474	9.730246914

TIPO DE APARATO	CILINDROS CRUZADOS			
TIPO DE MOVIMIENTO	DELIZAMIENTO SIMPLE			
TIPO DE LUBRICACIÓN	SIN LUBRICACIÓN			
DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL	ACERO PARA HERRAMIENTAS DE TRABAJO EN FRÍO K340 (600 °C.)			
CARGA	7.26 Kg.			
VELOCIDAD	400 RPM			
TIEMPO	200 min.			
DESGASTE K340 (600 °C.)				
Ensayo No	Probeta Estática		Probeta Dinámica	Desgaste Total
	Pérdida de Peso mg.	Diámetro huella mm.	Pérdida de Peso mg.	Pérdida de peso mg.
1	11.7	3.925	20.3	32
2	11.1	3.95	21.1	32.2
3	12	3.9	25.6	37.6
4	9.8	3.675	25.9	35.7
5	10.1	3.875	20.7	30.8
\bar{x}	10.94	3.865	22.72	33.66
R	2.2	0.275	5.6	6.8
d_2	2.326	2.236	2.326	2.326
S	0.94578	0.1182225	2.40744	2.92332
V	0.086451554	0.030587969	0.105961268	0.086848485
%V	8.645155393	3.058796895	10.59612676	8.684848485

TIPO DE APARATO	CILINDROS CRUZADOS			
TIPO DE MOVIMIENTO	DELIZAMIENTO SIMPLE			
TIPO DE LUBRICACIÓN	SIN LUBRICACIÓN			
DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL	ACERO PARA HERRAMIENTAS DE TRABAJO EN FRÍO K340 (500 °C.)			
CARGA	7.26 Kg.			
VELOCIDAD	400 RPM			
TIEMPO	200 min.			
DESGASTE K340 (500 °C.)				
Ensayo No	Probeta Estática		Probeta Dinámica	Desgaste Total
	Pérdida de Peso mg.	Diámetro huella mm.	Pérdida de Peso mg.	Pérdida de peso mg.
1	9.9	3.825	4.2	14.1
2	9.7	3.65	4.8	14.5
3	10.4	3.85	4.9	15.3
4	9.6	3.7	4.2	13.8
5	10.1	3.625	4.5	14.6
\bar{x}	9.94	3.73	4.52	14.46
R	0.8	0.225	0.7	1.5
d_2	2.326	2.236	2.326	2.326
S	0.34392	0.0967275	0.30093	0.64485
V	0.034599598	0.025932306	0.066577434	0.044595436
%V	3.459959759	2.593230563	6.657743363	4.459543569

TIPO DE APARATO	CILINDROS CRUZADOS			
TIPO DE MOVIMIENTO	DELIZAMIENTO SIMPLE			
TIPO DE LUBRICACIÓN	SIN LUBRICACIÓN			
DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL	ACERO PARA HERRAMIENTAS DE TRABAJO EN FRÍO K340 (400 °C.)			
CARGA	7.26 Kg.			
VELOCIDAD	400 RPM			
TIEMPO	200 min.			
DESGASTE K340 (400 °C.)				
Ensayo No	Probeta Estática		Probeta Dinámica	Desgaste Total
	Pérdida de Peso mg.	Diámetro huella mm.	Pérdida de Peso mg.	Pérdida de peso mg.
1	9.8	3.95	7.5	17.3
2	10.3	3.925	5.9	16.2
3	10.5	3.975	6.1	16.6
4	12.4	3.75	7.6	20
5	9.9	3.875	7.5	17.4
\bar{x}	10.58	3.895	6.92	17.5
R	2.6	0.225	1.7	3.8
d_2	2.326	2.236	2.326	2.326
S	1.11774	0.0967275	0.73083	1.63362
V	0.105646503	0.024833761	0.105611272	0.093349714
%V	10.56465028	2.483376123	10.56112717	9.334971429

TIPO DE APARATO	CILINDROS CRUZADOS			
TIPO DE MOVIMIENTO	DELIZAMIENTO SIMPLE			
TIPO DE LUBRICACIÓN	SIN LUBRICACIÓN			
DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL	ACERO PARA HERRAMIENTAS DE TRABAJO EN FRÍO K340 (300 °C.)			
CARGA	7.26 Kg.			
VELOCIDAD	400 RPM			
TIEMPO	200 min.			
DESGASTE K340 (300 °C.)				
Ensayo No	Probeta Estática		Probeta Dinámica	Desgaste Total
	Pérdida de Peso mg.	Diámetro huella mm.	Pérdida de Peso mg.	Pérdida de peso mg.
1	11.5	4.1	5.3	16.8
2	11.7	4.2	5.8	17.5
3	13.4	4.225	7.2	20.6
4	10.8	3.825	6.9	17.7
5	11	4.125	5.7	16.7
\bar{x}	11.68	4.095	6.18	17.86
R	2.6	0.4	1.9	3.9
d_2	2.326	2.236	2.326	2.326
S	1.11774	0.17196	0.81681	1.67661
V	0.095696918	0.041992674	0.132169903	0.09387514
%V	9.569691781	4.199267399	13.21699029	9.387513998

