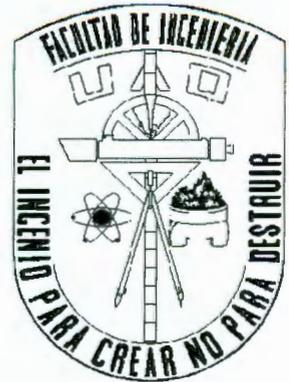




Universidad Autónoma de Querétaro  
Campus San Juan del Río

Facultad de Ingeniería  
Ingeniería Electromecánica



**Sistema de medición para determinar la microdureza  
en acero por visión artificial**

**TESIS**

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

**Ingeniero Electromecánico**

Presenta:

**Raúl Cayetano García**

Dirigido por:

**M. en C. Luis A. Morales Hernández**



C. U. 17 de agosto de 2009

**C. RAÚL CAYETANO GARCÍA**  
**Pasante de Ingeniería Electromecánica**  
Presente.

Con relación a su oficio enviado al H. Consejo Académico de la Facultad en el que solicita titularse bajo la opción de tesis individual, me permito informarle que en la sesión ordinaria del 17 de agosto del año en curso, este cuerpo colegiado acordó aceptar la opción de titulación por lo que deberá trabajar en el tema **"SISTEMA DE MEDICIÓN PARA DETERMINAR LA MICRODUREZA EN ACERO POR VISIÓN ARTIFICIAL"** bajo la dirección del M EN C. LUIS ALBERTO MORALES HERNÁNDEZ.

El contenido aprobado por el H. Consejo Académico es el siguiente:

## **1 INTRODUCCIÓN**

### 1.1 Objetivos

## **2 REVISIÓN DE LITERATURA**

### 2.1 Acero

#### 2.1.1 Propiedades mecánicas del acero

### 2.2 Clasificación del acero

### 2.3 Tratamientos térmicos para acero

#### 2.3.1 Tratamientos térmicos simples

#### 2.3.2 Tratamientos térmicos superficiales

### 2.4 Beneficios de la capa endurecida

### 2.5 Microdureza

#### 2.5.1 Microdureza Rockwell

#### 2.5.2 Microdureza Brinell

#### 2.5.3 Microdureza Vickers

### 2.6. Normas de microdureza

### 2.7 Procesamiento de imágenes aplicado a los materiales

#### 2.7.1 Filtros estadísticos

#### 2.7.2 Histograma

#### 2.7.3 Umbralización

#### 2.7.4 Morfología matemática

#### 2.7.5 Detector de bordes

No. Adq. #73833

No. Título \_\_\_\_\_

Clas. TS

620.17

C385s

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_



### 3 METODOLOGÍA

- 3.1 Sistema analizador de imágenes
  - 3.1.1 Preparación de muestra
  - 3.1.2 Obtención de imagen
  - 3.1.3 Análisis de la imagen
- 3.2 Ejemplo de prueba
  - 3.2.1 Medición en probeta patrón

### 4 RESULTADOS

- 4.1 Experimentos
  - 4.1.1 Medición Semiautomática
  - 4.1.2 Medición automática
- 4.2 Discusión de resultados

### CONCLUSIONES

### REFERENCIAS

También hago de su conocimiento las disposiciones de nuestra Facultad, en el sentido que antes del Examen profesional deberá cumplir con los requisitos de nuestra legislación y deberá imprimir el presente oficio en todos los ejemplares de su tesis.

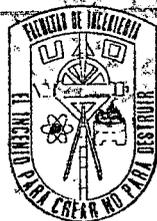
Atentamente

**"EL INGENIO PARA CREAR NO PARA DESTRUIR"**

**DR. GILBERTO HERRERA RUIZ**

Director  
c.c.p. Archivo

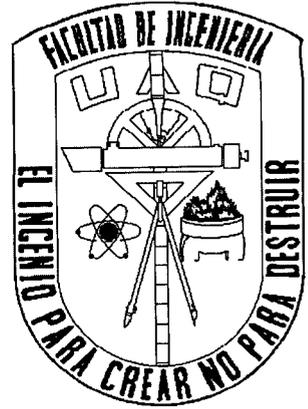
\*GHR/DHM.



DIRECCIÓN



Universidad Autónoma de Querétaro  
Campus San Juan del Río  
Facultad de Ingeniería  
Ingeniería Electromecánica



**Sistema de medición para determinar la microdureza  
en acero por visión artificial**

**TESIS**

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

**Ingeniero Electromecánico**

Presenta:

**Raúl Cayetano García**

Dirigido por:

**M. en C. Luís A. Morales Hernández**

## Resumen

Este trabajo trata del análisis de una huella dejada por el indentador hecha en el durómetro, para relacionarla con una medida de microdureza Vickers. Para llevarla a cabo se desarrolló una metodología que hace esta medición de manera automática. Se desarrolló un sistema de análisis de imágenes el cual analiza la imagen; encuentra los bordes de la huella de la indentación dejada por el indentador; después se aplica los filtros direccionales, encontrando los bordes de cada una de las aristas. Estos bordes se aproximan a una línea recta con ayuda de mínimos cuadrados. En la intersección de estas líneas se obtiene los vértices del rombo de la indentación; por último se relaciona una distancia en pixeles a una distancia en micras y con esta distancia se calcula la microdureza Vickers. Para lo cual, se siguieron las normas de ASTM. El sistema de análisis de imágenes se desarrolló en Visual C++6.0. Las imágenes fueron tomadas de una probeta patrón, la cual se encuentra en el laboratorio de Ingeniería Electromecánica, además de un engrane del cual se tenían los datos de dureza. Se realizaron dos mediciones, la primera con un durómetro Buehler que es un sistema semiautomático y después con el sistema propuesto de análisis de imágenes (sistema automático). Los resultados muestran una gran similitud, ya que el porcentaje de variación entre las dos mediciones es bajo, lo cual valida el sistema de análisis de imágenes para medir la microdureza en el acero.

## **Agradecimientos**

Agradezco a M. en C. Luis A. Morales Hernández por su colaboración y apoyo en la realización de esta tesis.

Agradezco el apoyo recibido del proyecto FOMIX-QRO-106065 por la beca otorgada para la realización de esta tesis, así como al programa FIFI 2009 por el equipamiento suministrado para la realización esta tesis.

## Índice general.

Agradecimientos .....	iii
Índice de ecuaciones .....	ix
Índice de figuras.....	vi
Índice de tablas .....	xi
Índice general.....	iv
Resumen .....	ii
Capítulo 1.....	1
1 Introducción .....	1
1.1. Objetivos.....	2
Capítulo 2.....	3
2 Revisión de literatura.....	3
2.1. Acero .....	3
2.1.1. Propiedades mecánicas del acero.....	3
2.2. Clasificación del acero .....	4
2.3. Tratamientos térmicos para acero .....	5
2.3.1. Tratamientos térmicos simples. ....	7
2.3.2. Tratamientos superficiales.....	10
2.4. Beneficios de la capa endurecida.....	12
2.5. Dureza .....	12
2.5.1. Dureza Rockwell.....	12
2.5.2. Dureza Brinell.....	14
2.5.3. Dureza Vickers .....	15
2.6. Normas de dureza.....	16
2.7. Procesamiento de imágenes aplicado a los materiales.....	16
2.7.1. Filtros estadísticos.....	17

2.7.2.	Histograma.....	18
2.7.3.	Umbralización.....	18
2.7.4.	Morfología matemática. ....	18
2.7.5.	Detector de bordes. ....	21
2.7.6.	Aproximación funcional.....	29
3	Metodología .....	34
3.1.	Sistema analizador de imágenes .....	34
3.1.1.	Preparación de la muestra.....	34
3.1.2.	Obtención de la imagen.....	37
3.1.3.	Análisis de la imagen. ....	40
3.2.	Ejemplo de prueba.....	47
3.2.1.	Medición en la probeta patrón. ....	47
Capítulo 4.....		51
4	Resultados .....	51
4.1.	Experimentos .....	51
4.1.1.	Medición semiautomática.....	51
4.1.2.	Medición automática.....	54
4.2.	Discusión de resultados.....	56
Capítulo 5.....		64
5	Conclusiones .....	64
6	Bibliografía .....	66

## Índice de figuras

Figura 2-1 Temperaturas para endurecido de metales (Askeland, 1987).....	7
Figura 2-2 Resumen esquemático de los tratamientos térmicos comunes para los aceros (a) hipoeutectoides y (b) hipereutectoides (Askeland, 2004). .....	8
Figura 2-3 Efecto del carbono y del tratamiento térmico sobre las propiedades de los aceros al carbono (Askeland, 2004). .....	9
Figura 2-4 (a) Endurecimiento superficial mediante un calentamiento localizado. (b) Solamente se calienta la superficie por encima de la temperatura $A_1$ y se temple para producir martensita (Askeland, 2004). .....	10
Figura 2-5 Carburizado de un acero de bajo carbono con el objeto de producir una superficie de alto carbono, resistente al desgaste (Askeland, 2004). .....	11
Figura 2-6 Dureza Rockwell B, F, G y E. ....	13
Figura 2-7 Dureza Rockwell A, C y D. ....	14
Figura 2-8 Dureza Brinell. ....	14
Figura 2-9 Dureza Vickers. ....	15
Figura 2-10 Concepto de primera y segunda derivada para la extracción de bordes.....	23
Figura 2-11 (a) Región de la imagen de dimensión 3x3; (b) Máscara usada para obtener $G_x$ en el punto central de la región 3x3; (c) Máscara usada para obtener $G_y$ en el mismo punto. Estas máscaras se denominan operadores de Sobel (De la Cruz, 2004). .....	25
Figura 2-12 (a) Región de la imagen de dimensión 3x3; (b) Máscara usada para obtener $G_x$ ; (c) Máscara usada para obtener $G_y$ (De la Cruz, 2004). .....	26
Figura 2-13 Máscaras de Kirsch en las 8 direcciones .....	28
Figura 2-14 Máscara inicial de Robinsón generadora de las otras 7 máscaras restantes (De la Cruz, 2004).....	28
Figura 2-15 Máscaras de Robinsón en las 8 direcciones.....	28
Figura 2-16 Extensión de los operadores de Prewitt $G_x$ y Sobel $G_y$ .....	29
Figura 2-17 Función tabular. ....	30
Figura 3-1 Diagrama de preparación de muestra.....	34
Figura 3-2 Máquina montadora de probetas.....	35
Figura 3-3 Lijas para pulir las muestras. ....	36

Figura 3-4 Maquina para pulir las muestras. ....	37
Figura 3-5 Diagrama de obtención de la imagen para el análisis .....	37
Figura 3-6 Durómetro BUEHLER.....	38
Figura 3-7 Cámara Allien acoplada al durómetro.....	39
Figura 3-8 Diagrama de flujo del software.....	40
Figura 3-9 Imagen original. ....	40
Figura 3-10 Resultado de aplicar el filtro de Robinsón. ....	41
Figura 3-11 Imagen binarizada con un umbral inferior y superior de 0 y 3 respectivamente.....	42
Figura 3-12 Imagen invertida o en negativo.....	42
Figura 3-13 Imagen dividida en cuadrantes. ....	43
Figura 3-14 Máscara direccional del primer cuadrante (a) y segundo cuadrante (b). ....	44
Figura 3-15 Máscara direccional del tercer cuadrante (c) y cuarto cuadrante (d). ....	44
Figura 3-16 Puntos de interés del cuadrante 1 .....	45
Figura 3-17 Puntos de interés del cuadrante 2.....	45
Figura 3-18 Puntos de interés del cuadrante 3.....	46
Figura 3-19 Puntos de interés del cuadrante 4.....	46
Figura 3-20 Resultado del sistema. ....	47
Figura 3-21 Ajuste del sistema. ....	48
Figura 3-22 Probeta patrón. ....	48
Figura 3-23 Ajuste del sistema. ....	49
Figura 4-1 Engrane analizado .....	52
Figura 4-2 Perfil de dureza en función de la profundidad bajo la superficie. ....	52
Figura 4-3 Representación del engrane.....	53
Figura 4-4 Perfil de microdureza. ....	53
Figura 4-5 Pruebas en el engrane con el sistema semiautomático.....	54
Figura 4-6 Resultado de la medición en escala Vickers.....	55
Figura 4-7 Pruebas en el engrane con el sistema automático. ....	56

Figura 4-8 Comparación de los resultados obtenidos en la prueba 1.....	57
Figura 4-9 Comparación de los resultados obtenidos en la prueba 2.....	58
Figura 4-10 Comparación de los resultados obtenidos en la prueba 3.....	59
Figura 4-11 Comparación de los resultados obtenidos en la prueba 4.....	60
Figura 4-12 Algoritmo del filtro detector de bordes .....	61
Figura 4-13 Algoritmo del filtro direccional .....	62
Figura 4-14 Algoritmo de mínimos cuadrados.....	63
Figura 4-15 Algoritmo final del sistema .....	63

## Índice de ecuaciones

1	Media .....	17
2	Mediana .....	18
3	Histograma .....	18
4	Umbralización .....	18
5	Dilatación .....	19
6	Erosión .....	20
7	Dilatación y Erosión .....	20
8	Dilatación y Erosión .....	21
9	Dilatación y Erosión .....	21
10	Dilatación y Erosión .....	21
11	Dilatación y Erosión .....	21
12	Dilatación y Erosión .....	21
13	Dilatación y Erosión .....	21
14	Derivadas parciales.....	24
15	Magnitud y dirección del gradiente.....	24
16	Magnitud del gradiente con valores absolutos.....	24
17	Diferencias de primer orden entre dos píxeles adyacentes.....	24
18	Valores del umbral .....	25
19	Derivadas basadas en los operadores de Sobel .....	26
20	Forma del operador Roberts.....	27
21	Forma del operador Roberts más usada.....	27
22	Ecuación de la recta.....	30
23	Forma minimizada.....	31
24	Derivadas parciales.....	31
25	Derivadas parciales.....	31
26	Sumatorias.....	31

27	Coeficientes del sistema.....	32
28	Sistema resuelto.....	32
29	Coeficientes.....	33

## Índice de tablas.

Tabla 1 Tabla de normas ASTM para medición de dureza. ....	16
Tabla 2 Ajuste del sistema. ....	50
Tabla 3 Medición en la probeta patrón. ....	51
Tabla 4 Medición semiautomática del engrane. ....	54
Tabla 5 Medición automática en la probeta patrón. ....	55
Tabla 6 Medición en el engrane con el sistema automático. ....	56
Tabla 7 Diferencia en % de la prueba 1. ....	57
Tabla 8 Diferencia en % de la prueba 2. ....	58
Tabla 9 Diferencia en % de la prueba 3. ....	59
Tabla 10 Diferencia en % de la prueba 4. ....	60

# Capítulo 1

## 1 Introducción

La medición de la microdureza es una prueba de las más empleadas en la selección y control de los metales, ya que se utilizan para verificar la calidad de los tratamientos térmicos, en la recepción de los materiales durante su inspección, en la evaluación de soldaduras y en el análisis de fallas (Smith, 1998). Entonces esta medición es apreciada en los ámbitos de producción y de control de calidad.

Para realizar esta medición se propone en esta tesis desarrollar un sistema de análisis de imágenes, mediante el cual se podrán obtener las mediciones de la microdureza de la capa endurecida en el acero.

Existen varios métodos para determinar la microdureza por resistencia a la penetración, los de mayor aplicación en la industria son: Rockwell, Brinell y Vickers. Este tipo de mediciones por el momento se llevan a cabo en la industria metalmeccánica de forma cuantitativa manual, a criterio de un observador bajo las normas ASTM para la medición de la microdureza de los metales. La norma ASTM E 384-09 verifica las máquinas para la prueba de la microdureza Rockwell y la calibración de los bloques de prueba estandarizados de la microdureza. Los indentadores de bola eran de acero duro, pero ahora se permiten bolas de tungsteno-carburo (Flinn y Trojan, 1993). Es el método más usado porque es fácil de realizarse y más exacto que otros tipos de medición. El método Rockwell mide la profundidad permanente de la muesca producida por las fuerzas preliminares y totales de la prueba, entonces se mide la distancia y se convierte a un valor de la escala Rockwell.

Por lo general, la norma ASTM E 384-09 pide que se hagan de cuatro a cinco mediciones en la pieza a medir. En la actualidad, las empresas realizan este tipo de análisis pero dependen del criterio de un observador evaluador, el cual no siempre es el más adecuado, más aún el valor de la medición depende de la experiencia del observador evaluador. Por lo tanto, antes de contratar a alguien se debe realizar una inversión en capacitación (Flinn y Trojan, 1993).

Por estas razones se propuso crear un software propio el cual además de servir como una base para futuras investigaciones, pueda ser ofrecido a una empresa del ramo metalúrgico, metal-mecánico y cualquier empresa que trabaje con estos materiales; con el objetivo de actualizar y mejorar el software para futuras aplicaciones así como mejoras del mismo.

### **1.1. Objetivos**

El objetivo principal de esta tesis es desarrollar un algoritmo en lenguaje C que a través de una imagen, mida la huella dejada por un indentador sobre un material de prueba. Sobre la imagen, se medirá el tamaño de la huella para relacionarla con la microdureza del material.

Objetivos particulares.

Implementar el acoplamiento de la cámara digital al microdurómetro Buehler. Ajustar el sistema para relacionar el número de pixeles medidos a la escala Vickers, comparando los resultados obtenidos con diferentes sistemas de medición manuales o semiautomáticos. Desarrollar los algoritmos del sistema analizador de imágenes.

# Capítulo 2

En este capítulo se estudiarán los conceptos requeridos para el entendimiento de esta tesis, como lo es el acero y sus tratamientos térmicos, su clasificación. Las diferentes pruebas para realizar la medición de la microdureza (Rockwell, Brinell, Vickers) que se refieren a un mismo principio. También como se analizará la imagen y los filtros utilizados para detectar los bordes de ésta, así como mínimos cuadrados para encontrar los vértices y sus intersecciones.

## 2 Revisión de literatura

### 2.1. Acero

El acero es una aleación de hierro y carbono que contiene otros elementos de aleación, los cuales le confieren propiedades mecánicas específicas para su utilización en la industria metalmeccánica (Askeland, 2004).

Los otros principales elementos de composición son el Cromo, Tungsteno, Magnesio, Vanadio, Cobalto, Molibdeno, Cobre, Azufre y Fósforo. Estos elementos según su porcentaje, ofrecen características específicas para determinadas aplicaciones, tales como herramientas, cuchillas y soportes.

#### 2.1.1. Propiedades mecánicas del acero.

Las características mecánicas de un material dependen tanto de su composición química como de la estructura cristalina que tenga (Shackkelford). Los tratamientos térmicos modifican esa estructura cristalina sin alterar la composición química, dando a los materiales características mecánicas concretas, mediante un proceso de calentamientos y enfriamientos sucesivos hasta conseguir la estructura cristalina deseada. Entre estas características están (Shackkelford):

Resistencia al desgaste.- Es la resistencia que ofrece un material al dejarse erosionar cuando esta en contacto de fricción con otro material.

Tenacidad.- Es la capacidad que tiene un material de absorber energía sin producir fisuras (resistencia al impacto).

Maquinabilidad.- Es la facilidad que posee un material de permitir el proceso de mecanizado por arranque de viruta.

Dureza.- Es la resistencia que ofrece un acero para dejarse penetrar. Se mide en unidades Brinell (HB), Rockwell (HR) y Vickers (HV).

## 2.2. Clasificación del acero

Muchas instituciones han desarrollado especificaciones relativas a las propiedades y composición química de las aleaciones del acero y acero al carbón, incluyendo la SAE (Sociedad de ingenieros de automoción, en inglés, *Society of Automotive Engineers*), el AISI (Instituto americano del hierro y el acero, en inglés, *American Iron and Steel Institute*) y la ASTM (Sociedad americana de pruebas en materiales, en inglés, *American Society for Testing of Materials*); así como instituciones de gobierno federal y de muchas instituciones privadas (Thornton, 1987).

Los aceros se clasifican con un sistema numérico de acuerdo con su composición química. Este sistema permite una identificación fácil del tipo o de grado de acero y también fija límites específicos a la química permisible. Tanto la SAE como la AISI tienen establecido el mismo sistema de números para los diferentes tipos de acero, excepto que los números AISI están precedidos por una letra, como sigue (Thornton, 1987):

- A.- Básica de horno abierto: aleación.
- B.- Ácida de Bessener: carbono.
- C.- Básica de horno abierto: carbono.
- D.- Ácida de horno abierto: carbono.
- E.- Horno eléctrico.

