



**UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTONOMA DE MEXICO**

---

---

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLAN**

**DETERMINACION DEL MODULO DE  
ELASTICIDAD POR MEDIO DE EXTENSOMETRIA  
EN PROBETAS DE CARBURO DE SILICIO (SiC)**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRIA EN INGENIERIA  
(METAL - MECANICA)**

**PRESENTA:  
JOSE LUIS DE JESUS ESPINO Y VARGAS**

**ASESORA:  
M en I. ANA MARIA PANIAGUA MERCADO**

**2006**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**

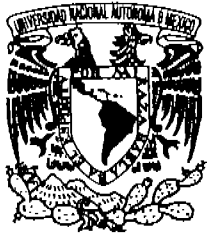


**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

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

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN  
COORDINACIÓN GENERAL DE ESTUDIOS DE POSGRADO

CARTA DE VOTOS APROBATORIOS

**DRA. SUEMI RODRÍGUEZ ROMO**  
**DIRECTORA DE LA FES-CUAUTITLÁN**  
**Presente.**

Por medio de este conducto nos permitimos comunicar a usted que revisamos la tesis titulada **“DETERMINACIÓN DEL MODULO DE ELASTICIDAD POR MEDIO DE EXTENSOMETRÍA EN PROBETAS DE CARBURO DE SILICIO (SiC)”** que presenta el alumno **ESPINO Y VARGAS JOSÉ LUIS DE JESÚS** con número de cuenta **9280843-4** y número de expediente **100921013** para obtener el grado de **Maestro en Ingeniería (Metal-Mecánica)**. Consideramos que dicha tesis reúne los requisitos necesarios para ser discutida en el Examen de Grado correspondiente, otorgamos el voto aprobatorio.

**Atentamente**  
**“POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU”**

\_\_\_\_\_ a \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ del \_\_\_\_\_.

**NOMBRE DE LOS SINODALES**

Presidente: **DR. ENRIQUE CURIEL REYNA**

Vocal: **M. en I. JUAN CONTRERAS ESPINOSA**

Secretario: **M. en I. ANA MARÍA PANIAGUA MERCADO**

Primer Suplente: **M. en I. TOMÁS RANGEL ORTIZ**

Segundo Suplente: **M. en I. SOCORRO CARMONA ESTRADA**

Con todo mi amor, cariño y agradecimiento.  
A mi amada esposa, la Señora Emilia Morteo Lara.  
Que sin su valiosa ayuda hubiera sido muy difícil  
terminar este trabajo.

A mis queridos hijos  
Dra. Liliana Espino Morteo  
Dr. Luis Espino Morteo.  
Por su entusiasta ayuda y cooperación.

A mi yerno  
Ingeniero Alfredo Camacho Mendoza

A mi nieto  
Alfredo Camacho Espino

A mis padres

Miguel Ángel Espino Montaña

Alicia Vargas de Espino

A mis hermanos

Carlos Espino Vargas

Antonio Espino Vargas

Maria Guadalupe Espino Vargas

Juan Espino Vargas

José de Jesús Espino Vargas

Con un sincero agradecimiento a las personas que  
me ayudaron a realizar esta investigación:

IQ. Baños López Leticia

Ing. Cortés Guerrero Noé

Dr. Curiel Reyna Enrique

Dra. Fernández Osorio Ana Leticia

Ing. García Ruiz Juan José

Dr. Guzmán Mendoza José

Dr. Hernández Baumgarten Eliseo

Tec. Pérez Heredia Raymundo

Dr. Rangel Ortiz Tomás

Ing. Romero Sánchez José Trinidad

En especial a mi asesora:

Dra. Ana María Paniagua Mercado

A mis profesores:

Enrique Curiel Reyna

Sergio de Moraes Benítez

Raúl Lucido de la Parra

Ana María Paniagua Mercado

Tomás Rangel Ortiz

Ulrich Scharer Sauberli

Les agradezco que me hayan apoyado y transmitido su  
experiencia y conocimiento en la formación de la  
Maestría en Ingeniería Metal Mecánica

Vive la vida como si fueras a morir mañana...  
y estudia como si fueras a vivir eternamente...