TIPO DE APARATO	CILINDROS CRUZADOS			
TIPO DE MOVIMIENTO	DELIZAMIENTO SIMPLE			
TIPO DE LUBRICACIÓN	SIN LUBRICACIÓN			
DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL	ACERO PARA HERRAMIENTAS DE TRABAJO EN FRÍO K340 (200 °C.)			
CARGA	7.26 Kg.			
VELOCIDAD	400 RPM			
TIEMPO	200 min.			
DESGASTE K340 (200 °C.)				
Ensayo No	Probeta Estática		Probeta Dinámica	Desgaste Total
	Pérdida de Peso mg.	Diámetro huella mm.	Pérdida de Peso mg.	Pérdida de peso mg.
1	9.09	4	8.65	17.74
2	8.92	3.725	9.04	17.96
3	7.24	3.65	9.64	16.88
4	8.72	3.75	9.28	18
5	8	3.675	9.5	17.5
\bar{x}	8.394	3.76	9.222	17.616
R	1.85	0.35	0.99	1.12
d_2	2.326	2.236	2.326	2.326
S	0.795315	0.150465	0.425601	0.481488
V	0.094748034	0.040017287	0.046150618	0.027332425
%V	9.474803431	4.001728723	4.615061809	2.733242507

TIPO DE APARATO	CILINDROS CRUZADOS			
TIPO DE MOVIMIENTO	DELIZAMIENTO SIMPLE			
TIPO DE LUBRICACIÓN	SIN LUBRICACIÓN			
DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL	ACERO PARA HERRAMIENTAS DE TRABAJO EN FRÍO K190 (600 °C.)			
CARGA	7.26 Kg.			
VELOCIDAD	400 RPM			
TIEMPO	200 min.			
DESGASTE K190 (600 °C.)				
Ensayo No	Probeta Estática		Probeta Dinámica	Desgaste Total
	Pérdida de Peso mg.	Diámetro huella mm.	Pérdida de Peso mg.	Pérdida de peso mg.
1	9.6	3.65	10.7	20.3
2	8.5	3.45	11.2	19.7
3	8.2	3.575	9.4	17.6
4	9.8	3.45	11.9	21.7
5	8.3	3.65	10.8	19.1
\bar{x}	8.88	3.555	10.8	19.68
R	1.6	0.2	2.5	4.1
d_2	2.326	2.236	2.326	2.326
S	0.68784	0.08598	1.07475	1.76259
V	0.077459459	0.024185654	0.099513889	0.0895625
%V	7.745945946	2.418565401	9.951388889	8.95625

TIPO DE APARATO	CILINDROS CRUZADOS			
TIPO DE MOVIMIENTO	DELIZAMIENTO SIMPLE			
TIPO DE LUBRICACIÓN	SIN LUBRICACIÓN			
DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL	ACERO PARA HERRAMIENTAS DE TRABAJO EN FRÍO K190 (500 °C.)			
CARGA	7.26 Kg.			
VELOCIDAD	400 RPM			
TIEMPO	200 min.			
DESGASTE K190 (500 °C.)				
Ensayo No	Probeta Estática		Probeta Dinámica	Desgaste Total
	Pérdida de Peso mg.	Diámetro huella mm.	Pérdida de Peso mg.	Pérdida de peso mg.
1	6.5	3.375	10.21	16.71
2	6.59	3.475	12.81	19.4
3	6.1	3.275	12.4	18.5
4	6.9	3.4	13.2	20.1
5	6.7	3.575	12	18.7
\bar{x}	6.558	3.42	12.124	18.682
R	0.8	0.3	2.99	3.39
d_2	2.326	2.236	2.326	2.326
S	0.34392	0.12897	1.285401	1.457361
V	0.052442818	0.037710526	0.106021198	0.078008832
%V	5.244281793	3.771052632	10.60211976	7.800883203