En este sistema de identificación, el primer dígito indica el tipo de acero (el elemento principal de aleación); y el segundo dígito indica el porcentaje aproximado del elemento de aleación principal. Los dos (o en algunos casos tres) últimos dígitos denotan el contenido de carbón en centésimas de un porcentaje. Por ejemplo, un acero

C1018 es un carbón simple de grado (10), con un contenido promedio de carbono de .18%, que se fabricó con el proceso básico de horno abierto. (Thornton, 1987).

Los aceros al carbono contienen hasta 2% C. Estos aceros también pueden contener otros elementos, como, por ejemplo, silicio, cobre y manganeso. Los aceros libres de carbono contiene menos de 0.005% C. Los aceros ultra bajos de carbono contienen un máximo de 0.03% C. Los aceros de bajo carbono contienen de 0.04 a 0.15% de carbono. Estos aceros de bajo carbono se utilizan para producir carrocerías automotrices y cientos de otras aplicaciones. Los aceros dulces contienen de 0.15 a 0.3% de carbono. Este acero se utiliza en edificios, puentes, tuberías, etc. Los aceros medio carbono contienen de 0.3 a 0.6% de carbono. Estos se utilizan en la construcción de maquinaria y equipos tales como tractores y equipo de minas. Los aceros de alto carbono contienen más de 0.6% de carbono, y se utilizan para la fabricación de muelles, ruedas para carros de ferrocarril y similares (Askeland, 2004).

### **2.3. Tratamientos térmicos para acero**

La mayor parte de la versatilidad que muestran los aceros proviene de su respuesta al tratamiento térmico o, más sencillamente, tratamiento de calor. El resultado de todos los tratamientos de calor en el acero es una alteración de la forma como se distribuye el carbono (Thornton, 1987).

El tratamiento térmico es la operación de calentamiento y enfriamiento de un metal en su estado sólido para cambiar sus propiedades físicas, y para mejorar sus propiedades mecánicas, especialmente la dureza, la resistencia y la tenacidad. Con el tratamiento térmico adecuado se pueden reducir los esfuerzos internos, el tamaño del grano, así como incrementar la tenacidad o producir una superficie dura con una interior suave (Smith, 1998).

Para conocer a qué temperatura debe elevarse el metal para que se reciba un tratamiento térmico, es recomendable contar con los diagramas de cambio de fases como el de hierro-carbono. En este tipo de diagramas se especifican las temperaturas en las que suceden los cambios de fase (cambios de estructura cristalina), dependiendo de los materiales diluidos (Smith, 1998).

El tratamiento térmico de un material es uno de los pasos fundamentales para que pueda alcanzar las propiedades mecánicas para las cuales está creado. La clave de los tratamientos térmicos consiste en las reacciones que se producen en el material, tanto en los aceros como en las aleaciones no férricas, y que ocurren durante el proceso de calentamiento y enfriamiento de las piezas, con unas pautas o tiempos establecido (Smith, 1998).

Los tratamientos térmicos han adquirido gran importancia en la industria en general, ya que las constantes innovaciones se van requiriendo metales con mayores resistencias tanto al desgaste como a la tensión.

El proceso de endurecimiento del acero consiste en el calentamiento del metal de manera uniforme a la temperatura correcta (ver Figura 2-1) y luego enfriarlo con agua, aceite, aire o en una cámara refrigerada, también en sales. El endurecimiento produce una estructura granular fina que aumenta la resistencia a la tracción (tensión) y disminuye la ductilidad (Askeland, 1987).

El acero al carbono para herramientas se puede endurecer al calentarse hasta su temperatura crítica, la cual se adquiere aproximadamente entre los 1450 °F y 1525 °F (790 a 830 °C) lo cual se identifica cuando el metal adquiere el color rojo cereza brillante. Cuando se calienta el acero, la perlita se combina con la ferrita, lo que produce una estructura de grano fino llamada austenita. Cuando se enfría la austenita de manera brusca con agua, aceite o aire, se transforma en martensita, material que es muy duro y frágil (Askeland, 1987).

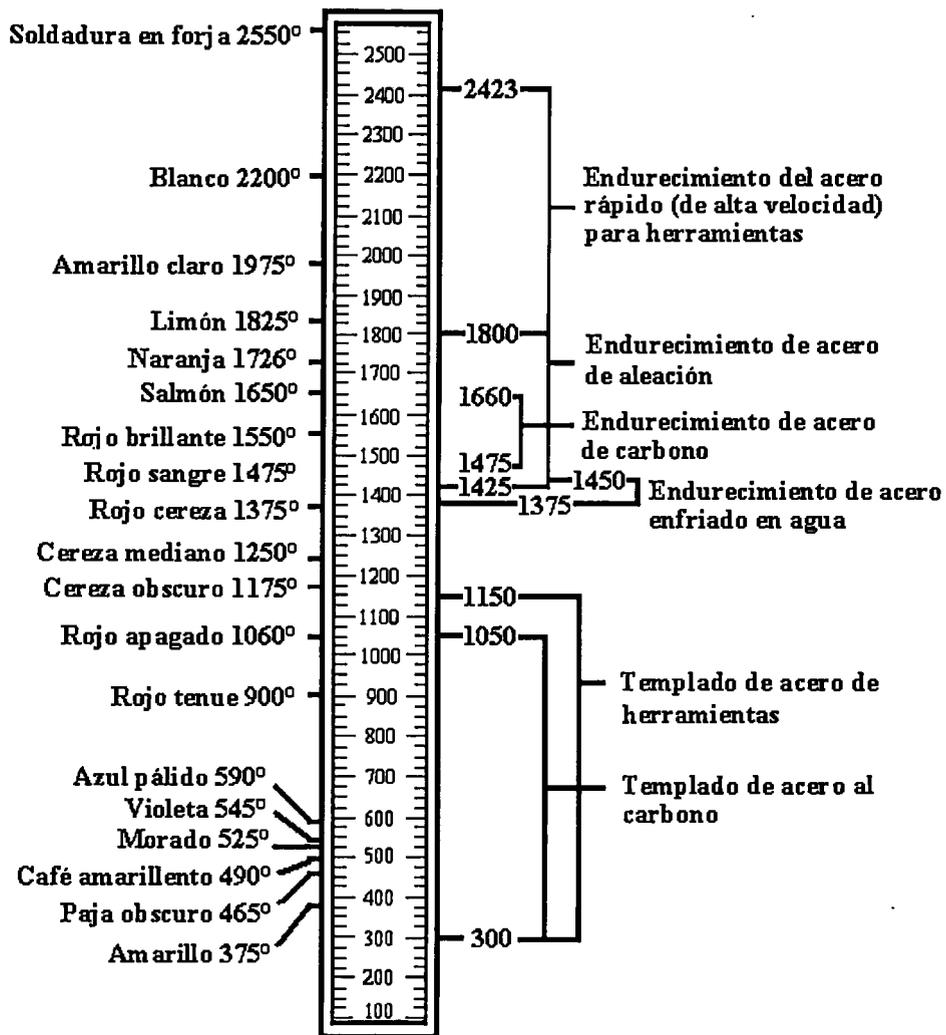


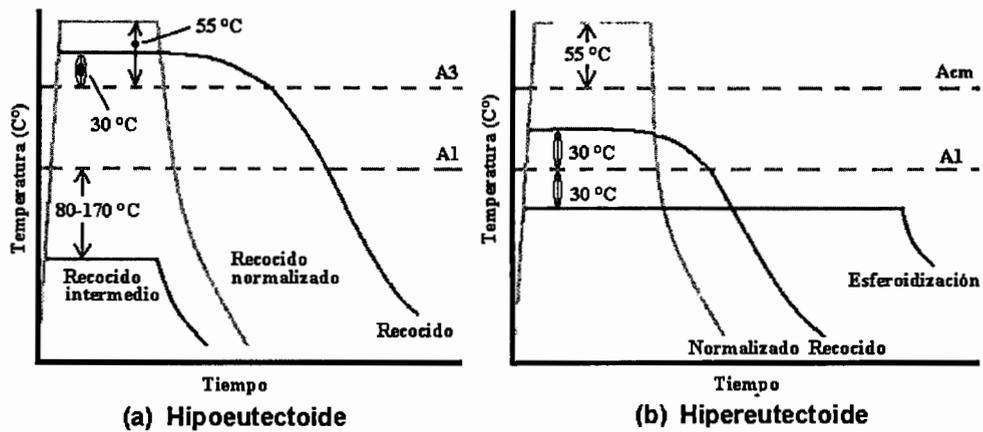
Figura 2-1 Temperaturas para endurecido de metales (Askeland, 1987).

### 2.3.1. Tratamientos térmicos simples.

Cuatro tratamientos térmicos simples: el recocido de proceso, el recocido total, el normalizado y el recocido de esferoidización, son de uso común para los aceros (Askeland, 2004).

Estos tratamientos térmicos se utilizan para alcanzar uno de los tres objetivos:

- 1.- Eliminar los efectos del trabajo en frío.
- 2.- Controlar el endurecimiento por dispersión.
- 3.- Mejorar la Maquinabilidad.



**Figura 2-2 Resumen esquemático de los tratamientos térmicos comunes para los aceros (a) hipoeutectoides y (b) hipereutectoides (Askeland, 2004).**

**Recocido de proceso o de eliminación de trabajo en frío (Templado):** El tratamiento térmico de recristalización, utilizado para eliminar el efecto del trabajo en frío en aceros con menos de 0.25% C, se conoce como recocido en proceso. Este se efectúa de 80 °C a 170 °C por debajo de la temperatura  $A_1$  (ver Figura 2-2). La meta del tratamiento de recocido de proceso en los aceros es la misma que el recocido en los vidrios orgánicos, en el sentido de que lo principal es eliminar de manera significativa los esfuerzos residuales. También el de restablecer la ductilidad y la tenacidad del acero (Askeland, 2004).

**Recocido y normalizado, seguido por endurecimiento por dispersión:** Los aceros se pueden endurecer por dispersión al controlar el tamaño de perlita. Inicialmente se calienta el acero para producir una austenita homogénea, paso conocido como austenización. El recocido, es decir un recocido total, permite que el acero se enfríe lentamente en el horno, produciendo perlita gruesa. El recocido pretende conseguir lo contrario que el temple, es decir, un ablandamiento del material que se consigue al poner en equilibrio la estructura cristalina que se había deformado por el frío, por tratamientos térmicos o por la mecanización de la pieza. El normalizado permite un enfriamiento más rápido del acero, al aire, que produce perlita fina. La Figura 2-3 muestra las propiedades comunes que se obtienen al recocer y normalizar aceros al carbono. El normalizado tiene por objeto dejar un material en estado normal, es decir, ausencia de tensiones internas y una distribución uniforme del carbono. Se suele emplear como tratamiento previo al temple y al revenido (Askeland, 2004).

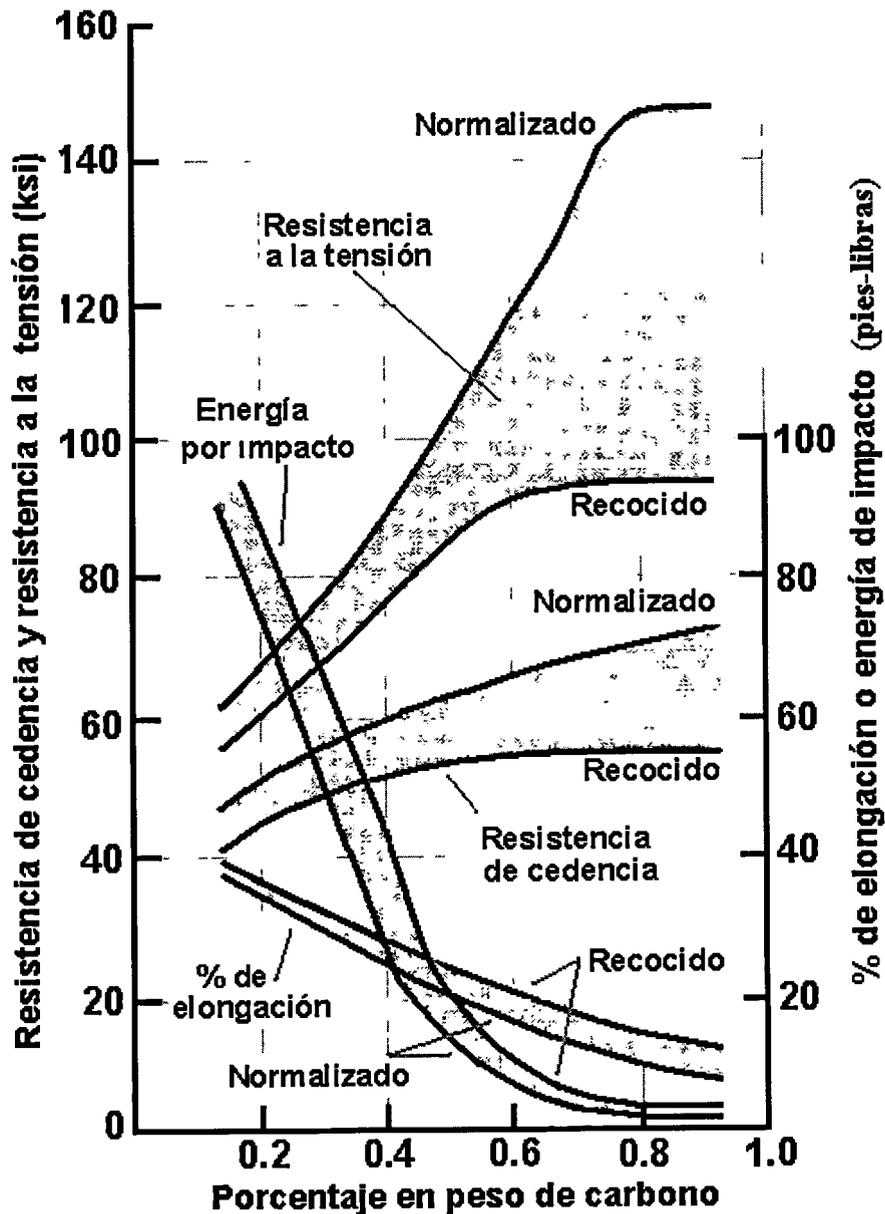


Figura 2-3 Efecto del carbono y del tratamiento térmico sobre las propiedades de los aceros al carbono (Askeland, 2004).

**Recocido de esferoidización y mejoría en la maquinabilidad:** Los aceros de alto carbono, con una gran concentración de  $Fe_3C$ , tienen características de maquinabilidad pobres. Mediante la esferoidización, es posible cambiar la morfología de  $Fe_3C$ . Durante el recocido la morfología de la fase  $Fe_3C$  se transforma en grandes partículas esféricas, esferoides, con el objeto de reducir la superficie de la cementita en forma laminar (Askeland, 2004).

### 2.3.2. Tratamientos superficiales.

Se puede, mediante un tratamiento térmico adecuado, producir una estructura dura y resistente en la superficie, con el objeto de obtener una resistencia al desgaste y a la fatiga y, al mismo tiempo, conservar un núcleo blando, dúctil y tenaz, que proporcione una buena resistencia a la falla por impacto (Askeland, 2004).

**Calentamiento selectivo de la superficie.**- Se podía empezar calentando rápidamente la superficie de un acero medio carbono por encima de la temperatura  $A_3$  (el centro se conserva por debajo de  $A_1$ ). Una vez templado el acero, el centro seguirá siendo una mezcla blanda de ferrita y perlita, en tanto que la superficie es martensita (ver Figura 2-4). La profundidad de la capa de martensita es la profundidad de la capa templada. El revenido produce la dureza deseada en la superficie. Podemos proporcionar calor local sobre la superficie utilizando una flama de gas, una bobina de inducción o un rayo láser o un haz electrónico. También se puede endurecer únicamente aquellas áreas seleccionadas de la superficie que son más propensas a falla por fatiga o por desgaste (Askeland, 2004).

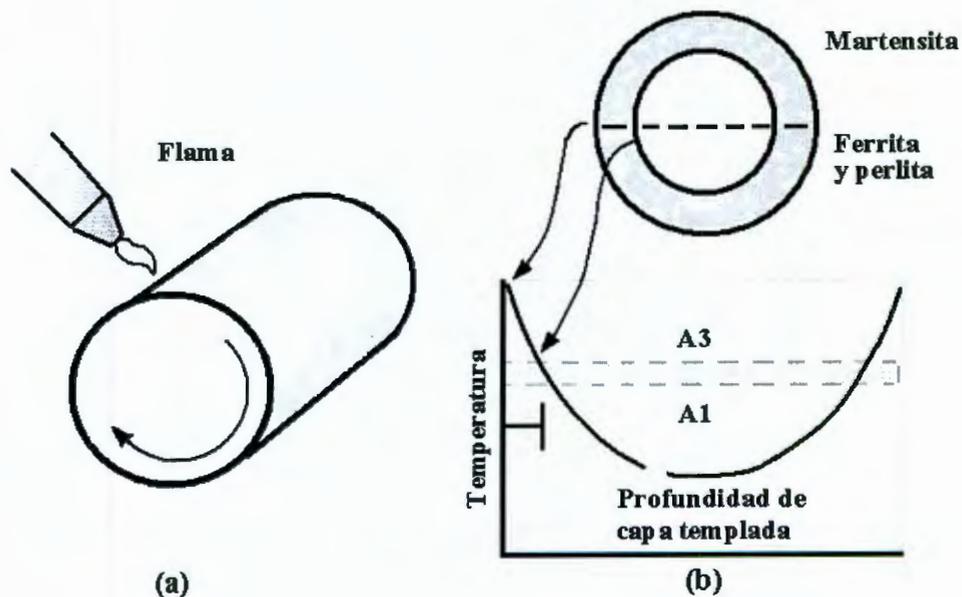
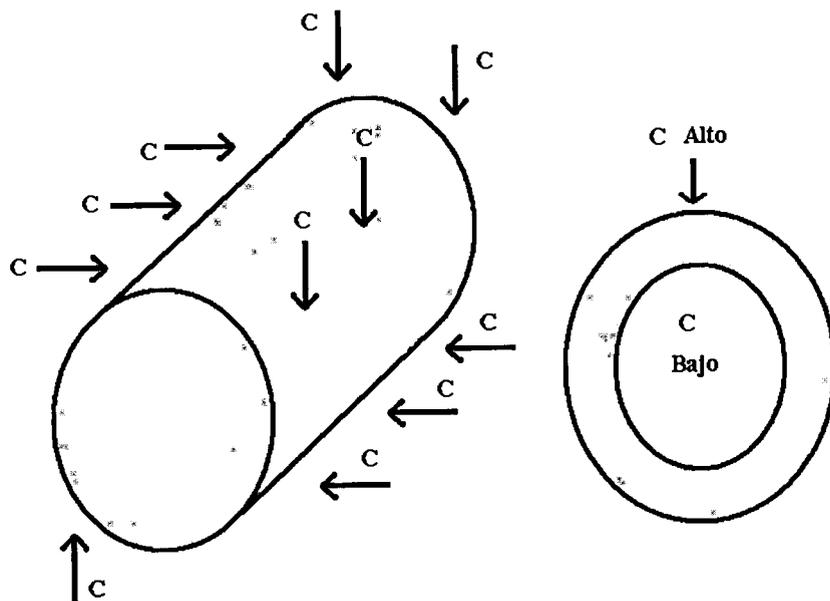


Figura 2-4 (a) Endurecimiento superficial mediante un calentamiento localizado.  
(b) Solamente se calienta la superficie por encima de la temperatura  $A_1$  y se temple para producir martensita (Askeland, 2004).

**Cementación para el endurecimiento superficial de los aceros.**-Digamos que se quiere tener una superficie, como la de los dientes de un engranes, que sea dura. Sin embargo, no se desea que todo el engrane sea duro. Para aumentar la dureza de la superficie, se usan procesos de cementación. En la **cementación**, se difunde el carbono hacia el interior de la superficie del acero a una temperatura por encima de  $A_3$  (ver Figura 2-5). En la superficie se produce un alto contenido de carbono gracias a su rápida difusión y a su elevada solubilidad en la austenita. Cuando a continuación el acero es templado y revenido, la superficie se transforma en una martensita de alto carbono revenida, en tanto que el centro de ferrita se conserva blando y dúctil. El espesor de la superficie endurecida es mucho menor en los aceros cementados que en los aceros endurecidos por flama o por inducción eléctrica. En forma parecida a la introducción del carbono, también se usa un proceso llamado **nitruración**, en el solo se difunde el nitrógeno en la superficie de un material metálico y se efectúa por debajo de la temperatura  $A_1$ . En el **carbonitrurado** se genera un gas que contiene monóxido de carbono y amoníaco, difundiéndose en el acero tanto el carbono como el nitrógeno (Askeland, 2004).