Mucho sabe el que siempre pregunta  
Poco sabe el que a veces pregunta  
Nada sabe el que nunca pregunta



## INDICE

INTRODUCCIÓN	9
--------------	---

**CAPITULO I**

<b>FUNDAMENTOS TEÓRICOS</b>	<b>11</b>
1.1 Cristobalita	11
1.2 Carburo de Silicio	12
1.3 Filamentos	16
1.3.1 Morfología de los Filamentos, Filamentos de Carburo de Silicio	16
1.3.2 Microestructura de los Filamentos 3C-SiC	17
1.3.3 Mecanismo de Reacción	18
1.4 Extensometría	19
1.4.1 Principio de Medida	19
1.4.1.1 Unidades de Medida	20
1.4.2 Ecuación Fundamental de la Extensometría	22
1.5 Tipos de Extensímetros Utilizados.	24
1.5.1 Localización y Encolado de los Extensímetros	24
1.6 Amplificador de la Señal	25
1.6.1 Descripción del Circuito del Amplificador	26
1.7 Transductor de Desplazamiento con Transformador Diferencial Lineal Variable	27
1.8 Convertidor Analógico Digital	28
1.9 Deflexión de la Viga	29
1.9.1 Momento de Inercia	33
1.9.2 Ecuación Diferencial de una Viga	34
1.9.3 Condiciones de Empotramiento de la Viga	34
1.9.4 Ecuación de la Flecha de una Viga	35

## CAPITULO II

	<b>EXPERIMENTACIÓN</b>	<b>36</b>
2.1	Obtención de la Materia Prima	36
2.2	Diseño de la Probeta	36
2.3	Fabricación de la Matriz para Compactar Polvos	36
2.4	Maquinado de la Matriz	36
2.5	Equipo	37
2.5.1	Torno	37
2.5.2	Fresa	37
2.5.3	Herramental	37
2.6	Plan de Trabajo	37
2.6.1	Trazado con Gramil y Escuadra	37
2.6.2	Fresado de los cantos	37
2.6.3	Fresado de las superficies planas	37
2.6.4	Ranurado del primer Bloque	38
2.6.5	Trazado de Barrenos	38
2.7	Temple y Revenido de la Matriz	40
2.8	Formulación de las Probetas	41
2.9	Secado	42
2.10	Sinterizado	42
2.11	Molienda	42
2.12	Preparación de Probetas para el Microscopio	43
2.13	Encolado de Extensímetros	43
2.14	Maquinado de los Transductores de Micromedida	44
2.15	Dispositivos de Fijación	44
2.16	Amplificador de Instrumentación	45
2.17	Transformador Diferencial Variable	45

## **CAPITULO III**

<b>RESULTADOS</b>	46
3.1 Ensayos no Destructivos	46
3.1.1 Ensayo de Flexión	46
3.1.2 Ensayo a la Flexión, Deformación contra Carga	48
3.2 Ensayo a la Flexión, Esfuerzo contra Flecha	49
3.3 Ensayo a la Tracción, Deformación contra Carga	50
3.4 Ensayo a la Flexión, Flecha contra Carga	52
3.5 Difracción de Rayos X	54
3.5.1 Tabla de resultados de los Difractogramas	55
3.6 Micrográficas del Microscopio Óptico	57
3.7 Microscopio Electrónico de Barrido	59

## **CAPITULO IV**

<b>ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS</b>	65
4.1 Regresión Lineal Simple	65
4.1.1 Método de Mínimos Cuadrados (M.M.C.)	65
4.1.1.1 M.M.C para la Formulación N°1	65
4.1.1.2 M.M.C para la Formulación N°2	65
4.1.1.3 M.M.C para la Formulación N°3	66
4.1.1.4 M.M.C para la Formulación N°4	66
4.2. Tabla de Fórmulas para cálculos de los Sensores	67
4.3 Explotación de los Transductores	68
4.3.1 Cálculo para la Formulación N°1	68
4.3.2 Cálculo para la Formulación N°2	69
4.3.3 Cálculo para la Formulación N°3	69
4.3.4 Cálculo para la Formulación N°4	70
4.4 Gráfica de los datos obtenidos de las Muestras de las Formulaciones.	71

**CAPITULO V**

<b>CONCLUSIONES</b>	73
<b>Recomendaciones</b>	74
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	75

## INTRODUCCIÓN

Al ver como día con día la sociedad tiene la necesidad de protegerse, en su casa o en su vehículo; existe la urgencia de crear nuevos materiales compuestos, económicos y ligeros que cuenten con mayores propiedades físicas y mecánicas, para que cuando se les someta a grandes deformaciones e impactos como el de una bala con núcleo de acero a velocidades de 900 m/s. y presiones de  $1750 \text{ kg/cm}^2$  cumplan con la función de soportar todos estos esfuerzos.

Desde la antigüedad el hombre, se ha preocupado por desarrollar armamento para atacar; también ha fabricado diversos tipos de armaduras, para protegerse y evitar el mayor daño posible a su cuerpo, ocasionado por proyectiles, como piedras, flechas, lanzas, balas, etc.