TIPO DE APARATO	CILINDROS CRUZADOS			
TIPO DE MOVIMIENTO	DELIZAMIENTO SIMPLE			
TIPO DE LUBRICACIÓN	SIN LUBRICACIÓN			
DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL	ACERO PARA HERRAMIENTAS DE TRABAJO EN FRÍO K190 (400 °C.)			
CARGA	7.26 Kg.			
VELOCIDAD	400 RPM			
TIEMPO	200 min.			
DESGASTE K190 (400 °C.)				
Ensayo No	Probeta Estática		Probeta Dinámica	Desgaste Total
	Pérdida de Peso mg.	Diámetro huella mm.	Pérdida de Peso mg.	Pérdida de peso mg.
1	5.6	2.85	21.2	26.8
2	6.5	3.475	24.9	31.4
3	6.3	3.425	21.6	27.9
4	5.3	2.8	26.9	32.2
5	6.3	3.4	23.1	29.4
\bar{x}	6	3.19	23.54	29.54
R	1.2	0.675	5.7	5.4
d_2	2.326	2.236	2.326	2.326
S	0.51588	0.2901825	2.45043	2.32146
V	0.08598	0.090966301	0.104096432	0.078587001
%V	8.598	9.096630094	10.40964316	7.858700068

TIPO DE APARATO	CILINDROS CRUZADOS			
TIPO DE MOVIMIENTO	DELIZAMIENTO SIMPLE			
TIPO DE LUBRICACIÓN	SIN LUBRICACIÓN			
DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL	ACERO PARA HERRAMIENTAS DE TRABAJO EN FRÍO K190 (300 °C.)			
CARGA	7.26 Kg.			
VELOCIDAD	400 RPM			
TIEMPO	200 min.			
DESGASTE K190 (300 °C.)				
Ensayo No	Probeta Estática		Probeta Dinámica	Desgaste Total
	Pérdida de Peso mg.	Diámetro huella mm.	Pérdida de Peso mg.	Pérdida de peso mg.
1	8.7	3.9	23.5	32.2
2	7.3	3.025	20.7	28
3	7	2.95	22.4	29.4
4	8.5	3.925	21.8	30.3
5	7.7	3.55	22.5	30.2
\bar{x}	7.84	3.47	22.18	30.02
R	1.7	0.9	2.8	4.2
d_2	2.326	2.236	2.326	2.326
S	0.73083	0.38691	1.20372	1.80558
V	0.093218112	0.111501441	0.054270514	0.060145903
%V	9.321811224	11.15014409	5.427051398	6.014590273

TIPO DE APARATO	CILINDROS CRUZADOS			
TIPO DE MOVIMIENTO	DELIZAMIENTO SIMPLE			
TIPO DE LUBRICACIÓN	SIN LUBRICACIÓN			
DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL	ACERO PARA HERRAMIENTAS DE TRABAJO EN FRÍO K190 (200 °C.)			
CARGA	7.26 Kg.			
VELOCIDAD	400 RPM			
TIEMPO	200 min.			
DESGASTE K190 (200 °C.)				
Ensayo No	Probeta Estática		Probeta Dinámica	Desgaste Total
	Pérdida de Peso mg.	Diámetro huella mm.	Pérdida de Peso mg.	Pérdida de peso mg.
1	5.9	3.1	17.5	23.4
2	6	2.8	17.8	23.8
3	6.5	3.6	19.1	25.6
4	6.7	3.675	19.5	26.2
5	6.2	3.575	17.9	24.1
\bar{x}	6.26	3.35	18.36	24.62
R	0.8	0.875	2	2.8
d_2	2.326	2.236	2.326	2.326
S	0.34392	0.3761625	0.8598	1.20372
V	0.054939297	0.112287313	0.046830065	0.048891958
%V	5.493929712	11.22873134	4.683006536	4.889195776

ANEXO B. REPORTE DE DATOS DE PÉRDIDA DE PESO SUFRIDA DURANTE LOS ENSAYOS

TIPO DE APARATO	CILINDROS CRUZADOS										
TIPO DE MOVIMIENTO	DELIZAMIENTO SIMPLE										
TIPO DE LUBRICACIÓN	SIN LUBRICACIÓN										
DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL	ACERO PARA HERRAMIENTAS DE TRABAJO EN FRÍO K110 (200 °C.)										
CARGA	12.26 Kg.										
VELOCIDAD	800 RPM										
TIEMPO	100 min.										
Tiempo (min.)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Pérdida de peso total (mg.)	0	3.1	5.9	9.8	13.9	16.7	19.7	22.7	25.9	29.1	32.8

TIPO DE APARATO	CILINDROS CRUZADOS										
TIPO DE MOVIMIENTO	DELIZAMIENTO SIMPLE										
TIPO DE LUBRICACIÓN	SIN LUBRICACIÓN										
DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL	ACERO PARA HERRAMIENTAS DE TRABAJO EN FRÍO K110 (300 °C.)										
CARGA	12.26 Kg.										
VELOCIDAD	800 RPM										
TIEMPO	100 min.										
Tiempo (min.)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Pérdida de peso (mg.)	0	0.6	2.2	5.2	8	11.8	15.8	20.7	23.7	27.1	31.1