**Figura 2-5** Carburizado de un acero de bajo carbono con el objeto de producir una superficie de alto carbono, resistente al desgaste (Askeland, 2004).

## **2.4. Beneficios de la capa endurecida**

Los beneficios de la capa endurecida del acero son las mismas propiedades mecánicas que este adquiere al ser sometido a los diferentes tratamientos térmicos. Estas propiedades son la resistencia al desgaste, tenacidad, maquinabilidad y dureza.

## **2.5. Dureza**

La dureza es una medida de la resistencia de un metal a la deformación permanente (plástica) en su superficie. Todos los procesos para la medición de la microdureza se refieren al mismo principio: un cuerpo penetrador es presionado continuamente en el material con una fuerza de prueba predeterminada. Los métodos existentes para la medición de la microdureza se distinguen básicamente por la forma de la herramienta empleada (penetrador), por las condiciones de aplicación de carga y por la propia forma de calcular la microdureza (Smith, 1998).

Dureza superficial, que es la resistencia de un material a ser marcado por otro. Se prefiere el uso de materiales duros cuando éstos deben resistir el roce con otros elementos. Es el caso de las herramientas de construcción (palas, carretillas, pisos, tolvas). El ensayo es realizado con indentadores en forma de esferas, pirámides o conos. Estos elementos se cargan contra el material y se procede a medir el tamaño de la huella que dejan. Es un ensayo fácil y no destructivo; puede realizarse en cualquier sitio, ya que existen durómetros fácilmente transportables. Una de las ventajas del ensayo de microdureza es que los valores entregados pueden usarse para hacer una estimación de la resistencia a la tracción (Smith, 1998).

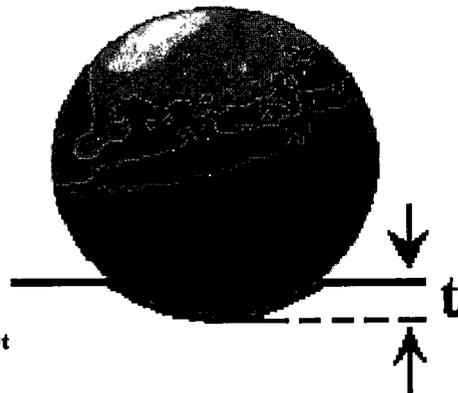
### **2.5.1. Dureza Rockwell.**

El método de dureza Rockwell usa una bola de pequeño diámetro para materiales blandos, y un cono o indentador de diamante para los materiales más duros. El método se basa en la medición de la profundidad de penetración hecha por el indentador bajo la acción de una carga prefijada. El número de dureza Rockwell (HR) se mide en unidades convencionales y es igual al tamaño de penetración sobre cargas determinadas. Esta prueba de dureza es la más extendida, ya que la dureza se obtiene por medición directa y es apto para todo tipo de materiales. Se suele considerar un ensayo no destructivo por el pequeño tamaño de huella (Askeland, 2004).

Se aplica a materiales más duros que la escala Brinell. En este ensayo se usan penetradores de carburo de tungsteno como bolas de 1/16 de pulgada, 1/8, 1/4 y 1/2 de pulgada, este último para materiales más blandos y en cono de diamante cuyo ángulo en la base es de 120°.

El ensayo de dureza Rockwell B diseñado para materiales de dureza intermedia como aceros de medio y bajo carbono. Su indentador es la bola de 1/16 de pulgada, cuya carga es de 100 kilogramos, su escala va de 40 a 100  $R_B$  (ver Figura 2-6) (Amigo y Ferrer).

**Ensayo ROCKWELL B, F, G, E**  
**Indentador:**  
**Esfera de acero  $f = 1/16$  "**  
**(HRB, HRF, HRG)**  
**Esfera de acero  $f = 1/8$  "**  
**(HRE)**  
**Carga:**  
 **$P_B = 100$  Kg.**  
 **$P_F = 60$  Kg.**  
 **$P_G = 150$  Kg.**  
 **$P_E = 100$  Kg.**  
**Formula: HRB, HRF, HRG, HRE = 130 - 500t**



**Figura 2-6 Dureza Rockwell B, F, G y E.**

El ensayo de dureza Rockwell C. Se emplea en materiales más duros que 100  $R_B$ , el funcionamiento de este ensayo es como sigue: el observador primero acciona una palanca que presiona el cono de diamante a una pequeña distancia establecida dentro de la probeta. Esto se conoce como la "precarga"(10 Kg.). Enseguida, se deja actuar la carga  $R_C$  normalizada de 150 kilogramos, que presiona aun más el diamante dentro de la probeta. Luego, con la misma palanca se quita la carga, en este momento se lee la dureza  $R_C$  en la escala y luego, se descarga la palanca. El principio de este ensayo, esta en que a través de un sistema de palancas se registra en la escala la profundidad de penetración entre la precarga y la carga de 150 kilogramos y se lee directamente en  $R_C$  (ver Figura 2-7) (Amigo y Ferrer).

**Ensayo ROCKWELL A, C, D**  
**Indentador: Cono de diamante (HRA, HRC, HRD)**

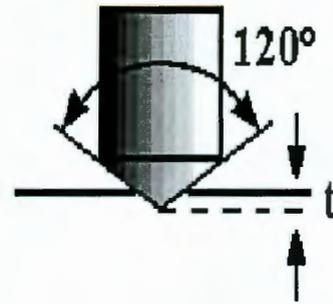
**Carga:**

$P_A = 60 \text{ Kg.}$

$P_C = 150 \text{ Kg.}$

$P_D = 100 \text{ Kg.}$

**Formula: HRA, HRC, HRD = 100 - 500t**



**Figura 2-7 Dureza Rockwell A, C y D.**

2.5.2. Dureza Brinell.

La prueba de dureza Brinell, que se usa desde 1900, se aplica principalmente para determinar la dureza en bulto de secciones pesadas, como los elementos forjados o colados. De todos los métodos de indentaciones es el que necesita de la menor preparación de la superficie, pues solo se requiere que la superficie sea relativamente lisa, este libre de suciedad y escamas (Flinn y Trojan, 1993).

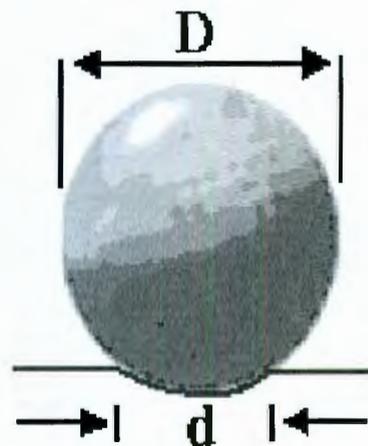
La prueba Brinell se realiza imprimiendo una bola de acero de 10mm de diámetro con una carga de 3000kg. En la superficie durante un tiempo estándar, que por lo general es de 30 s; para los metales muy duros se usa una esfera de tungsteno. Se mide el diámetro promedio de la impresión (huella) que resulta y de esto se determina el número de dureza Brinell (ver Figura 2-8) (Flinn y Trojan, 1993).

**Ensayo BRINELL**

**Indentador: Esfera de 10mm de  
 acero o carburo de  
 tungsteno.**

**Carga = P**

**Fórmula:** 
$$HBN = \frac{2P}{\pi D \left( D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)}$$



**Figura 2-8 Dureza Brinell.**

### 2.5.3. Dureza Vickers

El método de microdureza Vickers usa un indentador en forma de diamante con un ángulo en sus vértices de  $136^\circ$  que es presionado en una prueba con una fuerza definida. Se puede usar como un ensayo de macro o micro microdureza. Dependiendo de la fuerza de prueba se distingue el rango de la carga pequeña y de micro microdureza. La macro dureza en metales es independiente de la fuerza de prueba. Este método es el adecuado para materiales con una microdureza superficial mayor que en el núcleo (como en los dientes de los engranajes en el sistema de transmisión de un vehículo), materiales que en distintas áreas tengan diferentes valores de microdureza o en muestras que no sean microscópicamente planas (ver Figura 2-9) (Flinn y Trojan, 1993).

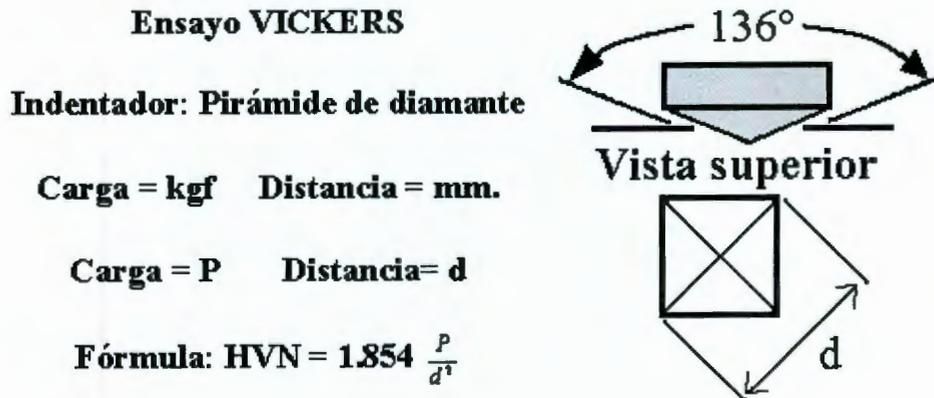


Figura 2-9 Dureza Vickers.

Debido a la precisión que requiere la prueba y a lo diminuto de la impresión, esta prueba solo se puede realizar en especímenes preparados y pulidos con mucho cuidado, también se requiere de un microscopio para obtener la medida. En la actualidad los ensayos de microdureza se usan principalmente en investigación y desarrollo (Askeland, 2004).

## 2.6. Normas de dureza

Tabla 1 Tabla de normas ASTM para medición de dureza.

ASTM	Normas de dureza para la medición de dureza.
E18-07	Standard Test Methods for Rockwell Hardness and Rockwell Superficial Hardness of Metallic Materials
E92-03	Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic
E399-09	Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic
E384-06	Standard Test Method for Micro hardness of Materials
E448-82	Standard Practice for Scleroscope Hardness Testing of Metallic Materials
E1842-96	Standard Test Method for Macro-Rockwell Hardness Testing of Metallic Materials
C730-03	Standard Test Method for Knoop Indentation Hardness of Glass
C886-05	Standard Test Method for Scleroscope Hardness Testing of Fine-Grained Carbon and Graphite Materials

## 2.7. Procesamiento de imágenes aplicado a los materiales

Las imágenes pueden provenir de diferentes captores, resonancia magnética, microscopio electrónico de barrido, microscopio electrónico de transmisión, microscopio óptico, ultrasonido, radar. El interés por algún tipo de captor y el tipo de procesamiento que se va a realizar depende del problema que se desea resolver. En

general se tienen dos tipos de imágenes; binarias y numéricas. Otros tipos de imágenes, como las de color, están formadas de tres imágenes numéricas. Las correspondientes a los colores básicos rojo, verde y azul (Terol, 2003).

**Imagen.-** Proyección en dos dimensiones (2D) de una escena en 3D (mundo real). Definida como una función  $f(x, y)$ , para cada  $(x, y)$ ,  $f(x, y)$  representa la intensidad de la luz en dicho punto (Terol, 2003).

**Imagen de entrada.-** Esta es la imagen que se analizará, es la que se obtuvo de la muestra o probeta, esta imagen entra a la memoria de la computadora y es el comienzo del análisis.

**Imagen procesada.-** Esta imagen queda después de aplicar los filtros necesarios. De esta imagen se obtiene un histograma para verificar que obtuvo un mejor contraste.

#### 2.7.1. Filtros estadísticos

**Media.-** Permite eliminar el ruido o como se conoce en las imágenes “nieve”, es de gran ayuda cuando las imágenes que se obtienen no son de gran calidad. La ecuación 2.1 representa la media.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (2.1)$$

1 Media

**Moda.-** Son los valores que más se repiten en una muestra, este filtro ayuda a homogeneizar la imagen en caso de que se tengan valores muy desiguales, estos valores no tienen porque ser únicos (Terol, 2003).

**Mediana.-** La mediana ayuda a eliminar ruido, este filtro no afecta demasiado a la imagen y tampoco se ve afectado por valores extremos. La mediana se define matemáticamente como se muestra en la ecuación 2.2 (Terol, 2003):

$$\bar{X} = \begin{cases} X_{\frac{n+1}{2}} \\ \frac{X_{\frac{n}{2}} + X_{\frac{n}{2}+1}}{2} \end{cases} \quad (2.2)$$

2 Mediana

La primer fórmula es para conjuntos de valores pares mientras que la segunda es para conjuntos de valores impares.

### 2.7.2. Histograma

El histograma por si mismo no es un filtro, es solo la gráfica de los niveles de gris que se encuentra en nuestra imagen y la cantidad de veces que estos se encuentran, esto es de gran ayuda para saber donde se tienen más información y hacer los análisis en esos niveles de gris. Se representa en la ecuación 2.3 (Terol, 2003).

$$\sum_0^{255} H(k) = N \quad (2.3)$$

3 Histograma

### 2.7.3. Umbralización

Es la separación de los diferentes niveles de gris, antes de usar este filtro se debe realizar un histograma ya que este dará la información necesaria para hacer una umbralización correcta (Terol, 2003).

$$f(x) = \begin{cases} 1 - \text{six} - \epsilon - X \\ 0 - \text{six} - \epsilon - X \end{cases} \quad (2.4)$$

4 Umbralización

### 2.7.4. Morfología matemática.

Dicha técnica de procesamiento de imágenes esta basada en la topología, la teoría de grafos, álgebra y la geometría integral. Sin embargo, en su concepción práctica, dicha metodología esta basada en la teoría de conjuntos (Terol, 2003).

Las dos principales operaciones morfológicas son la dilatación y la erosión. La dilatación permite expandir los objetos, mientras rellena pequeños agujeros y conecta objetos que no están juntos. La erosión encoje los objetos deshaciendo (corroyendo) sus límites (Terol, 2003).

Estas operaciones pueden ser realizadas por una aplicación que con la selección apropiada del elemento estructural, el cual determinará exactamente como los objetos serán dilatados o erosionados (Terol, 2003).

**Dilatación.**-El proceso de dilatación se realiza colocando el elemento estructural en la imagen y deslizándolo a través de la imagen de una forma similar a la convolución. La diferencia esta en como se hace. La forma de hacerlo es la siguiente (Terol, 2003):

- Si el origen del elemento estructural coincide con un “0” en la imagen, no hay cambio; se mueve al siguiente píxel.
- Si el origen del elemento estructural coincide con un “1” en la imagen, se realiza la operación lógica OR en todos los píxeles dentro del elemento estructural.

La función que define esta operación esta dada por la ecuación 2.5:

$$\delta_{\lambda B}(x) = \{x : \lambda B_x \cap X = 0\} \quad (2.5)$$

### 5 Dilatación

Desde el punto de vista geométrico, se puede decir que la erosión de un conjunto  $X$  por un conjunto  $\lambda B$ , es el lugar de centros del elemento estructural cuando este conjunto toca al conjunto  $X$ .

**Erosión.**-La erosión es un proceso similar a la dilatación, solo que convertimos los píxeles en “0”, no a “1”. Así como antes, se desliza el elemento estructural a través de la imagen y se siguen los siguientes pasos (Terol, 2003):

- Si el origen del elemento estructural coincide con un “0” en la imagen, no se hace nada y se pasa al siguiente píxel.
- Si el origen del elemento estructural coincide con un “1” en la imagen y cualquiera de los píxeles de “1” en el elemento estructural se extiende más allá



$$\varepsilon_{\lambda B}(I_1) \leq \varepsilon_{\lambda B}(I_2) \quad \delta_{\lambda B}(I_1) \leq \delta_{\lambda B}(I_2) \quad (2.8)$$

8 Dilatación y Erosión

3. No son ídem potentes.

$$\varepsilon_{\lambda B} \varepsilon_{\lambda B}(I) \neq \varepsilon_{\lambda B}(I) \quad \delta_{\lambda B} \delta_{\lambda B}(I) \neq \delta_{\lambda B}(I) \quad (2.9)$$

9 Dilatación y Erosión

4. La erosión es una transformación anti extensiva y la dilatación es una transformación extensiva para cualesquier  $\lambda$ .

$$\varepsilon_{\lambda B}(I) \leq I \quad \delta_{\lambda B}(I) \geq I \quad (2.10)$$

10 Dilatación y Erosión

5. Las dos operaciones son transformaciones duales con respecto a la complementación.

$$\varepsilon_{\lambda B}(I) = [\delta_{\lambda B}(I^c)]^c \quad (2.11)$$

11 Dilatación y Erosión

6. La dilatación es conmutativa, mientras que la erosión no lo es.

$$X \oplus B = B \oplus X \quad X \ominus B \neq B \ominus X \quad (2.12)$$

12 Dilatación y Erosión

7. La dilatación y la erosión usando el origen como elemento estructurante están dadas por.

$$X \oplus \{o\} = X \quad X \ominus \{o\} = X \quad (2.13)$$

13 Dilatación y Erosión

2.7.5. Detector de bordes.

Los puntos de borde, o simplemente bordes son píxeles alrededor de los cuales la imagen presenta una brusca variación de los niveles de gris. El objetivo consiste en dada una imagen, que puede o no estar corrompida por ruido, localizar los bordes más probables generados por elementos de la escena y no por ruido (De la Cruz, 2004).

En realidad el término borde se refiere a cadenas conectadas de puntos de borde, esto es, fragmentos de contorno, esto no impide que la imagen pueda contener puntos aislados que presentan un alto contraste en los niveles de gris. Los puntos de borde se denominan a veces en terminología anglosajona “*edgels*” (procedente de *edge elements*) (De la Cruz, 2004).

Los contornos de los objetos sólidos de la escena, las marcas en las superficies, las sombras, todas generan bordes. Además las líneas de las imágenes, las curvas y los contornos son características o elementos básicos para muchas aplicaciones tales como calibración, movimiento o reconocimiento (Truco y Verri, 1998).

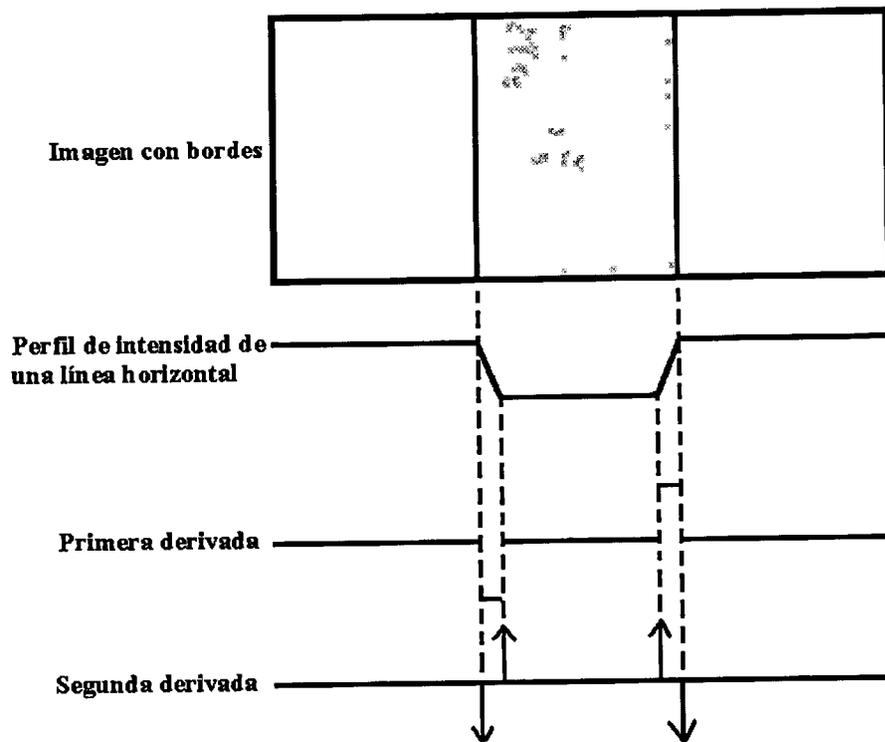
La detección de bordes es una parte fundamental de la mayoría de sistemas de visión, puesto que el éxito de los niveles siguientes de procesamiento depende fuertemente de la fiabilidad de las características, en este caso bordes. La filosofía de muchos algoritmos de detección de bordes es el cómputo de las derivadas de los operadores locales (primera o segunda) (De la Cruz, 2004).