TIPO DE APARATO	CILINDROS CRUZADOS										
TIPO DE MOVIMIENTO	DELIZAMIENTO SIMPLE										
TIPO DE LUBRICACIÓN	SIN LUBRICACIÓN										
DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL	ACERO PARA HERRAMIENTAS DE TRABAJO EN FRÍO K110 (400 °C.)										
CARGA	12.26 Kg.										
VELOCIDAD	800 RPM										
TIEMPO	100 min.										
Tiempo (min.)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Pérdida de peso (mg.)	0	0.7	2.4	5.1	7.5	10	13.2	16.1	19.2	21.9	24.7

TIPO DE APARATO	CILINDROS CRUZADOS										
TIPO DE MOVIMIENTO	DELIZAMIENTO SIMPLE										
TIPO DE LUBRICACIÓN	SIN LUBRICACIÓN										
DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL	ACERO PARA HERRAMIENTAS DE TRABAJO EN FRÍO K110 (500 °C.)										
CARGA	12.26 Kg.										
VELOCIDAD	800 RPM										
TIEMPO	100 min.										
Tiempo (min.)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Pérdida de peso (mg.)	0	1.9	2.6	3.3	4.2	5.5	6.4	8.2	10	11.7	13.6

TIPO DE APARATO	CILINDROS CRUZADOS										
TIPO DE MOVIMIENTO	DELIZAMIENTO SIMPLE										
TIPO DE LUBRICACIÓN	SIN LUBRICACIÓN										
DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL	ACERO PARA HERRAMIENTAS DE TRABAJO EN FRÍO K110 (600 °C.)										
CARGA	12.26 Kg.										
VELOCIDAD	800 RPM										
TIEMPO	100 min.										
Tiempo (min.)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Pérdida de peso (mg.)	0	2	3.8	6	10.3	12.7	16.2	20.6	23.3	28	30.4

TIPO DE APARATO	CILINDROS CRUZADOS										
TIPO DE MOVIMIENTO	DELIZAMIENTO SIMPLE										
TIPO DE LUBRICACIÓN	SIN LUBRICACIÓN										
DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL	ACERO PARA HERRAMIENTAS DE TRABAJO EN FRÍO K340 (200 °C.)										
CARGA	12.26 Kg.										
VELOCIDAD	800 RPM										
TIEMPO	100 min.										
Tiempo (min.)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Pérdida de peso (mg.)	0	2.5	5.4	7.5	11.7	13.4	16.1	19.3	23.5	26.1	28.1

TIPO DE APARATO	CILINDROS CRUZADOS										
TIPO DE MOVIMIENTO	DELIZAMIENTO SIMPLE										
TIPO DE LUBRICACIÓN	SIN LUBRICACIÓN										
DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL	ACERO PARA HERRAMIENTAS DE TRABAJO EN FRÍO K340 (300 °C.)										
CARGA	12.26 Kg.										
VELOCIDAD	800 RPM										
TIEMPO	100 min.										
Tiempo (min.)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Pérdida de peso (mg.)	0	2.4	5.5	8.2	11.7	14.1	17.2	20.2	23.7	25.6	27

TIPO DE APARATO	CILINDROS CRUZADOS										
TIPO DE MOVIMIENTO	DELIZAMIENTO SIMPLE										
TIPO DE LUBRICACIÓN	SIN LUBRICACIÓN										
DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL	ACERO PARA HERRAMIENTAS DE TRABAJO EN FRÍO K340 (400 °C.)										
CARGA	12.26 Kg.										
VELOCIDAD	800 RPM										
TIEMPO	100 min.										
Tiempo (min.)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Pérdida de peso (mg.)	0	5.3	9.3	12.7	15.3	18.9	21.9	24.1	27.4	29.6	33.1

TIPO DE APARATO	CILINDROS CRUZADOS										
TIPO DE MOVIMIENTO	DELIZAMIENTO SIMPLE										
TIPO DE LUBRICACIÓN	SIN LUBRICACIÓN										
DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL	ACERO PARA HERRAMIENTAS DE TRABAJO EN FRÍO K340 (500 °C.)										
CARGA	12.26 Kg.										
VELOCIDAD	800 RPM										
TIEMPO	100 min.										
Tiempo (min.)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Pérdida de peso (mg.)	0	3.1	5.8	8.3	10.5	13.7	16.2	19.5	22.8	26	28.9

TIPO DE APARATO	CILINDROS CRUZADOS										
TIPO DE MOVIMIENTO	DELIZAMIENTO SIMPLE										
TIPO DE LUBRICACIÓN	SIN LUBRICACIÓN										
DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL	ACERO PARA HERRAMIENTAS DE TRABAJO EN FRÍO K340 (600 °C.)										
CARGA	12.26 Kg.										
VELOCIDAD	800 RPM										
TIEMPO	100 min.										
Tiempo (min.)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Pérdida de peso (mg.)	0	0.9	2.8	4.8	7	9.3	12.1	14	16.7	20.1	23.4

TIPO DE APARATO	CILINDROS CRUZADOS										
TIPO DE MOVIMIENTO	DELIZAMIENTO SIMPLE										
TIPO DE LUBRICACIÓN	SIN LUBRICACIÓN										
DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL	ACERO PARA HERRAMIENTAS DE TRABAJO EN FRÍO K190 (200 °C.)										
CARGA	12.26 Kg.										
VELOCIDAD	800 RPM										
TIEMPO	100 min.										
Tiempo (min.)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Pérdida de peso (mg.)	0	2	5.2	9.2	12.5	15.6	18.5	19.6	22.8	25.8	28.9

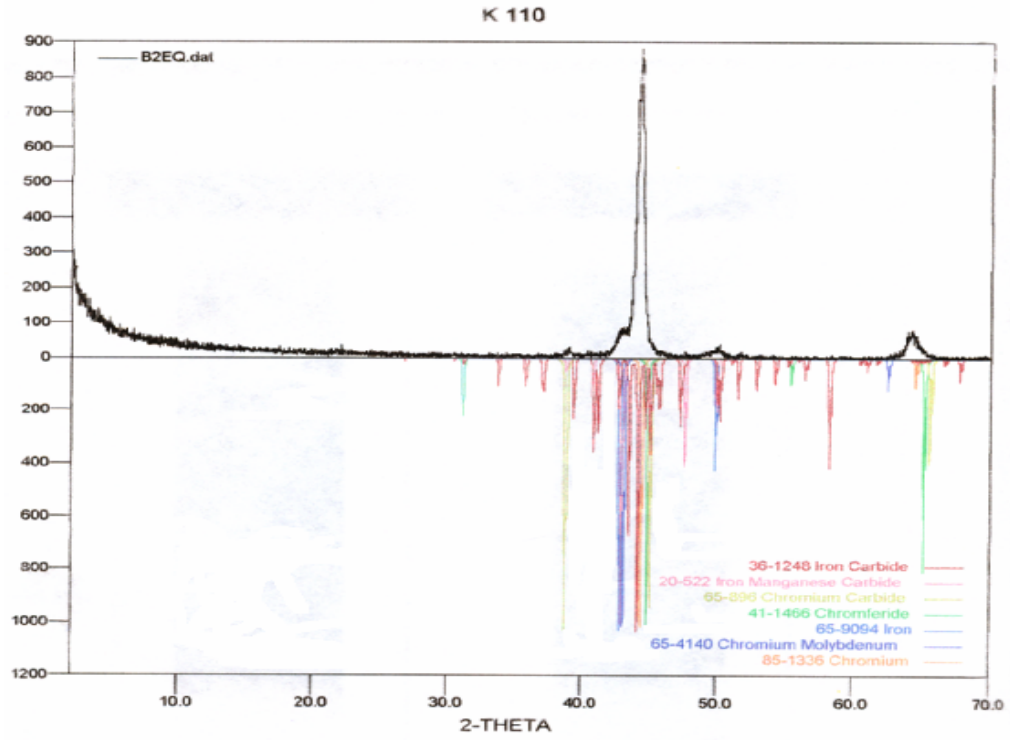
TIPO DE APARATO	CILINDROS CRUZADOS										
TIPO DE MOVIMIENTO	DELIZAMIENTO SIMPLE										
TIPO DE LUBRICACIÓN	SIN LUBRICACIÓN										
DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL	ACERO PARA HERRAMIENTAS DE TRABAJO EN FRÍO K190 (300 °C.)										
CARGA	12.26 Kg.										
VELOCIDAD	800 RPM										
TIEMPO	100 min.										
Tiempo (min.)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Pérdida de peso (mg.)	0	1.8	4.5	8.7	14.2	17.5	22	26.8	31.6	37.5	43.4

TIPO DE APARATO	CILINDROS CRUZADOS										
TIPO DE MOVIMIENTO	DELIZAMIENTO SIMPLE										
TIPO DE LUBRICACIÓN	SIN LUBRICACIÓN										
DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL	ACERO PARA HERRAMIENTAS DE TRABAJO EN FRÍO K190 (400 °C.)										
CARGA	12.26 Kg.										
VELOCIDAD	800 RPM										
TIEMPO	100 min.										
Tiempo (min.)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Pérdida de peso (mg.)	0	2.2	3.7	5.9	9.9	12.8	16.3	19.9	23.4	27	31.6