#### 2.7.5.1 Concepto de derivada en la extracción de bordes.

En la Figura 2-10 se puede observar que los bordes (transición de oscuro a claro o viceversa) se modelan como una rampa en lugar de hacerlo como un cambio brusco de intensidad, debido que en la imagen original suelen estar desdibujados como resultado del muestreo (De la Cruz, 2004).

La primera derivada es cero en todas las regiones de intensidad constante y tiene un valor constante en toda la transición de intensidad. La segunda derivada, en cambio, es cero en todos los puntos, excepto en el comienzo y el final de una transición de intensidad. Por lo tanto, un cambio de intensidad se manifiesta como un cambio brusco en la primera derivada y presenta un paso por cero, es decir se introduce un cambio de signo en su valor, en la segunda derivada (De la Cruz, 2004).

Basándonos en estas observaciones y en los conceptos ilustrados en la Figura 2-10 es evidente que el valor de la primera derivada puede utilizarse para detectar la presencia de un borde así como el signo de la segunda derivada.



**Figura 2-10** Concepto de primera y segunda derivada para la extracción de bordes

La observación anterior permite distinguir entre operadores para la extracción de bordes basados en la primera derivada y segunda derivada. Entre los operadores basados en la primera derivada están los operadores gradiente de forma general. Debiéndose una de sus principales aplicaciones a Canny (Canny, 1986), quien utiliza el concepto de gradiente. Se trata de un método de aplicación de sumo interés en la extracción de bordes y cierre de ciertas regiones el concepto de gradiente ha sido estudiado en la literatura y ha originado diversos métodos para su aplicación en las extracción de bordes, tales como los operadores de Sobel, Prewitt, Roberts, Kirsch, Robinsón, Frei-Chen. A partir de estos operadores se pueden obtener por extensión otros que tienen la capacidad de mitigar el ruido subyacente (De la Cruz, 2004).

#### 2.7.5.2 Gradiente de una imagen.

El gradiente de una imagen  $f(x, y)$  en un punto  $(x, y)$  se define como un vector bidimensional dado por la ecuación, siendo un vector perpendicular al borde (De la Cruz, 2004).

$$G[f(x, y)] = \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} = f(x, y) \\ \frac{\partial}{\partial y} = f(x, y) \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

#### 14 Derivadas parciales

Donde el vector  $G$  apunta en la dirección de variación máxima de  $f$  en el punto  $(x, y)$  por unidad de distancia con la magnitud y dirección dadas por

$$|G| = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad \phi(x, y) = \tan^{-1} \frac{G_y}{G_x} \quad (2.15)$$

#### 15 Magnitud y dirección del gradiente

Es una práctica habitual aproximar la magnitud del gradiente con valores absolutos,

$$|G| = |G_x| + |G_y| \quad (2.16)$$

#### 16 Magnitud del gradiente con valores absolutos

Esto se hace porque la magnitud del gradiente no es tan importante como la relación de diferentes valores. Es decir, se va a decidir si un punto es de borde según que la magnitud del gradiente supere o no un determinado umbral, pues si bien sólo es necesario ajustar dicho umbral para que el resultado de la extracción de bordes sea el mismo tanto si se calcula la magnitud del gradiente mediante cualquiera de las dos ecuaciones. Sin embargo, esta última ecuación resulta mucho más fácil de implementar (De la Cruz, 2004).

Para calcular la derivada en la ecuación (2.14) se pueden utilizar las diferencias de primer orden entre dos píxeles adyacentes; esto es,

$$G_x = \frac{f(x + \Delta x) - f(x - \Delta x)}{2\Delta x} \quad G_y = \frac{f(y + \Delta y) - f(y - \Delta y)}{2\Delta y} \quad (2.17)$$

#### 17 Diferencias de primer orden entre dos píxeles adyacentes

Esta es la forma más elemental de obtener el gradiente en un punto. La magnitud del gradiente puede tomar cualquier valor real y el ángulo también cualquier valor real entre  $0^\circ$  y  $360^\circ$ . No obstante, otros operadores consideran una vecindad de dimensión  $3 \times 3$  entorno al punto, tal es el caso de un primer grupo de operadores entre los que se encuentran Sobel, Prewitt, Roberts y también de un segundo grupo entre los que se encuentran los operadores de Kirsch, Robinsón o Frei-Chen. La diferencia entre los primeros y los segundos estriba en el hecho de que los valores obtenidos por los primeros son reales como los proporcionados por la ecuación (2.17), mientras que los valores obtenidos por los segundos son discretos (De la Cruz, 2004). En cualquier caso, y siguiendo con el concepto de derivada definido en (2.17) tenemos la siguiente relación,

$$g(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{si } G[f(x, y)] \geq T \\ 0 & \text{si } G[f(x, y)] \leq T \end{cases} \quad (2.18)$$

*18 Valores del umbral*

donde  $T$  es un valor de umbral no negativo. Sólo los píxeles de borde cuyo gradiente excedan del valor de  $T$  se consideran importantes. Así, la ecuación 2.18 se puede ver como un procedimiento que extrae sólo aquellos píxeles caracterizados por transiciones de intensidad significativas (dependiendo de  $T$ ) (De la Cruz, 2004).

### 2.7.5.3 Operadores Sobel

Como hemos indicado anteriormente, los valores de  $G_x$  y  $G_y$  de la ecuación (2.14) pueden implementarse por convolución de la imagen con las máscaras  $3 \times 3$  dadas a continuación, conocidas como operadores de Sobel (De la Cruz, 2004).

$$\begin{matrix} \begin{bmatrix} Z_1 & Z_2 & Z_3 \\ Z_4 & Z_5 & Z_6 \\ Z_7 & Z_8 & Z_9 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \\ (a) & (b) & (c) \end{matrix}$$

**Figura 2-11 (a) Región de la imagen de dimensión  $3 \times 3$ ; (b) Máscara usada para obtener  $G_x$  en el punto central de la región  $3 \times 3$ ; (c) Máscara usada para obtener  $G_y$  en el mismo punto. Estas máscaras se denominan operadores de Sobel (De la Cruz, 2004).**

Los operadores gradiente en general tienen el efecto de magnificar el ruido subyacente en la imagen, tanto los operadores de Sobel como el resto de los operadores de vecindad tienen la propiedad añadida de suavizar la imagen, eliminando parte del ruido y por consiguiente, minimiza la aparición de falsos bordes debido al efecto de magnificación del ruido por parte de los operadores derivada. A partir de la Figura 2-11, las derivadas basadas en los operadores de Sobel son (De la Cruz, 2004):

$$\begin{aligned} G_x &= (z_3 + 2z_6 + z_9) - (z_1 + 2z_4 + z_7) \\ G_y &= (z_7 + 2z_8 + z_9) - (z_1 + 2z_2 + z_3) \end{aligned} \quad (2.19)$$

*19 Derivadas basadas en los operadores de Sobel*

Donde los distintos valores de  $z$  en la región de la Figura 2-11 (a) son los niveles de gris de los píxeles solapados por las máscaras en cualquier localización de la imagen. Para obtener los valores de las componentes del vector gradiente en el punto definido por el píxel central de la región se utilizan las expresiones (2.19) con lo que la magnitud y el ángulo se pueden obtener a partir de (2.15) y (2.16), es decir, obtenemos un valor del gradiente en dicho punto. Para obtener el siguiente valor, las máscaras se mueven a la siguiente posición del nuevo píxel y se repite el proceso, después de haber barrido todas las posibles posiciones, el resultado es una imagen gradiente. Es preciso tener en cuenta que en los bordes de la imagen los valores del gradiente no se pueden calcular por sobrepasar las máscaras la propia imagen. Una vez que se a obtenido la magnitud del gradiente, se puede decidir si un determinado punto es de borde o no aplicando la ecuación (2.18) obteniendo así una imagen binaria como resultado (De la Cruz, 2004).

#### 2.7.5.4 Operador Prewitt

El operador Prewitt es similar al de Sobel diferenciándose en los coeficientes de las máscaras (ver Figura 2-12) (De la Cruz, 2004).

$$\begin{array}{ccc} \begin{bmatrix} Z_1 & Z_2 & Z_3 \\ Z_4 & Z_5 & Z_6 \\ Z_7 & Z_8 & Z_9 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \\ (a) & (b) & (c) \end{array}$$

**Figura 2-12 (a) Región de la imagen de dimensión 3x3; (b) Máscara usada para obtener  $G_x$ ; (c) Máscara usada para obtener  $G_y$  (De la Cruz, 2004).**

La magnitud y dirección del gradiente se obtienen como en el caso de Sobel por medio de las ecuaciones (ver ecuación 2.15 y 2.16).

#### 2.7.5.5 Operador Roberts

El operador Roberts, a diferencia de los anteriores, marca solamente los puntos de borde, sin informarnos de la orientación de éstos. Es un operador muy simple que trabaja muy bien en imágenes binarias (De la Cruz, 2004). Existen dos formas del operador Roberts:

Raíz cuadrada de la suma de las diferencias de los vecinos diagonales al cuadrado,

$$\sqrt{[f(x, y) - f(x - 1, y - 1)]^2 + [f(x, y - 1) - f(x - 1, y)]^2} \quad (2.20)$$

*20 Forma del operador Roberts*

Suma de la magnitud de las diferencias de los vecinos diagonales,

$$|f(x, y) - f(x - 1, y - 1)| + |f(x, y - 1) - f(x - 1, y)| \quad (2.21)$$

*21 Forma del operador Roberts más usada*

La más usada es la segunda ecuación por su menor costo en tiempo de cómputo.

#### 2.7.5.6 Máscaras de Kirsch

Las máscaras de Kirsch se denominan también de brújula porque se definen considerando una máscara simple y rotándola en las ocho direcciones principales de la brújula: Norte, Noroeste, Oeste, Suroeste, Sur, Sureste, Este y Noreste. Las máscaras se definen como sigue en la Figura 2-13 (De la Cruz, 2004).

$$\begin{array}{cccc}
K0 = \begin{bmatrix} -3 & -3 & 5 \\ -3 & 0 & 5 \\ -3 & -3 & 5 \end{bmatrix} & K1 = \begin{bmatrix} -3 & 5 & 5 \\ -3 & 0 & 5 \\ -3 & -3 & -3 \end{bmatrix} & K2 = \begin{bmatrix} 5 & 5 & 5 \\ -3 & 0 & -3 \\ -3 & -3 & -3 \end{bmatrix} & K3 = \begin{bmatrix} 5 & 5 & -3 \\ 5 & 0 & -3 \\ -3 & -3 & -3 \end{bmatrix} \\
0^\circ & 45^\circ & 90^\circ & 135^\circ \\
K4 = \begin{bmatrix} 5 & -3 & -3 \\ 5 & 0 & -3 \\ 5 & -3 & -3 \end{bmatrix} & K5 = \begin{bmatrix} -3 & -3 & -3 \\ 5 & 0 & -3 \\ 5 & 5 & -3 \end{bmatrix} & K6 = \begin{bmatrix} -3 & -3 & -3 \\ -3 & 0 & -3 \\ 5 & 5 & 5 \end{bmatrix} & K7 = \begin{bmatrix} -3 & -3 & -3 \\ -3 & 0 & 5 \\ -3 & 5 & 5 \end{bmatrix} \\
180^\circ & 225^\circ & 270^\circ & 315^\circ
\end{array}$$

**Figura 2-13 Máscaras de Kirsch en las 8 direcciones**

Para cada punto de la imagen se obtienen 8 valores, resultantes de la convolución con cada una de las máscaras, el valor del modulo del gradiente resulta ser el máximo de esos 8 valores, mientras que la dirección queda determinada por el ángulo asociado a la máscara que ha generado dicho valor máximo (De la Cruz, 2004).

#### 2.7.5.7 Máscaras de Robinsón

Las máscaras de Robinsón se usan de forma similar a las de Kirsch, si bien la máscara inicial es ahora dada en la Figura 2-14 y las restantes en la Figura 2-15.

$$r0 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
0^\circ$$

**Figura 2-14 Máscara inicial de Robinsón generadora de las otras 7 máscaras restantes (De la Cruz, 2004)**

$$\begin{array}{cccc}
r0 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} & r1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \\ -2 & -1 & 0 \end{bmatrix} & r2 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} & r3 = \begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & -2 \end{bmatrix} \\
0^\circ & 45^\circ & 90^\circ & 135^\circ \\
r4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} & r5 = \begin{bmatrix} 0 & -1 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \\ 2 & 1 & 0 \end{bmatrix} & r6 = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} & r7 = \begin{bmatrix} -2 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 2 \end{bmatrix} \\
180^\circ & 225^\circ & 270^\circ & 315^\circ
\end{array}$$

**Figura 2-15 Máscaras de Robinsón en las 8 direcciones**

## Extensión de los operadores

Si la imagen contiene ruido, el resultado de la detección de bordes es malo. Una forma de mitigar esto consiste en procesar previamente la imagen para eliminar parte del ruido. Pero también se puede hacer por expansión de los operadores de borde. Por ejemplo, en el caso de los operadores de Prewitt y Sobel tendríamos las siguientes máscaras para poder obtener  $G_x$  y  $G_y$  respectivamente (De la Cruz, 2004) (ver Figura 2-16).

$$\text{Prewitt} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad \text{Sobel} = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 & -2 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -2 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -2 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 2 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 2 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 2 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

**Figura 2-16 Extensión de los operadores de Prewitt  $G_x$  y Sobel  $G_y$**

Se pueden rotar estas máscaras  $90^\circ$  en cualquiera de los dos sentidos para obtener las máscaras complementarias, es decir las máscaras utilizadas para calcular  $G_y$  en el caso de Prewitt, y  $G_x$  en el caso de Sobel, con lo que estaríamos en disposición de obtener la magnitud y la dirección del gradiente. Se puede utilizar cualquier dimensión para ellos, aunque las máscaras de  $7 \times 7$ ,  $9 \times 9$  y  $11 \times 11$  suelen ser las más habituales (De la Cruz, 2004).

### 2.7.6. Aproximación funcional.

Muchas veces en la industria, cuando se realizan mediciones y obtenemos los datos de ésta, la información tiene errores significativos ya que los datos obtenidos de las mediciones fluctúan. Esto se debe a errores aleatorios del sistema de medición aplicado al comportamiento del sistema en observación. Cualquiera que sea la razón, es frecuente que surja la necesidad de ajustar una función a los datos de una medición.

Se trata de encontrar la ecuación de una curva que, aunque no pase por todos los puntos (datos), tenga pocas variaciones y pase lo más cerca posible de todos ellos. Por tanto, ¿cómo podemos ajustar una función a los puntos dados? Lo mejor que podemos hacer es considerar una función con pocos parámetros libres y determinarlos de forma que la desviación de la función con respecto a los datos sea mínima. Dicha minimización de la desviación se obtiene mediante el método de mínimos cuadrados (Nakamura, 1992).

#### 2.7.6.1 Método de mínimos cuadrados.

Conocida también como regresión lineal. Supongamos que deseamos encontrar una función lineal que se ajuste a los datos de la tabla (ver Figura 2-17), con una desviación mínima. La función lineal determinada de esta manera se llama una recta de regresión (Luthe, 1991).

x	y
$x_1$	$y_1$
$x_2$	$y_2$
$x_3$	$y_3$
...	...
...	...
$x_n$	$y_n$

**Figura 2-17 Función tabular.**

En el caso particular de que los puntos de la tabla anterior se acerquen a una línea recta, la ecuación es:

$$y = a_0 + a_1x \quad (2.22)$$

*22 Ecuación de la recta*

Para aproximar la función dada por la tabla, el problema queda como el de minimizar.

$$\sum_{i=1}^n [a_0 + a_i x_i - y_i]^2 \quad (2.23)$$

### 23 Forma minimizada

Se tiene una función por minimizar de dos variables ( $a_0$  y  $a_1$ ), el procedimiento es derivar parcialmente con respecto a cada una de las variables e igualar a cero cada derivada, con lo cual se obtiene un sistema de dos ecuaciones algebraicas (Luthe, 1991).

$$\frac{\partial}{\partial a_0} \left[ \sum_{i=1}^n (a_0 + a_i x_i - y_i)^2 \right] \quad (2.24)$$

$$\frac{\partial}{\partial a_1} \left[ \sum_{i=1}^n (a_0 + a_i x_i - y_i)^2 \right]$$

### 24 Derivadas parciales

Se deriva dentro del signo de sumatoria

$$\sum_{i=1}^n \frac{\partial}{\partial a_0} [a_0 + a_i x_i - y_i]^2 = \sum_{i=1}^n 2[a_0 + a_i x_i - y_i] = 0 \quad (2.25)$$

$$\sum_{i=1}^n \frac{\partial}{\partial a_1} [a_0 + a_i x_i - y_i]^2 = \sum_{i=1}^n 2[a_0 + a_i x_i - y_i] x_i = 0$$

### 25 Derivadas parciales

Al desarrollar las sumatorias se tiene:

$$[a_0 + a_1 x_1 - y_1] + [a_0 + a_1 x_2 - y_2] + \dots + [a_0 + a_1 x_n - y_n] = 0 \quad (2.26)$$

$$[a_0 x_1 + a_1 x_1^2 - y_1 x_1] + [a_0 x_2 + a_1 x_2^2 - y_2 x_2] + \dots + [a_0 x_n + a_1 x_n^2 - y_n x_n] = 0$$

### 26 Sumatorias

Los coeficientes quedan definidos por el sistema:

$$\begin{cases} na_0 + a_1 \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n y_i \\ a_0 \sum_{i=1}^n x_i + a_1 \sum_{i=1}^n x_i^2 = \sum_{i=1}^n y_i x_i \end{cases} \quad (2.27)$$

27 Coeficientes del sistema

Aplicando regla de Cramer:

$$a_0 = \frac{\begin{vmatrix} \sum_{i=1}^n y_i & \sum_{i=1}^n x_i \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_i \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 \end{vmatrix}} = \frac{\left(\sum_{i=1}^n x_i^2\right)\left(\sum_{i=1}^n y_i\right) - \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)\left(\sum_{i=1}^n x_i y_i\right)}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2} \quad (2.28)$$

$$a_1 = \frac{\begin{vmatrix} n & \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i y_i \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_i \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 \end{vmatrix}} = \frac{n \left(\sum_{i=1}^n x_i y_i\right) - \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)\left(\sum_{i=1}^n y_i\right)}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2}$$

28 Sistema resuelto

Por lo tanto, la mejor línea recta que puede ajustarse a los puntos de la tabla es por la ecuación 2.22.

En donde

$$a_0 = \frac{(\sum x_i^2)(\sum y_i) - (\sum x_i)(\sum x_i y_i)}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (2.29)$$

$$a_1 = \frac{n(\sum x_i y_i) - (\sum x_i)(\sum y_i)}{n\sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}$$

*29 Coeficientes*

Se conoce ahora el concepto del acero y las formas de cómo puede adquirir una dureza superficial (tratamientos térmicos), también las diferentes escalas de dureza como son HR (dureza Rockwell), HB (dureza Brinell), HV (dureza Vickers), todas las pruebas de dureza tienen un mismo principio en la forma de realizar la prueba de dureza.

Se tienen algunas herramientas para el procesamiento de las imágenes, que se utilizan para la detección de los bordes como los filtros Sobel, Prewitt, Kirsch. Cuando se tiene los bordes, se usa mínimos cuadrados para relacionar esos puntos de borde con una recta.

## Capítulo 3

En este capítulo se desarrolla la metodología, comienza con la preparación de la muestra con un pulido a espejo para mejores resultados, después se realiza la indentación con una fuerza de .500 kgf y un tiempo de 15 segundos. Luego se toma la imagen por medio de la cámara, se segmenta la imagen para comenzar el análisis, utilizamos detector de bordes y mínimos cuadrados para encontrar la distancia en pixeles, por último relacionamos un valor de dureza (probeta patrón) con la distancia en pixeles que resulta del análisis de la imagen.

### 3 Metodología

#### 3.1. Sistema analizador de imágenes

##### 3.1.1. Preparación de la muestra.

La muestra se obtiene de acuerdo a la Figura 3-1.