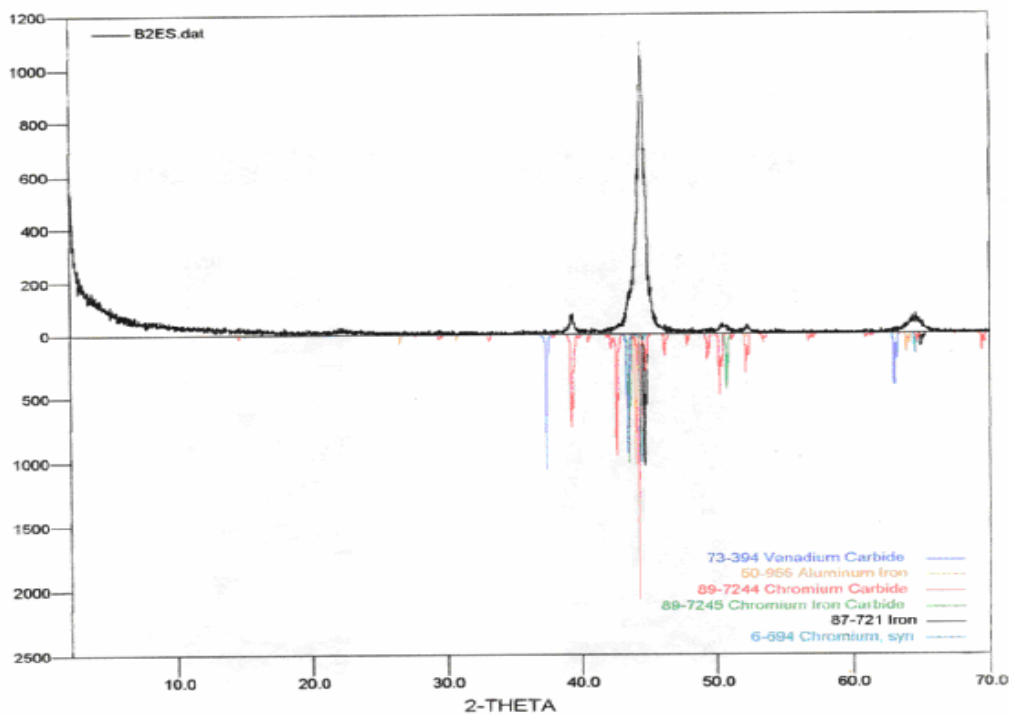
TIPO DE APARATO	CILINDROS CRUZADOS										
TIPO DE MOVIMIENTO	DELIZAMIENTO SIMPLE										
TIPO DE LUBRICACIÓN	SIN LUBRICACIÓN										
DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL	ACERO PARA HERRAMIENTAS DE TRABAJO EN FRÍO K190 (500 °C.)										
CARGA	12.26 Kg.										
VELOCIDAD	800 RPM										
TIEMPO	100 min.										
Tiempo (min.)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Pérdida de peso (mg.)	0	3.5	5.7	8.7	12	15.8	20.5	25	29.7	33.9	38

TIPO DE APARATO	CILINDROS CRUZADOS										
TIPO DE MOVIMIENTO	DELIZAMIENTO SIMPLE										
TIPO DE LUBRICACIÓN	SIN LUBRICACIÓN										
DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL	ACERO PARA HERRAMIENTAS DE TRABAJO EN FRÍO K190 (600 °C.)										
CARGA	12.26 Kg.										
VELOCIDAD	800 RPM										
TIEMPO	100 min.										
Tiempo (min.)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Pérdida de peso (mg.)	0	2	3.6	6.7	9.3	12.8	16.6	20	23.5	26.2	29.3