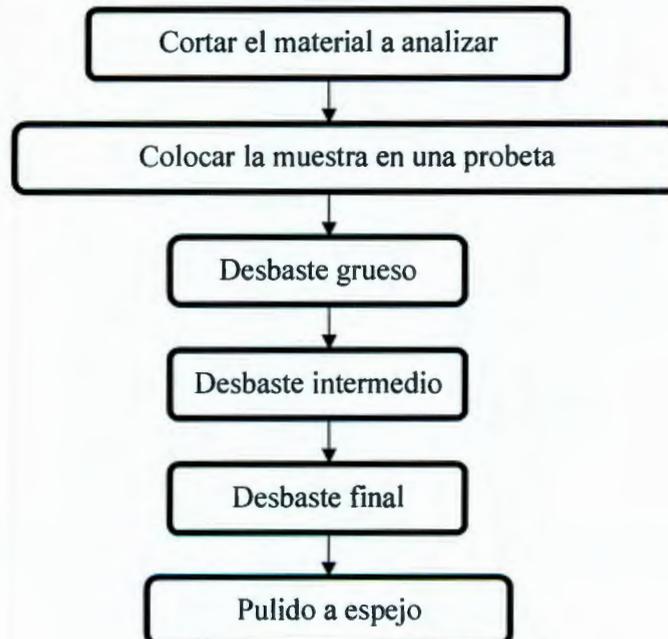
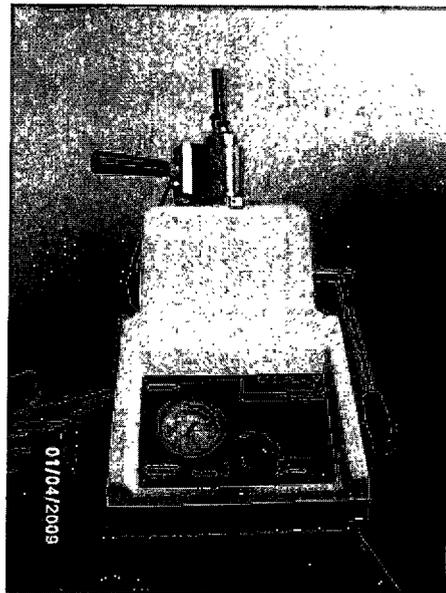


Figura 3-1 Diagrama de preparación de muestra

Se corta el material de forma transversal con el objetivo de analizar la parte interior, teniendo cuidado de no calentar demasiado la muestra, se recomienda usar refrigerante para no afectar la muestra ya que el sobrecalentamiento puede provocar cambios en la microestructura de la misma.

Se monta la muestra cortada en una probeta de baquelita con el objetivo que esta sea mucho más fácil de manipular, la muestra se obtuvo a una presión de 5 Kg. /cm<sup>2</sup> durante 20 minutos a temperatura constante, al término de este tiempo se enfrió lentamente con un disipador de calor con el objetivo de evitar cuarteaduras debido a un proceso de templado. La máquina con la que se obtuvo esta probeta es la que se muestra en la Figura 3-2.



**Figura 3-2 Máquina montadora de probetas**

Se comienza con un desbaste llamado grueso, que consiste en un desbaste en papel esmeril (lija) de tamaño 240 y 320 con ayuda de agua, el cambio entre papel esmeril se lleva a cabo cuando solo queden rayas del tamaño del papel esmeril anterior, es decir, se pasa a una papel esmeril 320 cuando en la muestra sólo se observan ralladuras de papel esmeril 240, para que esto sea más fácil de detectar se recomienda pulir la muestra en una dirección y después darle un giro de 90°, es importante señalar que no se debe aplicar una presión excesiva ya que esto puede provocar ralladuras profundas en la muestra que llevarán mucho trabajo y tiempo eliminarlas; y se tenga que comenzar el desbaste de nuevo.

Para eliminar las ralladuras dejadas por el papel esmeril de tamaño 320, se realiza un desbaste fino ahora con papel esmeril de tamaño 400 y 600; esta vez sin usar agua, nuevamente el paso de un papel esmeril a otro se lleva a cabo cuando sólo se observen ralladuras producidas por el papel esmeril de tamaño anterior, con este desbaste se desea también eliminar óxidos y otras impurezas del material que pueden influir en los resultados del análisis.



**Figura 3-3 Lijas para pulir las muestras.**

El desbaste final consta de los mismos pasos que los desbastes grueso e intermedio sólo que esta vez el papel esmeril será de tamaño 00 y 000, de igual forma cuando sólo se vean ralladuras producidas por el último papel esmeril, esta muestra está lista para el pulido.

El pulido de la muestra se lleva a cabo utilizando alúmina, de la que existen tres formas cristalográficas distintas: alfa, beta y gamma. De ellas la alfa y la gamma son las más utilizadas como abrasivos. La alúmina para el pulido metalográfico se puede preparar de la siguiente manera: mezclar de 100 a 150 gr. de alúmina por cada 1000 cm<sup>3</sup> de agua preferiblemente destilada y se disuelve aproximadamente durante 10 minutos. Para realizar el pulido es necesaria una pulidora metalográfica con el fin de facilitar la tarea al usuario, se coloca un paño sobre el disco giratorio y se empapa con la alúmina preparada anteriormente, el disco girará a 250 rpm. Se debe tener cuidado con la humedad en el paño, ya que si se humedece demasiado el pulido llevará mucho tiempo y si se seca la probeta se manchará; no se debe aplicar demasiada presión a la probeta, la probeta se coloca en el centro del disco y al final del pulido se gira la probeta en dirección opuesta al giro del disco, la probeta no lleva ningún ataque químico. Después

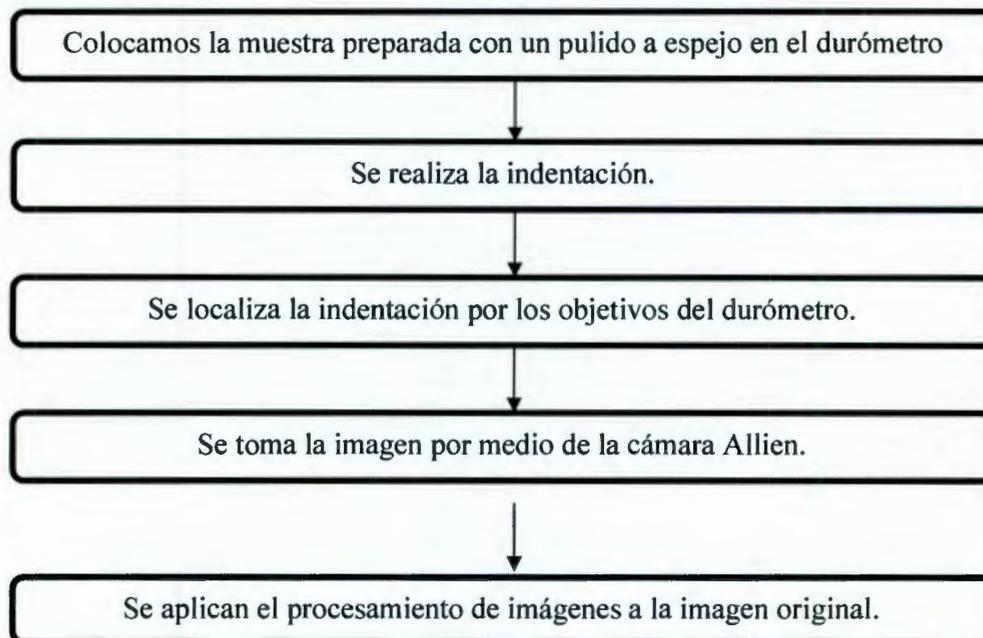
de estos pasos se tiene una muestra lista para ser analizada. Es de vital importancia señalar que si la muestra no fue preparada correctamente (pulido a espejo) los resultados no serán correctos, por lo que es muy importante la correcta preparación de la muestra.



**Figura 3-4 Maquina para pulir las muestras.**

### 3.1.2. Obtención de la imagen.

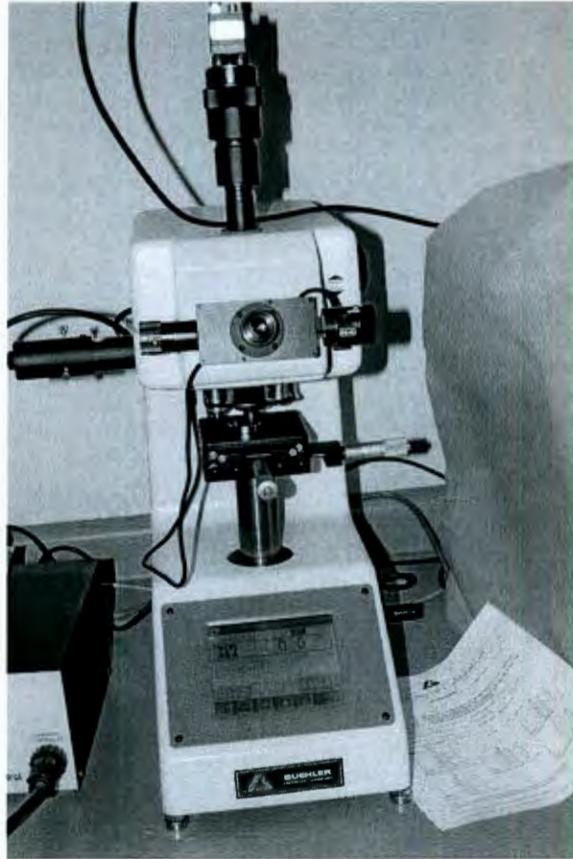
El proceso de obtención de la imagen se da a través del proceso mostrado en la Figura 3-5.



**Figura 3-5 Diagrama de obtención de la imagen para el análisis**

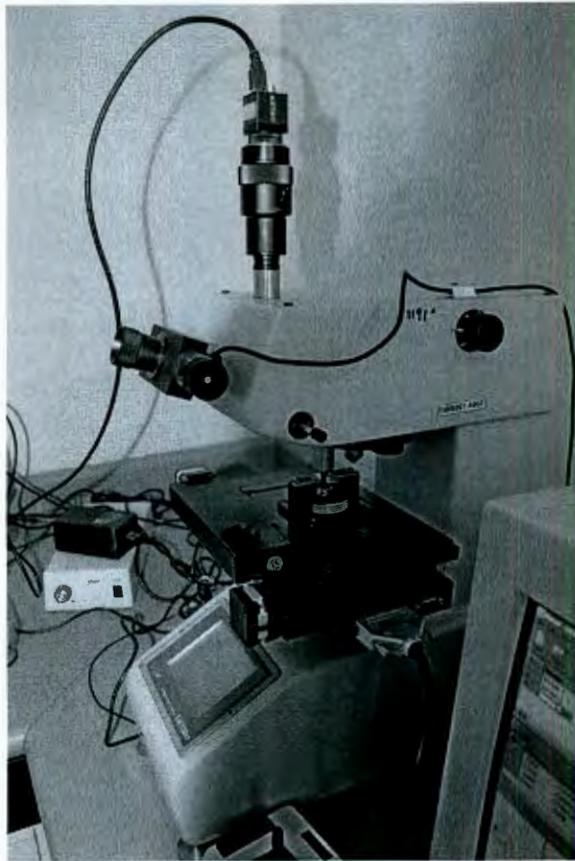
Se prepara la muestra de acuerdo a lo señalado en el tema anterior (3.1 *Preparación de la muestra*), tomando en cuenta todo lo allí señalado.

La muestra es llevada al durómetro, en este caso es un durómetro BUEHLER (Figura 3-6) ubicado en el laboratorio de metalografía de la Universidad Autónoma de Querétaro Campus San Juan del Río.



**Figura 3-6 Durómetro BUEHLER**

Una vez colocada la muestra y establecidos todos los aspectos del durómetro, se realizan el número de indentaciones (perfil de microdureza) requeridas por la norma ASTM E 384-09. Primero se toma un origen en la muestra, para que de ahí se comience con la primera indentación. Con una distancia entre cada indentación se realizan las otras cuatro indentaciones. En el durómetro se ajustan los parámetros que son el tiempo y la carga aplicada en la indentación. Estos son 20 segundos y 0.500 kgf respectivamente.



**Figura 3-7 Cámara Allien acoplada al durómetro.**

Después de realizadas cada una de las indentaciones, se toman las imágenes realizando un buen enfoque y una buena iluminación. Una vez guardadas las imágenes en la memoria de la computadora se da por terminado este procedimiento.

Nuevamente se hace énfasis en que, aunque la obtención de la muestra haya sido correctamente realizada (pulido a espejo), si la obtención de las imágenes no se hace adecuadamente, es decir, si las imágenes están borrosas (con nieve) o no fueron bien iluminadas, los resultados serán erróneos.

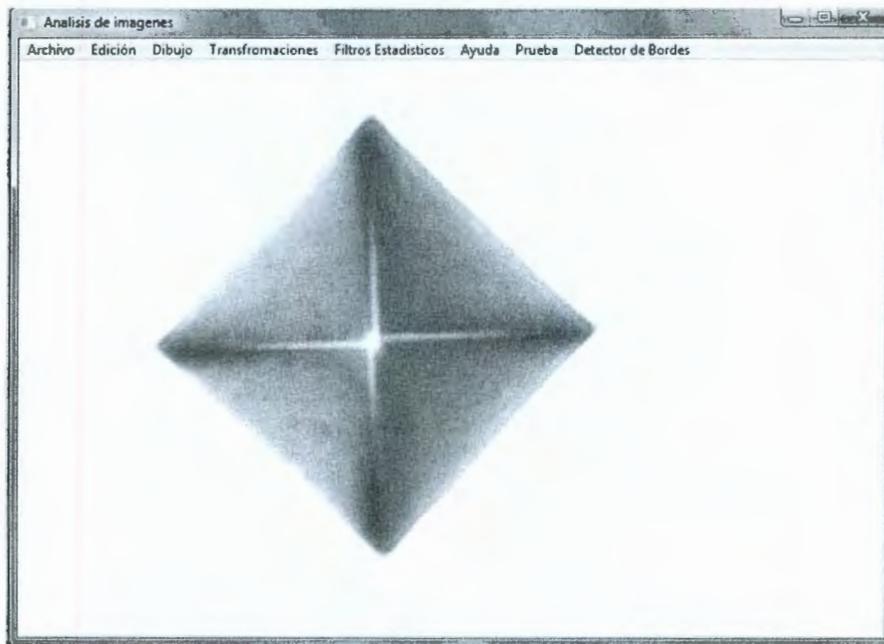
### 3.1.3. Análisis de la imagen.

El software se explica de manera gráfica en la Figura 3-8.



**Figura 3-8 Diagrama de flujo del software**

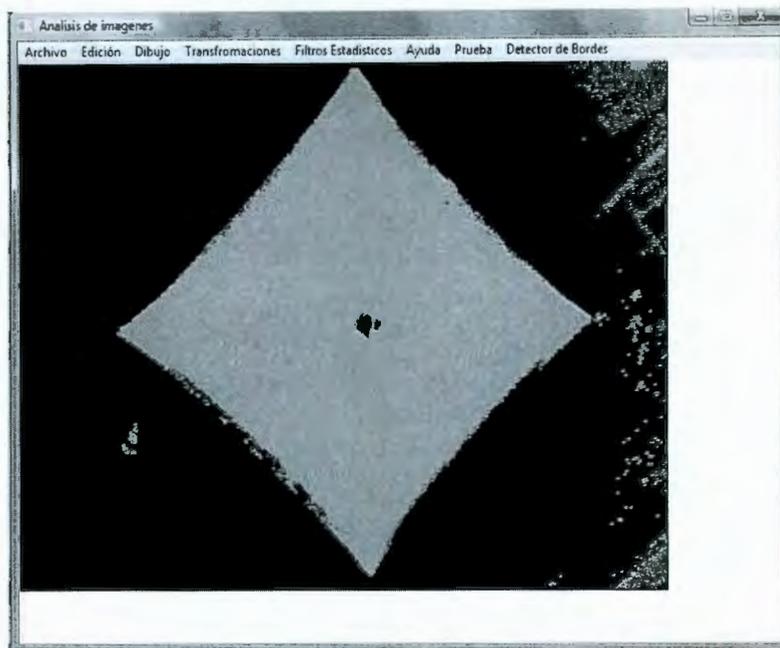
Para comenzar con la metodología se tiene la imagen original (ver Figura 3-9). Esta imagen es de la probeta patrón que nos ayudará en el ajuste del sistema. Como se aprecia, la imagen fue bien tomada y solo se ve la huella de indentación.



**Figura 3-9 Imagen original.**

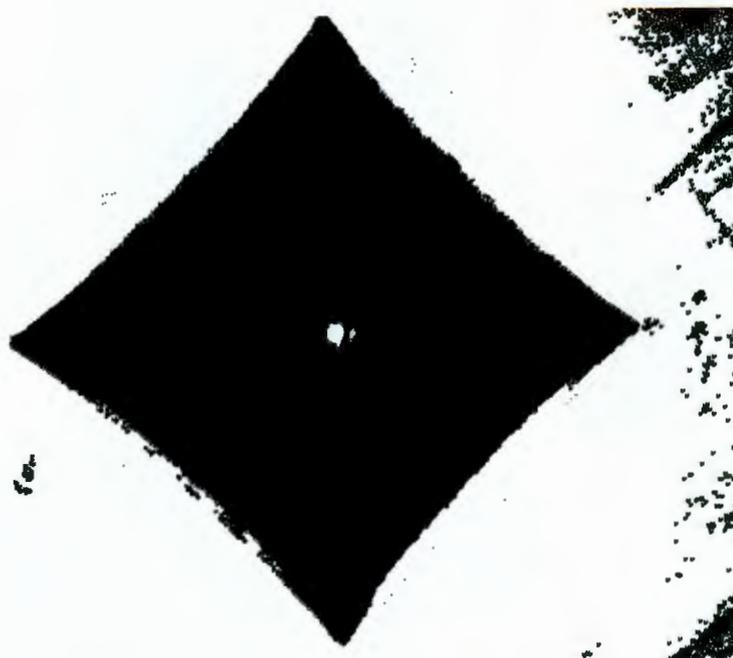
Después se aplica un primer procesamiento a la imagen para la eliminación de ruido y falsos bordes que pudieran aparecer que es una información que contamina la imagen. El ruido aparece en imágenes procedente de una gran variedad de fuentes. El proceso de adquisición de la imagen digital, que convierte una imagen óptica en una señal eléctrica continua que luego es muestreada, es el primer proceso por el cual el ruido aparece en imágenes digitales. En cada paso en el proceso hay fluctuaciones originadas por fenómenos naturales que añaden un valor aleatorio al valor exacto de la intensidad para un determinado píxel.

Se aplica un filtro detector de bordes (filtro de Robinsón) y queda el área de indentación muy clara como se ve en la Figura 3-10.



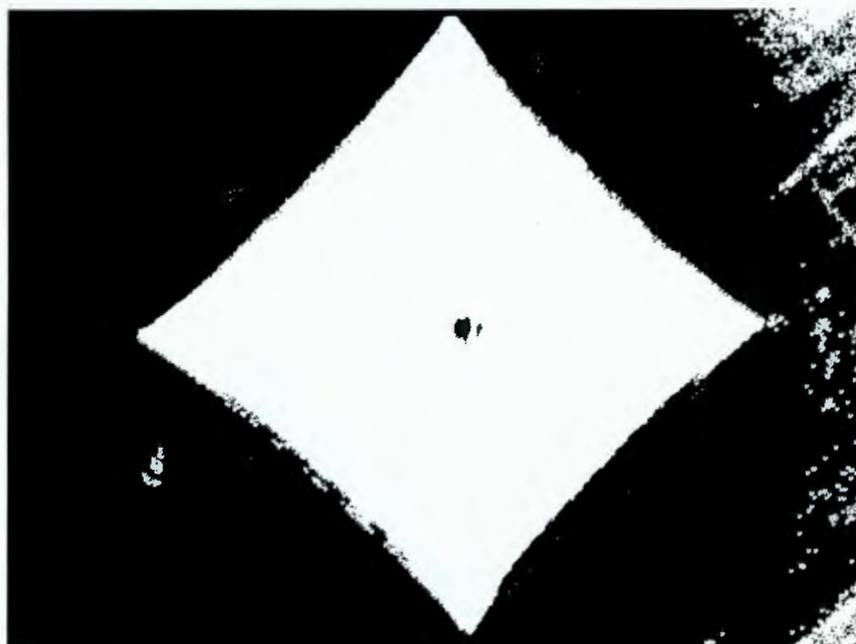
**Figura 3-10 Resultado de aplicar el filtro de Robinsón.**

Como se tiene la información en un nivel de gris, se saca el histograma que por si mismo no es un filtro, es solo la gráfica de los niveles de gris que se encuentra en nuestra imagen y la cantidad de veces que estos se encuentran, esto es de gran ayuda para saber donde se tienen más información y hacer los análisis en esos niveles de gris para realizar una umbralización correcta. Después se binariza la imagen con una umbralización que es la separación de los diferentes niveles de gris, (ver Figura 3-11) para tenerla en píxeles y así comenzar con el análisis de la imagen segmentada.



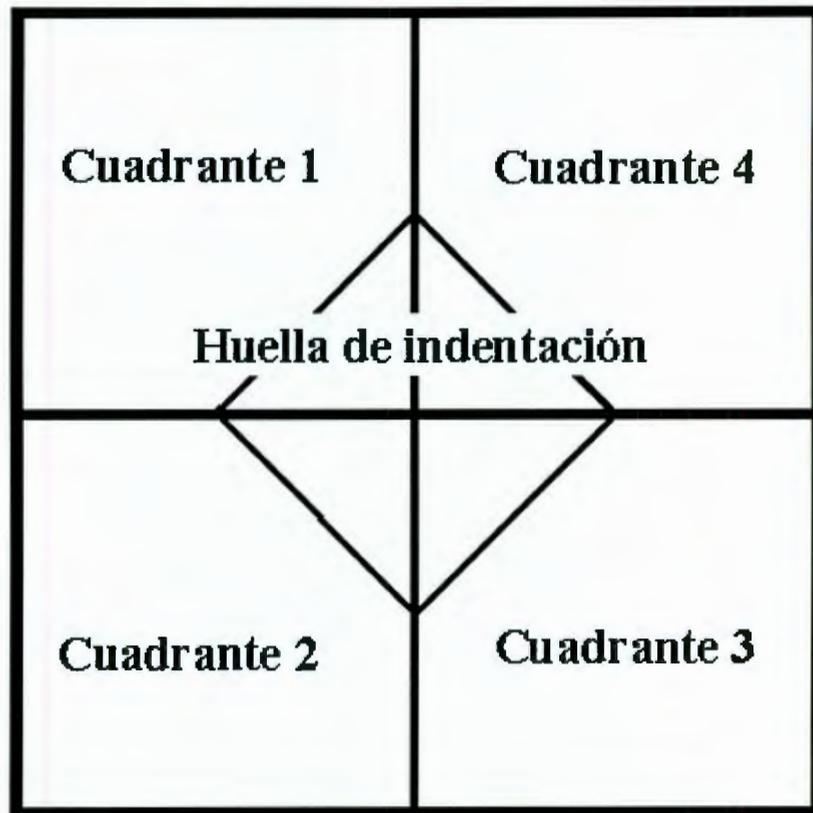
**Figura 3-11 Imagen binarizada con un umbral inferior y superior de 0 y 3 respectivamente.**

Con la binarización, la imagen esta en pixeles. Se tiene la huella en color negro; pero se invierte la imagen para aplicar la metodología propuesta (ver Figura 3-12, imagen complemento).



**Figura 3-12 Imagen invertida o en negativo.**

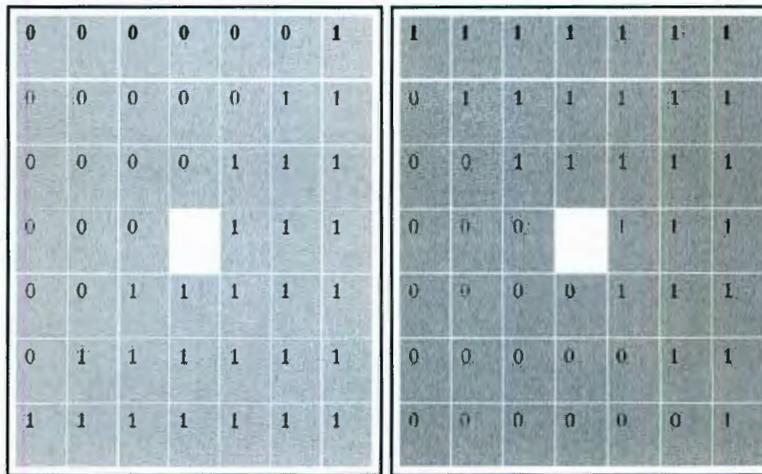
Se divide la imagen en cuatro secciones para encontrar los puntos de borde. Donde a cada una de las imágenes se le aplica una máscara direccional para obtener los puntos de interés. La imagen se divide en cuatro cuadrantes para llevar a cabo la detección de bordes por medio de filtros direccionales (ver Figura 3-13).



**Figura 3-13 Imagen dividida en cuadrantes.**

Se toma el primer cuadrante y se le aplica la máscara direccional (ver Figura 3-14a). El resultado que se obtiene son los puntos de borde del primer cuadrante (ver Figura 3-16); y así se continúa haciendo con cada uno de los cuadrantes restantes (ver Figura 3-17, Figura 3-18 y Figura 3-19).

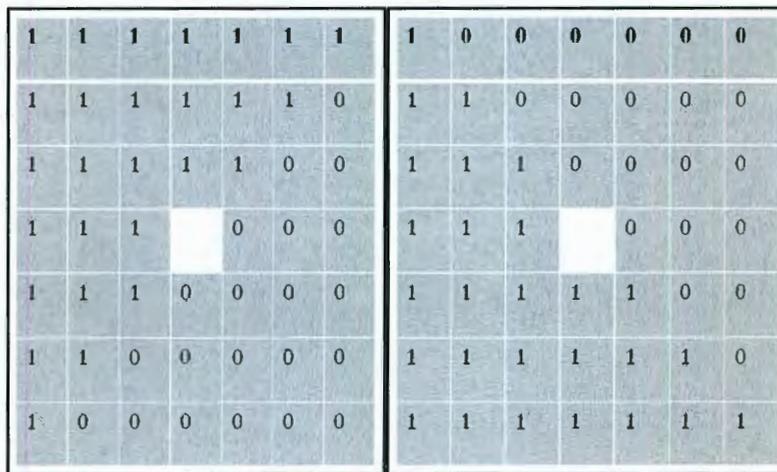
La máscara es de 7x7 en donde encontrará los puntos de bordes a cada cuadrante, sin alterar éstos. En la Figura 3-14 y Figura 3-15 se muestra las máscaras para cada cuadrante respectivamente. De esta forma se obtienen los puntos de borde que se requieren de cada uno de los cuadrantes (ver Figura 3-16, Figura 3-17, Figura 3-18 y Figura 3-19).



(a)

(b)

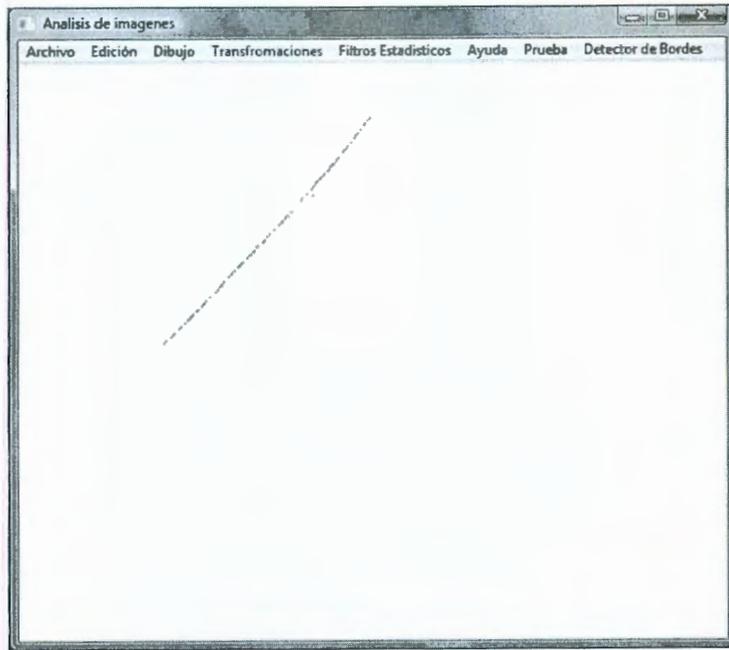
**Figura 3-14** Máscara direccional del primer cuadrante (a) y segundo cuadrante (b).



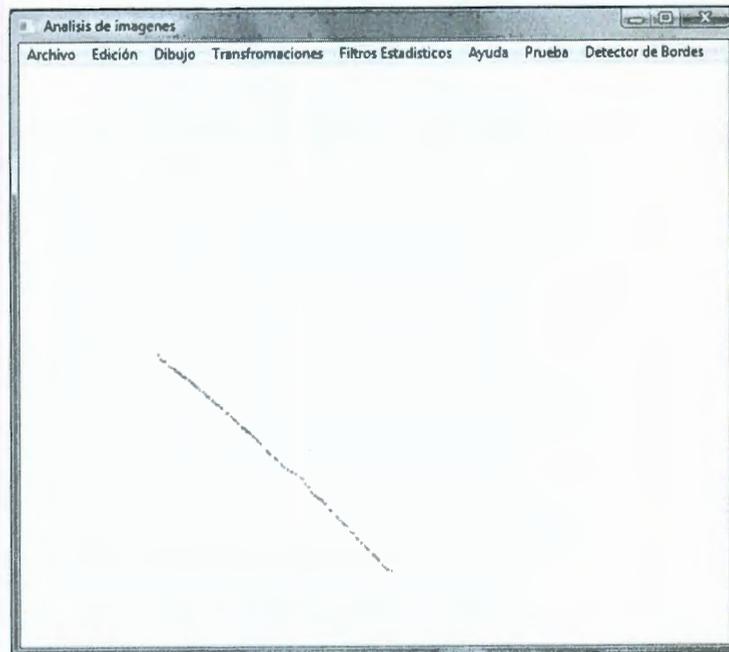
(c)

(d)

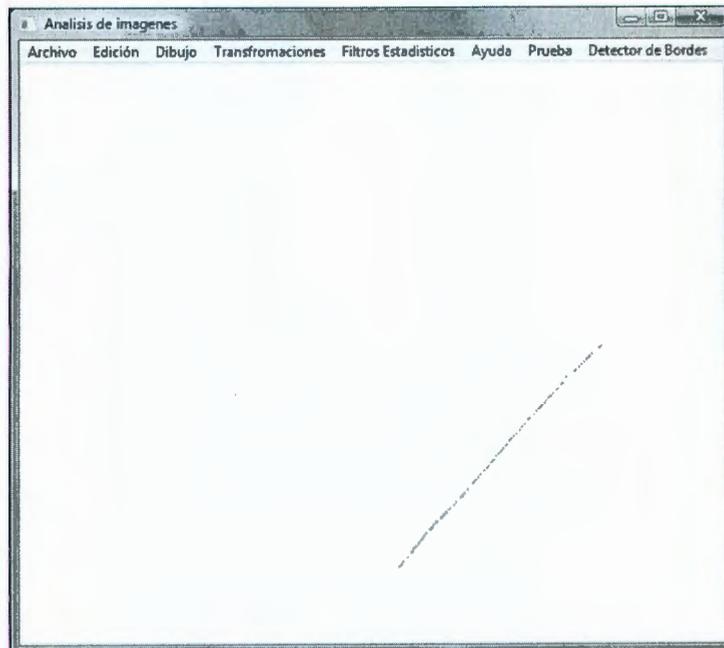
**Figura 3-15** Máscara direccional del tercer cuadrante (c) y cuarto cuadrante (d).



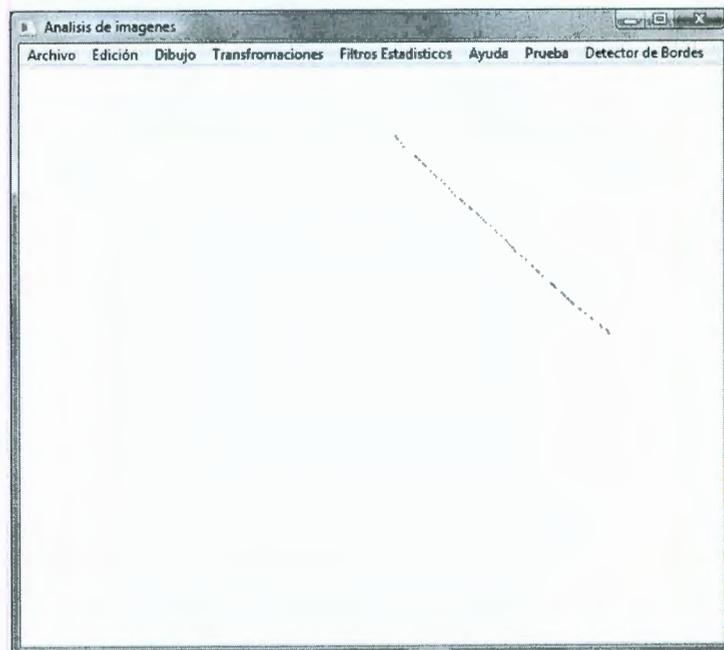
**Figura 3-16 Puntos de interés del cuadrante 1**



**Figura 3-17 Puntos de interés del cuadrante 2.**



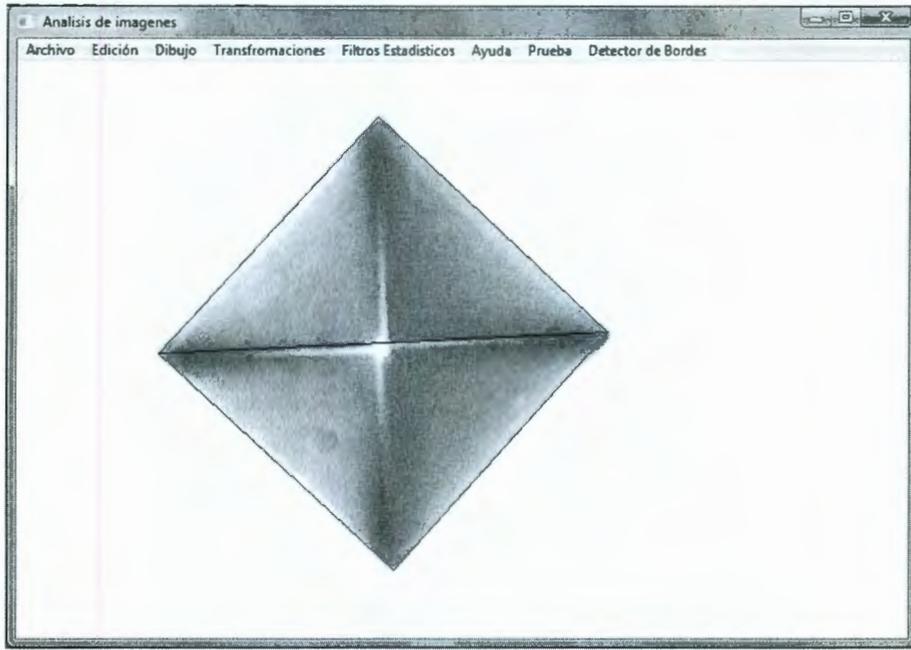
**Figura 3-18 Puntos de interés del cuadrante 3.**



**Figura 3-19 Puntos de interés del cuadrante 4.**

Esta máscara se aplica a cada uno de los cuadrantes. Teniendo los puntos de cada uno se aplica el método de mínimos cuadrados para obtener una ecuación que

mejor se ajuste a los puntos encontrados; que en este caso nos resultaran cuatro ecuaciones diferentes. Teniendo las cuatro ecuaciones; el siguiente paso es encontrar las intersecciones, así como la distancia en píxeles de una de las diagonales (ver Figura 3-20).



**Figura 3-20 Resultado del sistema.**

### **3.2. Ejemplo de prueba.**

#### **3.2.1. Medición en la probeta patrón.**

Ya con la distancia en píxeles se ajusta el sistema con una probeta patrón con la cual se cuenta en el laboratorio de la facultad de ingeniería campus San Juan del Río; de acuerdo a la norma ASTM E 384-99. Esta norma dice que se realicen cinco indentaciones y también cinco mediciones en cada una de éstas, para así tener un promedio y un rango de tolerancia. Éstas se realizan sobre la probeta patrón.

El ajuste se realizó de acuerdo a la norma ASTM 384-09.

Valor de Dureza: 701.3

Tipo de indentador: Vickers

Número de serie del indentador: V-329

Tiempo: 15 segundos

Carga: 500 gramos

Día del ajuste: 4/junio/2009

<b>A</b>		<b>D</b>	
1	36.4 $\mu\text{m}$	1	36.8 $\mu\text{m}$
2	36.1 $\mu\text{m}$	2	36.3 $\mu\text{m}$
3	35.9 $\mu\text{m}$	3	36.2 $\mu\text{m}$
4	36.5 $\mu\text{m}$	4	36.0 $\mu\text{m}$
5	36.7 $\mu\text{m}$	5	36.1 $\mu\text{m}$
<b>Promedio: 36.32 <math>\mu\text{m}</math></b>		<b>Promedio: 36.28 <math>\mu\text{m}</math></b>	
<b>Tolerancia: <math>\pm .40</math></b>		<b>Tolerancia: <math>\pm .40</math></b>	
<b>B</b>		<b>E</b>	
1	36.0 $\mu\text{m}$	1	36.6 $\mu\text{m}$
2	35.6 $\mu\text{m}$	2	35.9 $\mu\text{m}$
3	36.2 $\mu\text{m}$	3	36.1 $\mu\text{m}$
4	36.1 $\mu\text{m}$	4	36.7 $\mu\text{m}$
5	36.4 $\mu\text{m}$	5	36.3 $\mu\text{m}$
<b>Promedio: 36.06 <math>\mu\text{m}</math></b>		<b>Promedio: 36.32 <math>\mu\text{m}</math></b>	
<b>Tolerancia: <math>\pm .40</math></b>		<b>Tolerancia: <math>\pm .40</math></b>	
		<b>C</b>	
		1	36.6 $\mu\text{m}$
		2	36.9 $\mu\text{m}$
		3	36.7 $\mu\text{m}$
		4	36.3 $\mu\text{m}$
		5	36.6 $\mu\text{m}$
		<b>Promedio: 36.28 <math>\mu\text{m}</math></b>	
		<b>Tolerancia: <math>\pm .30</math></b>	

Figura 3-21 Ajuste del sistema.

La probeta patrón ayuda en el ajuste de nuestro sistema ya que se tiene el valor de dureza (700 HV). Esta probeta tiene la misma dureza en toda la superficie. Aquí en la Figura 3-22 se pueden ver las zonas de indentación.

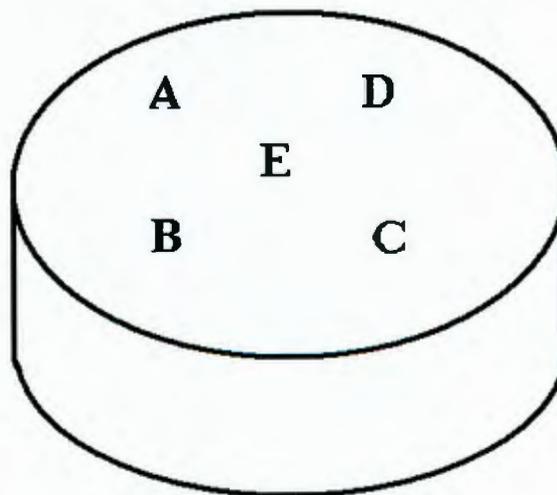
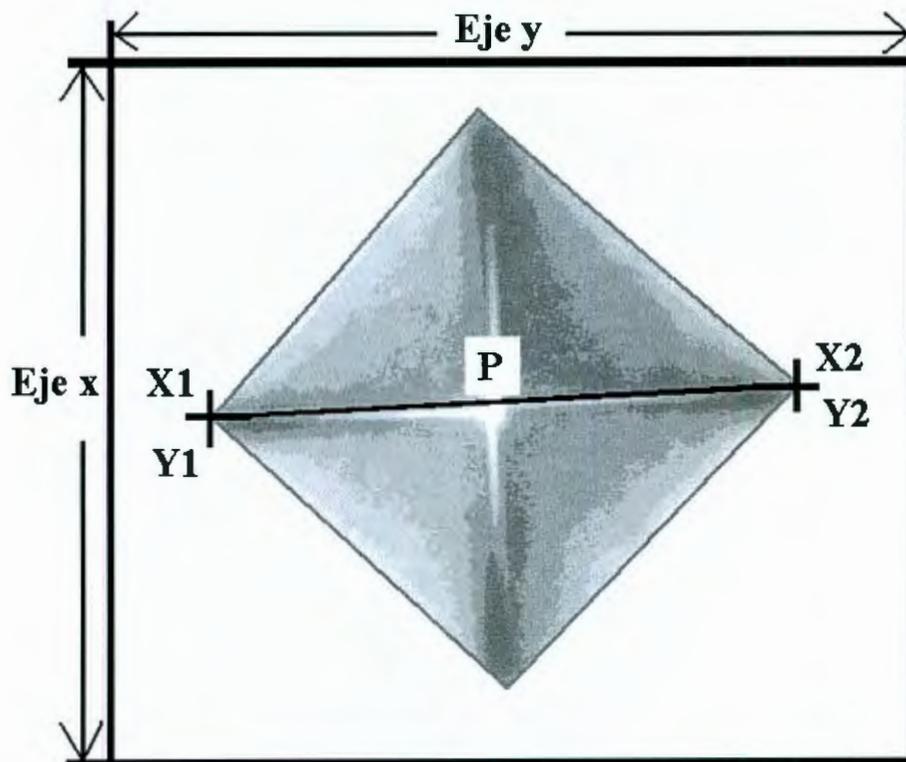


Figura 3-22 Probeta patrón.