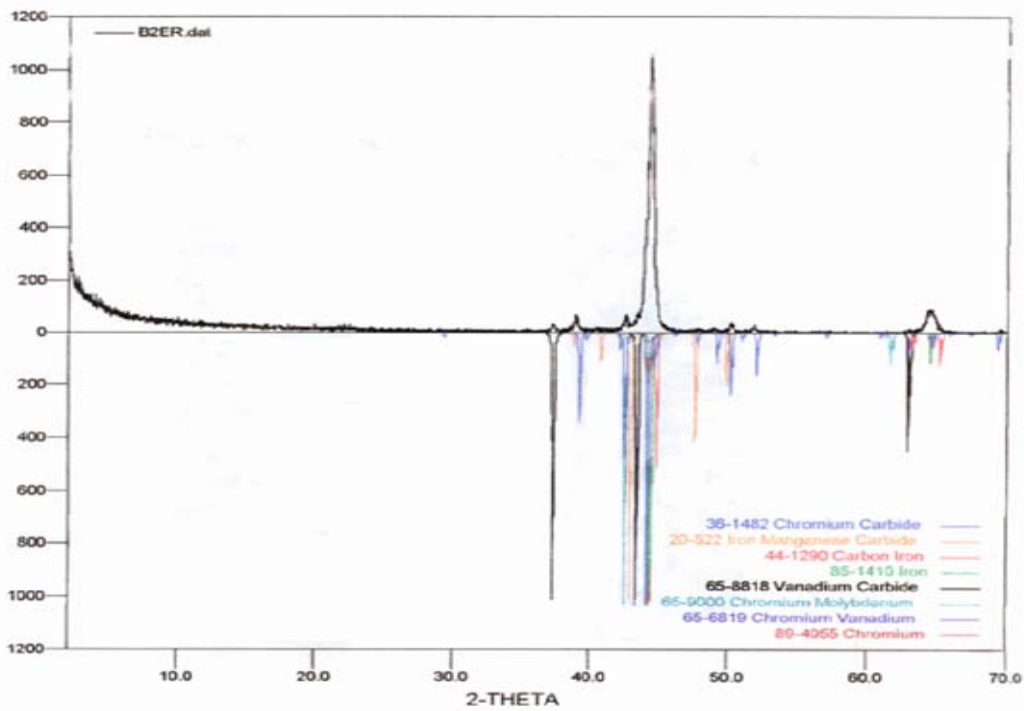
ANEXO C. DIFRACTOGRAMAS



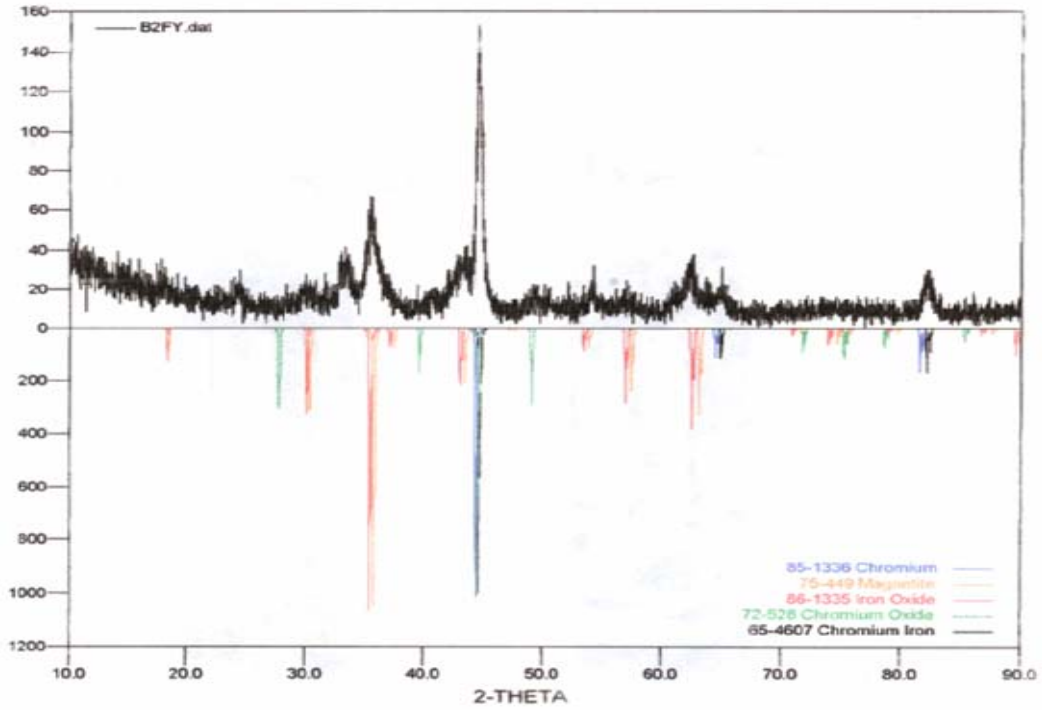
K 340



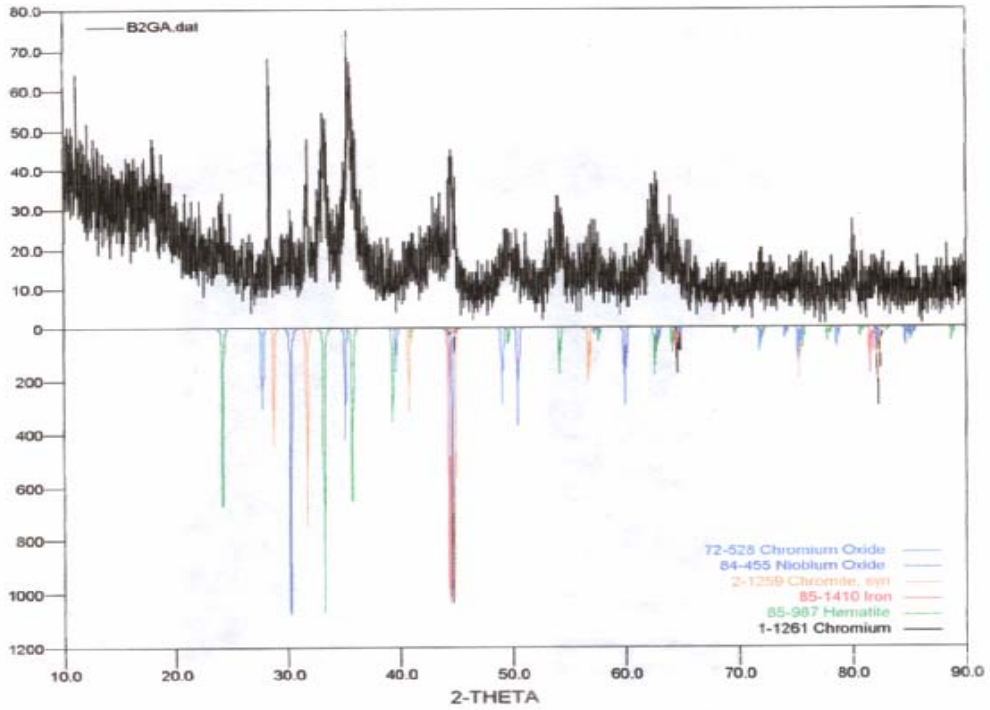
K 190



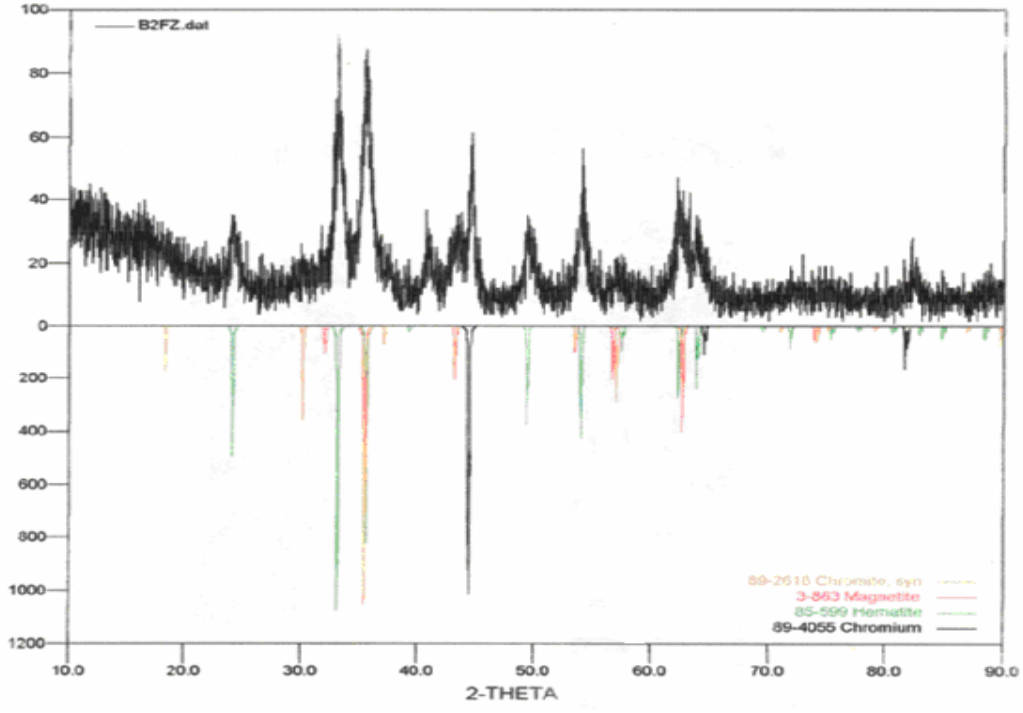
K 110



K 340



K 190



ANEXO D. PROCEDIMIENTO PARA EL CAMBIO DE VELOCIDADES EN EL VARIADOR



1. Encender el variador
2. Presionar la tecla ent, en el variador e ir al menú –set.
3. presionar la tecla ent, buscar con las flechas los submenús spd 2 y spd 4.
4. el submenú spd 2, cambia la frecuencia para alcanzar las 400 Rev./min., con las flechas cuadrar la frecuencia para alcanzar la nueva velocidad.
5. el submenú spd 4, cambia la frecuencia para alcanzar las 100 Rev./min., con las flechas cuadrar la frecuencia para alcanzar la nueva velocidad.
6. Presionar la tecla ent, después de cuadrar las frecuencias, a las velocidades deseadas.
7. Presionar la tecla esc, hasta que en pantalla aparezca rdY.
8. Con el interruptor, encender la maquina, el interruptor de 100 RPM, proporcionará la velocidad correspondiente a la frecuencia estipulada en spd4, y el interruptor de 400 RPM, proporcionará la velocidad correspondiente a la frecuencia estipulada en spd2.