Para el ajuste se realizan cinco indentaciones, de las cuales se toman cinco imágenes a cada indentación. Estas imágenes son procesadas con el software para encontrar las distancias de cada una en píxeles; como se tiene en la Tabla 2, se hizo la relación pixel-micra.

Pero como se aprecia en la Tabla 2, la indentación E se sale fuera de rango ( $\pm 10$ ) por eso se ignora al momento del ajuste. Esto sucedió por que las imágenes de la indentación E no fueron tomadas bien, de tal forma que, el sistema encuentra mucho ruido y cuando se aplica la máscara direccional da muchos puntos que no son de borde. En las otras indentaciones (A, B, C y D) se tiene mejor ajuste ya que están dentro de la tolerancia.



**Figura 3-23 Ajuste del sistema.**

Tabla 2 Ajuste del sistema.

Indentaciones	y1	x1	y2	x2	Distancia P P=Pixel	1 $\mu$ m= P
<b>A</b>						
1	119	244	499	228	380.336	10.448
2	122	244	501	228	379.337	10.448
3	118	240	500	226	382.256	10.448
4	120	245	500	229	380.336	10.448
5	123	244	497	227	374.386	10.448
Prom.					379.330	10.448
<b>B</b>						
1	135	313	506	279	372.554	10.448
2	136	309	508	279	373.207	10.448
3	138	310	506	277	369.476	10.448
4	136	309	502	277	367.396	10.448
5	134	312	507	278	374.546	10.448
Prom.					371.436	10.448
<b>C</b>						
1	126	269	504	234	379.616	10.448
2	128	270	502	234	375.728	10.448
3	122	274	504	234	384.088	10.448
4	127	274	500	235	375.033	10.448
5	126	274	503	238	378.714	10.448
Prom.					378.636	10.448
<b>D</b>						
1	138	261	509	223	372.941	10.448
2	134	260	510	221	378.017	10.448
3	135	259	511	220	378.017	10.448
4	135	251	516	228	381.693	10.448
5	130	236	509	234	379.005	10.448
Prom.					377.935	10.448
<b>E</b>						
1	122	272	514	260	392.183	10.448
2	133	282	515	260	382.632	10.448
3	107	276	488	272	381.020	10.448
4	94	264	490	272	396.080	10.448
5	97	260	492	271	395.153	10.448
Prom.					389.414	10.448

## Capítulo 4

En este capítulo se analizarán dos probetas, una probeta patrón del durómetro y la otra del un engrane que tiene un tratamiento de carbonitrurado. Se realizarán cuatro pruebas en el engrane con el sistema semiautomático y otras cuatro con el sistema automático, por último se comparan los resultados.

### 4 Resultados

#### 4.1. Experimentos

##### 4.1.1. Medición semiautomática.

Tomando en cuenta la forma en como se prepara la muestra; se hacen varias indentaciones en este caso en la probeta patrón en donde ya sabemos cual es la microdureza superficial (700 HV); con el durómetro Buehler y se tiene (ver Tabla 3):

**Tabla 3 Medición en la probeta patrón.**

Imagen	A	B	C	D	E
1	699.7 HV	715.4 HV	692.1 HV	684.6 HV	692.1 HV
2	711.4 HV	731.5 HV	680.9 HV	703.6 HV	719.4 HV
3	719.4 HV	707.5 HV	688.4 HV	707.5 HV	711.4 HV
4	695.9 HV	711.4 HV	703.6 HV	715.4 HV	688.4 HV
5	688.7 HV	699.7 HV	692.1 HV	711.4 HV	703.6 HV
Prom.	703.1 HV	713.1 HV	691.4 HV	704.5 HV	702.1 HV

En la medición anterior, como la norma lo indica, se realizan cinco mediciones en la misma indentación para obtener un promedio; donde se aprecia la diferencia en las mediciones de una misma indentación. En la medición semiautomática resulta un error

humano debido a las líneas de medición del mismo durómetro, que tienen una incertidumbre de 4.5 micras. Nos lleva a tener un rango de  $\pm 100$  HV.

Se tiene ahora una muestra de un engrane (ver Figura 4-1) del cual se conoce el valor de dureza (ver Figura 4-2). Con éste valor conocido; la prueba de microdureza es de la siguiente manera.



Figura 4-1 Engrane analizado

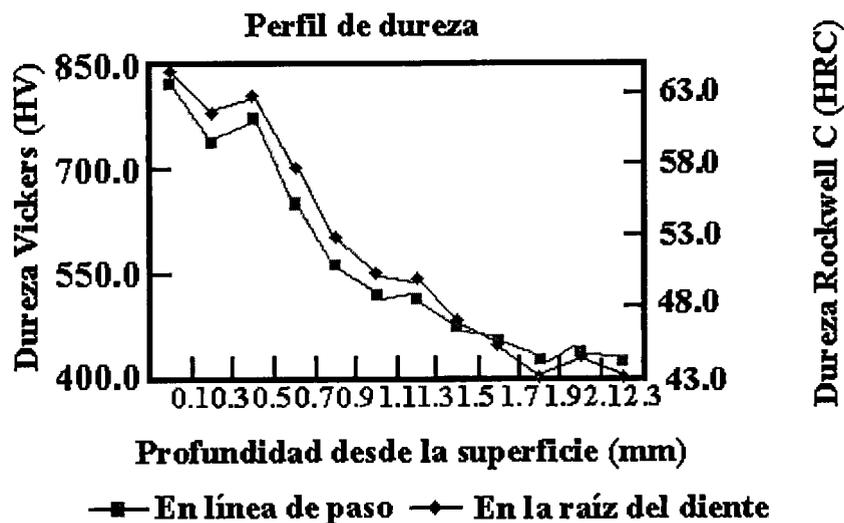


Figura 4-2 Perfil de dureza en función de la profundidad bajo la superficie.

En el engrane se realizan cuatro pruebas; la primera en la cresta del diente, la segunda se realizó en la línea de paso, la tercera en el valle y la cuarta fue para corroborar los datos de la segunda prueba tomando el lado contrario del diente (ver

Figura 4-3). En la Figura 4-4 se muestra la forma en que se realizan las indentaciones (perfil de dureza).

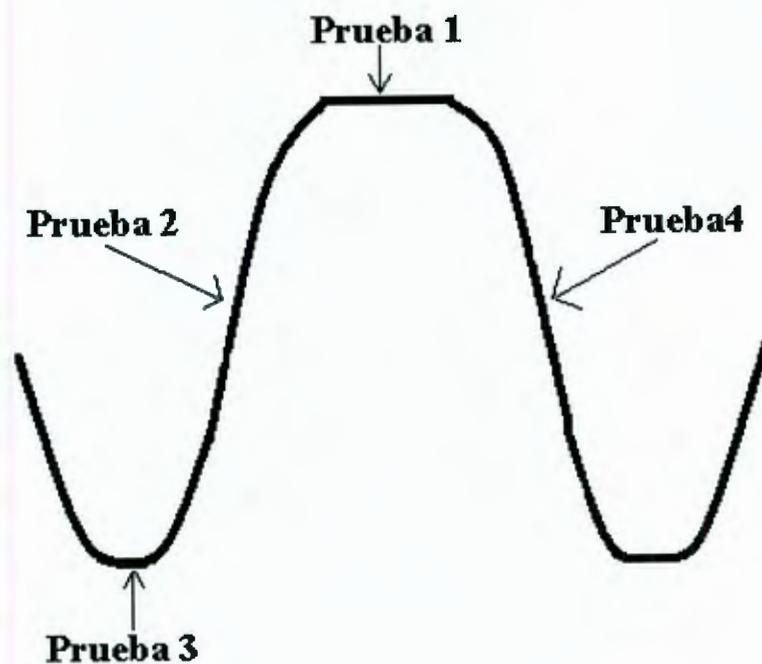
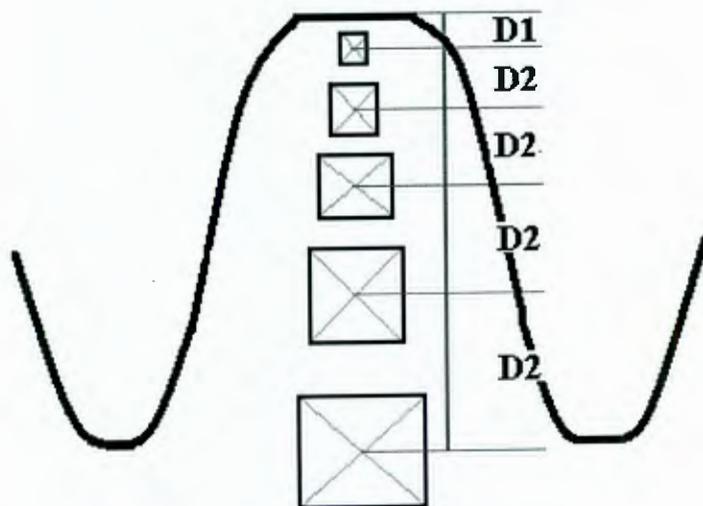


Figura 4-3 Representación del engrane.



**D1= distancia del borde del diente  
a la primera indentación**

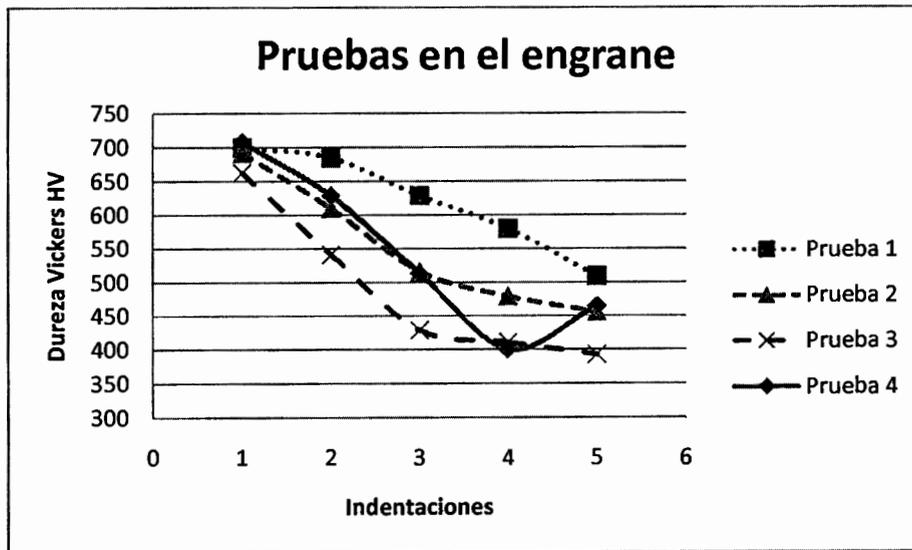
**D2= distancia entre cada indentación**

Figura 4-4 Perfil de microdureza.

**Tabla 4 Medición semiautomática del engrane.**

Indentaciones	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4
<b>A</b>	699.7 HV	692.1 HV	662.8 HV	707.5 HV
<b>B</b>	684.6 HV	609.5 HV	540.9 HV	628.4 HV
<b>C</b>	628.7 HV	515.7 HV	428.8 HV	513.3 HV
<b>D</b>	579.5 HV	478.9 HV	410.9 HV	400.7 HV
<b>E</b>	508.5 HV	455.8 HV	392.5 HV	464.1 HV

Se tienen ahora las gráficas (ver Figura 4-5) de cada una de las pruebas, donde se puede ver la similitud entre éstas, ya que llevan una misma curva con un poco de variaciones.



**Figura 4-5 Pruebas en el engrane con el sistema semiautomático.**

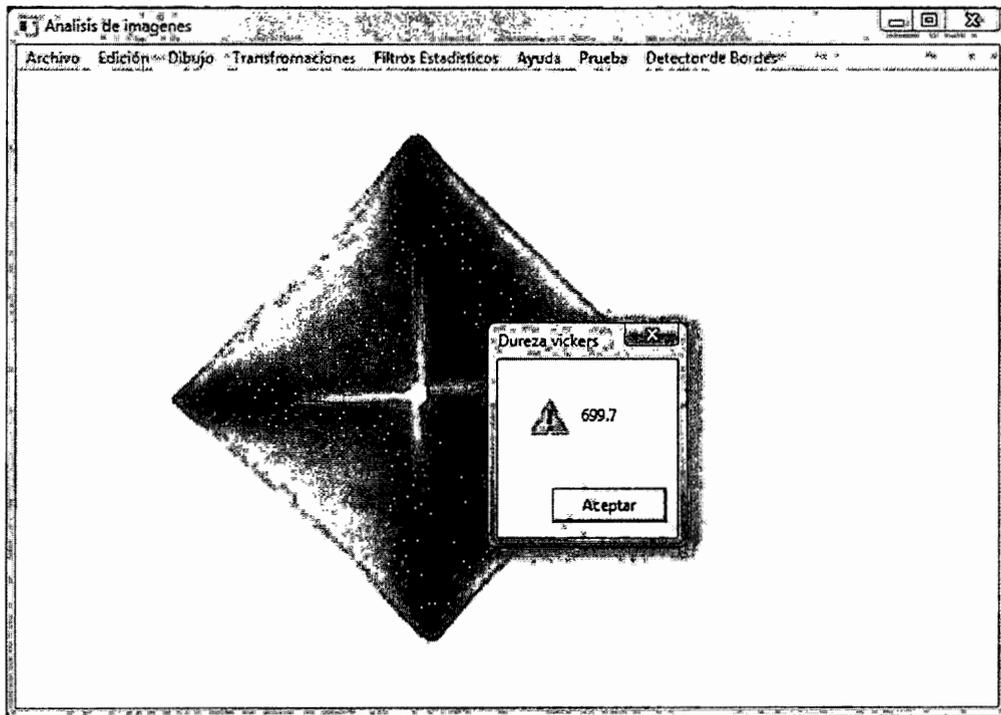
#### 4.1.2. Medición automática

Ahora se realiza la medición con el sistema programado, de la misma forma que en la medición semiautomática; se comienza en la probeta patrón (ver Tabla 5). Para

esta medición se toma la misma imagen; en la cual se midió las cinco veces en la medición semiautomática. En la Figura 4-6 se aprecia el resultado del sistema-

**Tabla 5 Medición automática en la probeta patrón.**

Indentación	Distancia $\mu\text{m}$	Distancia P	Dureza Vickers
A	36.399	380.336	699.7
B	35.845	374.546	721.4
C	36.481	378.714	696.5
D	36.414	378.017	699.1
E	36.703	381.02	688.1

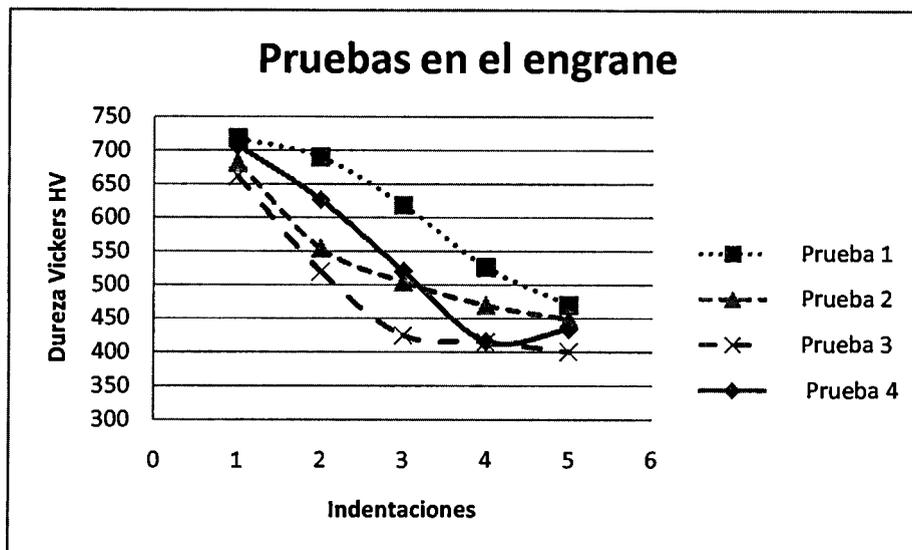


**Figura 4-6 Resultado de la medición en escala Vickers.**

Con la probeta del engrane se obtienen los valores de la Tabla 6. En donde muestra una clara similitud con la información del engrane en la Figura 4-2. Al igual en la Figura 4-7 se muestra el perfil de dureza para cada prueba realizada en el engrane.

**Tabla 6 Medición en el engrane con el sistema automático.**

Indentaciones	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4
A	717.9 HV	682.2 HV	661.6 HV	707.4 HV
B	689.8 HV	554.3 HV	519.3 HV	626.2 HV
C	618.3 HV	503.8 HV	424.8 HV	520.0 HV
D	526.1 HV	469.3 HV	414.9 HV	415.6 HV
E	469.7 HV	448.6 HV	400.6 HV	433.8 HV



**Figura 4-7 Pruebas en el engrane con el sistema automático.**

#### 4.2. Discusión de resultados

En la Figura 4-8 se aprecia la similitud de las dos gráficas; con una pequeña variación, con lo cual se puede validar el sistema de medición. Esto también en la Figura 4-9, Figura 4-10 y Figura 4-11. Se aprecia una pequeña diferencia, quizás debida

por la misma calidad de las imágenes o por el error que se tuvo al realizar la medición semiautomática. Esta pequeña variación no afectó para determinar los resultados del sistema ya que como se muestra el perfil de dureza siempre converge en las pruebas.

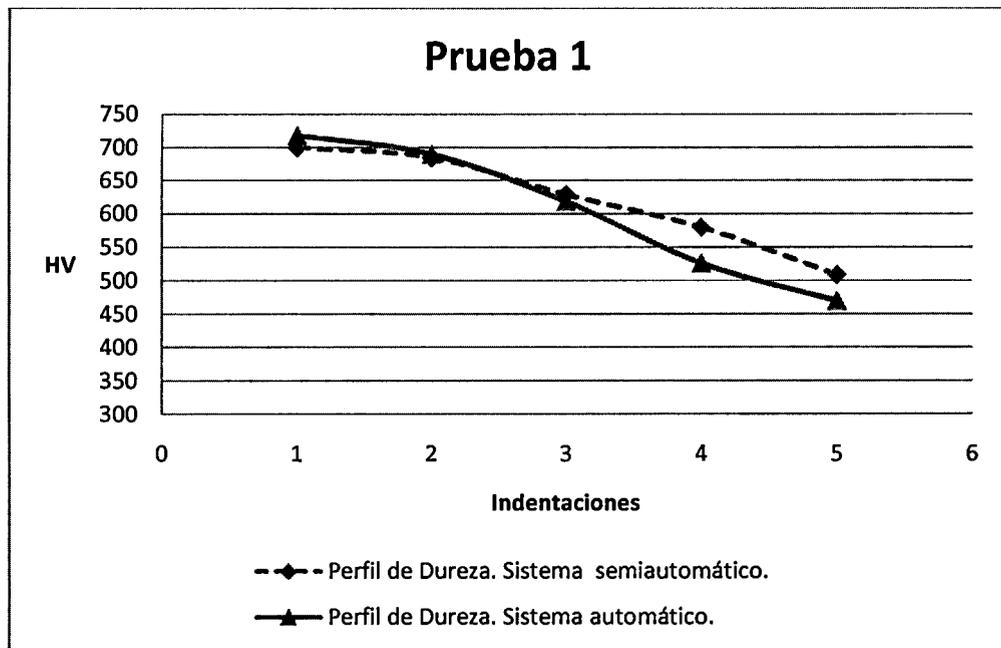


Figura 4-8 Comparación de los resultados obtenidos en la prueba 1.

Tabla 7 Diferencia en % de la prueba 1.

Semiautomático 100%	Automático	Diferencia en %
699.7 HV	717.9 HV	2.60
684.6 HV	689.8 HV	0.75
628.7 HV	618.3 HV	-1.65
579.5 HV	526.1 HV	-9.21
508.5 HV	469.7 HV	-7.63

Se tienen las diferencias en porcentajes de la prueba 1, donde las tres primeras indentaciones están dentro del rango de tolerancia con respecto al ajuste realizado con la probeta patrón. Las dos últimas indentaciones quedan fuera de la tolerancia, entonces se puede decir que la toma de las imágenes debe realizarse muy cuidadosamente para evitar estas variaciones fuera de rango.

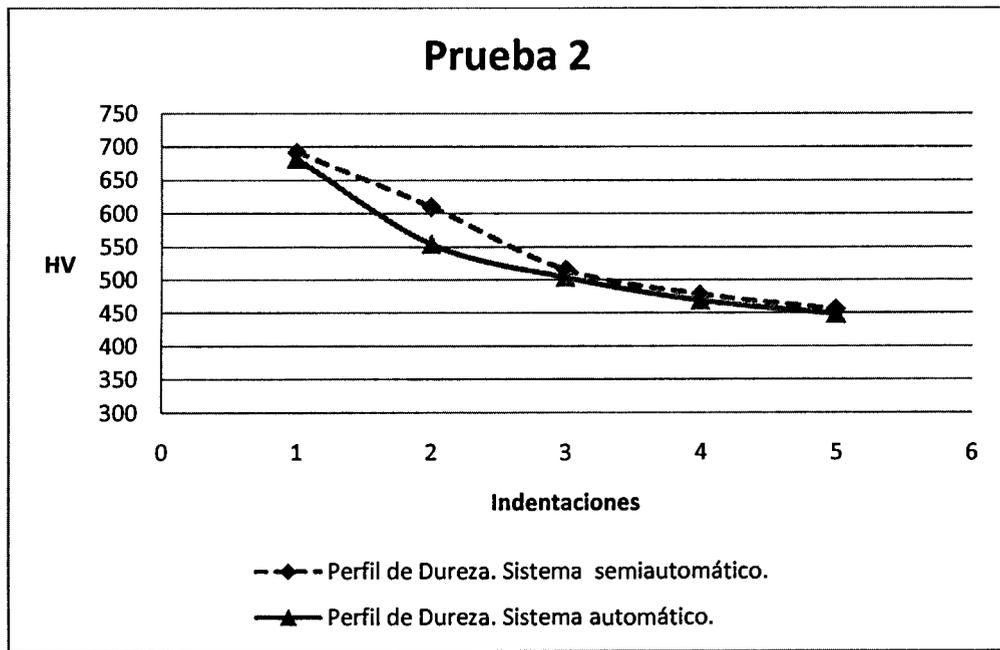
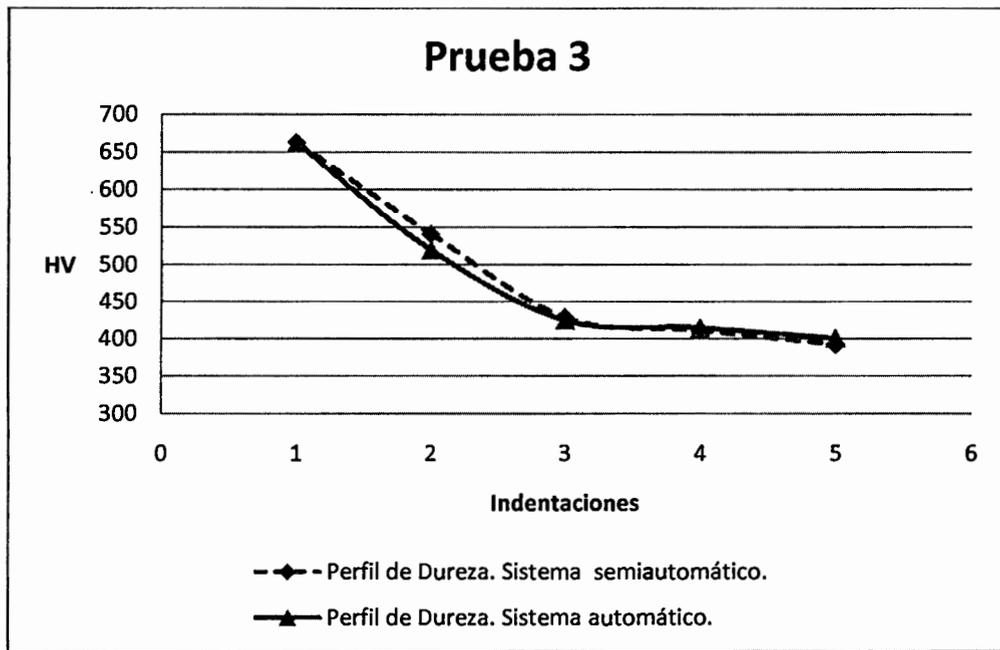


Figura 4-9 Comparación de los resultados obtenidos en la prueba 2.

Tabla 8 Diferencia en % de la prueba 2.

Semiautomático 100%	Automático	Diferencia en %
692.1 HV	682.2 HV	-1.43
609.5 HV	554.3 HV	-9.05
515.7 HV	503.8 HV	-2.30
478.9 HV	469.3 HV	-2.00
455.8 HV	448.6 HV	-1.57

Se tienen las diferencias en porcentajes de la prueba 2, donde la primera indentación así como las últimas tres están dentro del rango de tolerancia con respecto al ajuste realizado con la probeta patrón. La segunda indentación queda fuera de la tolerancia, entonces se puede decir que la toma de las imágenes debe realizarse muy cuidadosamente para evitar estas variaciones fuera de rango.

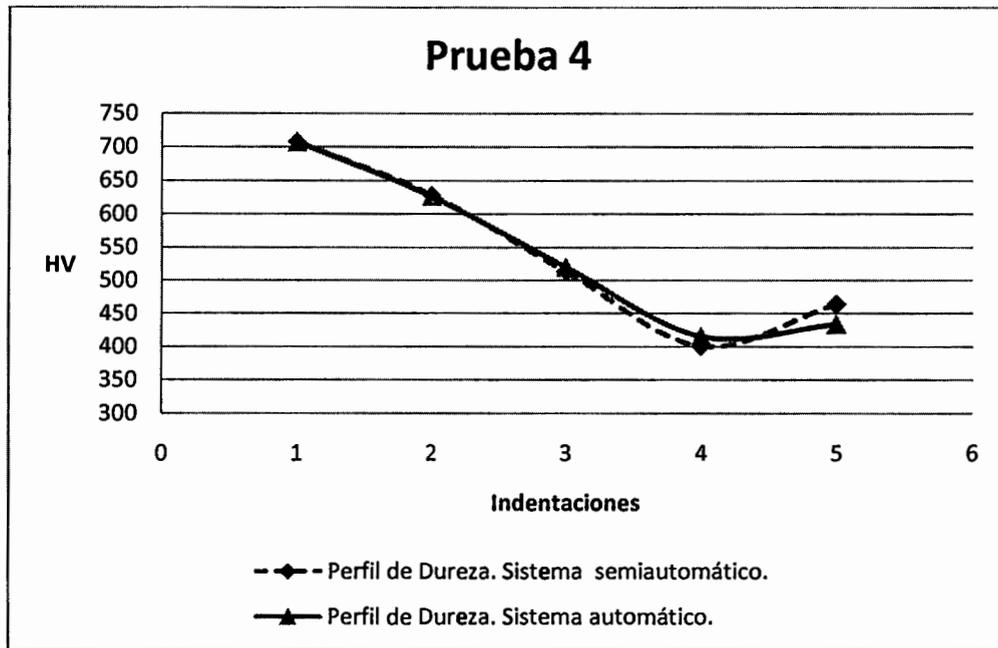


**Figura 4-10 Comparación de los resultados obtenidos en la prueba 3.**

**Tabla 9 Diferencia en % de la prueba 3.**

Semiautomático 100%	Automático	Diferencia en %
662.8 HV	661.6 HV	-0.18
540.9 HV	519.3 HV	-3.99
428.8 HV	424.8 HV	-0.93
410.9 HV	414.9 HV	0.97
392.5 HV	400.6 HV	2.06

Se tienen las diferencias en porcentajes de la prueba 3, donde las indentaciones están dentro del rango de tolerancia con respecto al ajuste realizado con la probeta patrón. En esta prueba se puede verificar que al realizar una buena toma de imágenes, el sistema de análisis de imágenes tiene un buen desempeño y se puede optimizar el tiempo requerido para obtener el perfil de dureza.



**Figura 4-11 Comparación de los resultados obtenidos en la prueba 4.**

**Tabla 10 Diferencia en % de la prueba 4.**

Semiautomático 100%	Automático	Diferencia en %
707.5 HV	707.4 HV	-0.01
628.4 HV	626.2 HV	-0.35
513.3 HV	520.0 HV	1.30
400.7 HV	415.6 HV	3.71
464.1 HV	433.8 HV	-6.52

Se tienen las diferencias en porcentajes de la prueba 4, donde las cuatro primeras indentaciones están dentro del rango de tolerancia con respecto al ajuste realizado con la probeta patrón. La última indentación queda fuera de la tolerancia, entonces se puede decir que la toma de las imágenes debe realizarse muy cuidadosamente para evitar estas variaciones fuera de rango.

Por último se tienen algunos de los algoritmos programados en el sistema de análisis de microdureza Vickers (ver Figura 4-12, Figura 4-13 y Figura 4-14). Estos algoritmos se realizaron de manera individual y al final se compacto en uno solo para aumentar su rapidez en el análisis de las imágenes (ver Figura 4-15).

## FILTRO DE ROBINSON

```
Desde y=1 hasta y<imagenl->sy-1
  Desde x=1 hasta x<imgl->sx-1
    Auxiliar=0;
    Desde c=y-1 hasta c<=y+1
      Desde f=x-1 hasta f<=x+1
        Z[auxiliar]= imagenl->p[c][f]           //valor del pixel
        Auxiliar ++;
      r0=(-1*Z[1]+0*Z[2]+1*Z[3]-2*Z[4]+0*Z[5]+2*Z[6]-3*Z[7]+0*Z[8]+1*Z[9]);
      r1=( 0*Z[1]+1*Z[2]+2*Z[3]-1*Z[4]+0*Z[5]+1*Z[6]-2*Z[7]-1*Z[8]+0*Z[9]);
      r2=( 1*Z[1]+2*Z[2]+1*Z[3]+0*Z[4]+0*Z[5]+0*Z[6]-1*Z[7]-2*Z[8]-1*Z[9]);
      r3=( 2*Z[1]+1*Z[2]+0*Z[3]+1*Z[4]+0*Z[5]-1*Z[6]+0*Z[7]-1*Z[8]-2*Z[9]);
      r4=( 1*Z[1]+0*Z[2]-1*Z[3]+2*Z[4]+0*Z[5]-2*Z[6]+1*Z[7]+0*Z[8]-1*Z[9]);
      r5=( 0*Z[1]-1*Z[2]-2*Z[3]+1*Z[4]+0*Z[5]-1*Z[6]+2*Z[7]+1*Z[8]+0*Z[9]);
      r6=(-1*Z[1]-2*Z[2]-1*Z[3]+0*Z[4]+0*Z[5]+0*Z[6]+1*Z[7]+2*Z[8]+1*Z[9]);
      r7=(-2*Z[1]-1*Z[2]+0*Z[3]-1*Z[4]+0*Z[5]+1*Z[6]+0*Z[7]+1*Z[8]+2*Z[9]);

      Si (r0>r1>r2>r3>r4>r5>r6>r7)
        G= r0;
      Si (r1>r2>r3>r4>r5>r6>r7>r0)
        G= r1;
      Si (r2>r3>r4>r5>r6>r7>r0>r1)
        G= r2;
      Si (r3>r4>r5>r6>r7>r0>r1>r2)
        G= r3;
      Si (r4>r5>r6>r7>r0>r1>r2>r3)
        G= r4;
      Si (r5>r6>r7>r0>r1>r2>r3>r4)
        G= r5;
      Si (r6>r7>r0>r1>r2>r3>r4>r5)
        G= r6;
      Si (r7>r0>r1>r2>r3>r4>r5>r6)
        G= r7;
      Si (G>255)
        G= 255;
      Si (G<0)
        G= 0;
```

Figura 4-12 Algoritmo del filtro detector de bordes

## FILTRO DIRECCIONAL

```
Auxiliar= 0
Desde x=0 hasta x<=49
  Z[x]=0
  imagen_limp_iar (imagen2)
  Toma Imagen (imagen1)
  MaxX= imagen1->sx
  MaxY= imagen1->sy
  DivX= (maxX/2)
  DivY= (maxY/2)
  Desde x=divX hasta x<img1->sx-4
    Desde y=4 hasta y<=divY
      Si imagen1->p [y][x]
        Auxiliar++
        Coordenada y [auxiliar]= y
        A12 = y + A12
        A22= (y*y)+A22
        Coordenada x [auxiliar]= x
        Z1= x + Z1
        A21 = A12
        Z2= (x*y)+Z2
        y=divY

      // Calculo
      A11= auxiliar
      A21= A12
      d12= A11*A22-A12*A21
      Ca2 = (A22*Z1-A12*Z2)/d12
      Cb2 = (A11*Z2-A21*Z1)/d12
      D12= Cb2-Cb1
      M12= Ca2+Cb1
      M22= Ca1+Cb2
      M32= Ca1-Ca2
      vx1= (M12-M22)/D12
      vy1= M32/D12
      vx1= absoluto (vx1)
      vy1= absoluto (vy1)

      p lx= vx1
      p ly= vy1
//      p3x= vx3
//      p3y= vy3
//      R= sqrt ((p3x-p lx)*(p3x-p lx) + (p3y-p ly)*(p3y-p ly))
      Imagen2->p [p ly][p lx]= 255
```

Figura 4-13 Algoritmo del filtro direccional

## MINIMOS CUADRADOS

```

Desde x=0 hasta x<=49
  Z[x]=0
Imagen_hmpiar (imagen2)
Toma Imagen (imagen1)
MaxX= imagen1->sx
MaxY= imagen1->sy
DivX= (maxX/2)
DivY= (maxY/2)

Desde y=4 hasta y<=div Y+20
  Desde x=div X hasta x<img1->sx-4
    Si (imagen1->p [y][x])
      Auxiliar=0
      Desde c=y-3 hasta c<=y+3
        Desde f=x-3 hasta f<=x+3
          Auxiliar++
          Z[auxiliar]= imagen1->p [c][f]
          Auxiliar=0
      G1=(Z[2]+Z[3]+Z[4]+Z[5]+Z[6]+Z[7]+Z[10]+Z[11]+Z[12]+Z[13]+Z[14]
        +Z[18]+Z[19]+Z[20]+Z[21]+Z[26]+Z[27]+Z[28]+Z[34]+Z[35]+Z[42])
      G2=(Z[1]+Z[8]+Z[9]+Z[15]+Z[16]+Z[17]+Z[22]+Z[23]+Z[24]+Z[29]+Z[30]
        +Z[31]+Z[32]+Z[33]+Z[36]+Z[37]+Z[38]+Z[39]+Z[40]+Z[41]+Z[43]
        +Z[44]+Z[45]+Z[46]+Z[47]+Z[48]+Z[49]);

    Si (G1=0 && G2>255)
      Imagen2->p [y][x]= 255
      Imagen1->p [y][x]=0

```

Figura 4-14 Algoritmo de mínimos cuadrados

## DUREZA VICKERS

```

On FILTRO_BORDES (hwnd);
On MÁSCARA_DIRECCIONAL1 (hwnd);
On MINIMOS_CUADRADOS (hwnd);
On DESHACER (hwnd);
On FILTRO_BORDES (hwnd);
On MÁSCARA_DIRECCIONAL2 (hwnd);
On MINIMOS_CUADRADOS (hwnd);
On DESHACER (hwnd);
On FILTRO_BORDES (hwnd);
On MÁSCARA_DIRECCIONAL3 (hwnd);
On MINIMOS_CUADRADOS (hwnd);
On DESHACER (hwnd);
On FILTRO_BORDES (hwnd);
On MÁSCARA_DIRECCIONAL4 (hwnd);
On MINIMOS_CUADRADOS (hwnd);
On DESHACER (hwnd);
On FILTRO_BORDES (hwnd);
On MÁSCARA_DIRECCIONAL11 (hwnd);
On MINIMOS_CUADRADOS (hwnd);

Imagen de Entrada ->p unto 1 [p 1y] [p 1x]=255;
Imagen de Entrada ->p unto 2 [p 2y] [p 2x]=255;
Imagen de Entrada ->p unto 3 [p 3y] [p 3x]=255;
Imagen de Entrada ->p unto 4 [p 4y] [p 4x]=255;
Distancia en pixeles= sqrt (((p 3x-p 1x)*(p 3x-p 1x)) + ((p 3y-p 1y)*(p 3y-p 1y)));
Distancia en micras= (Distancia en pixeles/10.449)/1000;
DV= (.927/ (Distancia en micras * Distancia en micras));

```

Figura 4-15 Algoritmo final del sistema

### 5 Conclusiones

Se cumplieron los objetivos planteados, que era el desarrollar un algoritmo en lenguaje C que midiera la huella dejada por el indentador sobre el material a analizar. De la imagen, se toma la huella para relacionarla con la microdureza del material. El tiempo de la medición se reduce considerablemente; para analizar una muestra ya preparada y realizarle tres o cuatro pruebas para obtener el perfil de dureza con el durómetro semiautomático se lleva aproximadamente dos horas. Estas condiciones incrementan el error humano, ya que se presentan factores como fatiga y tedio al realizar las varias mediciones de manera continua. Ya con el sistema automático, la parte donde toma más tiempo es en la obtención de la imagen, cuando se tiene que enfocar para obtener una buena imagen.

La incertidumbre de las líneas de medición es de 4.5 micras en el sistema semiautomático, esto es mucho en relación con nuestro sistema automático. Porque tomando en cuenta que es una medición de microdureza, una micra es demasiado cuando se introduce en la ecuación de dureza Vickers, el resultado varía mucho. Entonces esa incertidumbre se elimina con el sistema desarrollado en esta tesis, además de que el resultado de la medición siempre será el mismo en la imagen analizada. Esto es, que si se toma una muy buena imagen, entonces los resultados son más confiables que en el sistema semiautomático.

Para un mejor resultado es necesario realizar una buena preparación de la muestra metalográfica para obtener un pulido a espejo y ayudará a tener imágenes claras; sin ruido y falsos bordes. Ya que si tuviera algunas ralladuras la imagen de la muestra, aunque el sistema programado tiene algunos filtros para eliminar los falsos bordes, provocaría errores por los falsos bordes en caso de que las rayas fueran demasiado grandes. Por eso es muy importante la buena preparación de la muestra a analizar.

También es muy importante decir que ya se contaba con un esqueleto del programa, lo que se hizo fue programar algunos algoritmos de detección de bordes, así

como para la regresión lineal. Se necesita trabajar en la presentación del programa, que sea más amigable con el usuario, también el de realizar más pruebas en otros materiales para ver el comportamiento del sistema programado.

## 6 Bibliografía

Amigo, Vicente, Ferrer, Carlos, “Fundamentos de ciencia de materiales”, Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Ingeniería Mecánica y de materiales.

Askeland, Donald, 2004, “La ciencia e ingeniería de los materiales”, Grupo Editorial Iberoamérica, Cuarta Edición.

De la cruz, Jesús, Pajares, Gonzalo, 2004, “Visión por Computador Imágenes digitales y aplicaciones”, Alfaomega Grupo Editor, Primera Reimpresión.

Domínguez, Federico, Nieves, Antonio, 2002, “Métodos numéricos aplicados a la ingeniería”, Editorial Continental, Segunda Edición.

Flinn, Richard, Trojan, Paúl, 1993, “Materiales de ingeniería y sus aplicaciones”, Editorial Mc Graw Hill, Tercera Edición.

Grossman, Stanley, 1996, “Algebra Lineal”, Editorial Mc Graw Hill, Quinta Edición.

Luthe, Rodolfo, Olvera, Antonio, Schütz, Fernando, 1991, “Métodos numéricos”, Editorial Limusa, Novena Impresión.

Nacamura, Shoichiro, 1992, “Métodos numéricos aplicados con software”, Editorial Prentice Hall, Primera Edición.

Scheid, Francis, 1972, “Análisis numérico teoría y problemas”, Editorial Mc Graw Hill.

Shackelford, James, “Ciencia de materiales para ingenieros”, Editorial Prentice Hall, Tercera Edición.

Smith, William, 1998, “Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales”, Mc Graw Hill, Tercera Edición,

Terol, Iván, 2003, “Control Digital”, (Curso de Procesamiento de Señales y de Imágenes).

Terol, Iván, 2003, "Morfología Matemática", Transformaciones Morfológicas Básicas y la Noción de Conectividad.

Thornton, Peter, 1987, "Ciencia de materiales para ingeniería", Editorial Prentice Hall, Primera Edición.