Con el paso del tiempo y la evolución de la tecnología, se han creado múltiples sistemas de blindaje, desde el más simple, como es el cuero, hasta los blindajes más sofisticados que se utilizan en la actualidad.

Se pudiera hacer una descripción detallada de cómo han ido evolucionando estos blindajes, sin embargo, por el momento nos enfocaremos a las últimas tecnologías que se están usando para este fin.

Anteriormente, se utilizaban materiales muy duros y quebradizos como la cerámica; o pesados como el acero templado, con un costo muy elevado. Se basaban simplemente en bloquear el impacto del proyectil sin absorber la energía dinámica, teniendo además la desventaja de que las esquirlas generadas, salían proyectadas en distintas direcciones ocasionando, fuertes daños.

Actualmente, contamos con una gran variedad de materiales, los cuales al combinarse, generan mezclas que se pueden adaptar a múltiples aplicaciones como la aviación, vehículos, puertas y chalecos blindados, etc.

Estos sistemas de blindaje, no sólo están enfocados a ser únicamente una barrera, sino también para amortiguar la energía dinámica, por lo que se han desarrollado materiales de alta resistencia, como las fibras trefiladas, desde las sintéticas, como el Kevlar, fibras de carbón y fibras cerámicas, hasta las de origen natural como la tela de araña de la Migala, conformando tejidos y apilándolos en varias capas, e infiltrándolas con resina para así adherirlas entre ellas.

Estos sistemas de blindaje se consideran buenos para calibres medianos, pero para balas con núcleo de acero de alta velocidad o recubiertas con teflón, no es suficiente para la protección que se requiere.

Considerando la velocidad, presión e impacto de los proyectiles, para un mejor sistema de blindaje, es necesario fabricar un material de reforzamiento. Este material de reforzamiento es infiltrado con un metal líquido como magnesio o aluminio, que cuando solidifica, forma una densa y hermética matriz.

Uno de los materiales que puede cumplir con este objetivo es la cerámica de Carburo de Silicio.

## **HIPOTESIS**

Si la Extensometría se utiliza para medir la deformación de los materiales. Entonces se puede utilizar para evaluar el Módulo de Elasticidad del Carburo de Silicio.

## **OBJETIVO**

El objetivo de la presente investigación, consiste en la fabricación de una cerámica de Carburo de Silicio, con una estructura cristalina 3C (**CÚBICA CENTRADA EN LAS CARAS**), para obtener su Microestructura y Módulo de Elasticidad por Extensometría.

# CAPITULO I

## FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 1.1- Cristobalita.

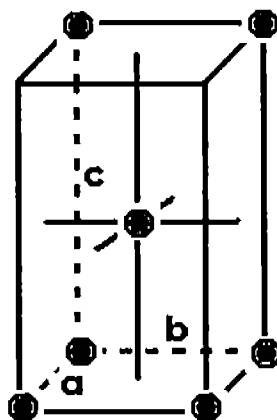
La Cristobalita es un cuarzo con una composición química de dióxido de silicio y tiene una estructura cristalina Tetragonal.

La Cristobalita es común en rocas volcánicas y en muchos cristales microscópicos. En las grietas o en las cavernas se pueden encontrar cristales más grandes y bien formados, que se identifican por la roca que lo contiene y su color <sup>[59]</sup>.

La Cristobalita a más alta temperatura cristaliza como Cristobalita beta, tiene una estructura isométrica y después cuando el cristal se enfría, se convierte a Cristobalita alfa o sólo Cristobalita. Los cristales típicos de Cristobalita beta son octaedros. <sup>[5]</sup>

Los geólogos determinan, la temperatura, la presión y el volumen de agua de la piedra por medio de la presencia de Cristobalita en una piedra en el momento que cristalizó.

La Cristobalita alfa tiene una estructura cristalina tetragonal con una peso específico de 2.32 dinas/cm<sup>3</sup> y un índice de refracción de 1.48 (adimensional) ver la Figura N°1.



**Figura 1. Estructura Cristalina de la Cristobalita Tetragonal**

#### Sistema Tetragonal

Existen 3 ejes cristalográficos a 90° entre sí: alfa = beta = gama = 90°  
Los parámetros de los ejes horizontales son iguales, pero no son iguales al parámetro del eje vertical:

$$a = b \neq [\text{es diferente de}] c.$$



## 1.2- Carburo de Silicio.

Se obtiene con arenas silíceas y carbón en hornos de inducción a temperaturas de aproximadamente de  $1400^{\circ}\text{C}$  <sup>[40]</sup>

ver Figura 2.

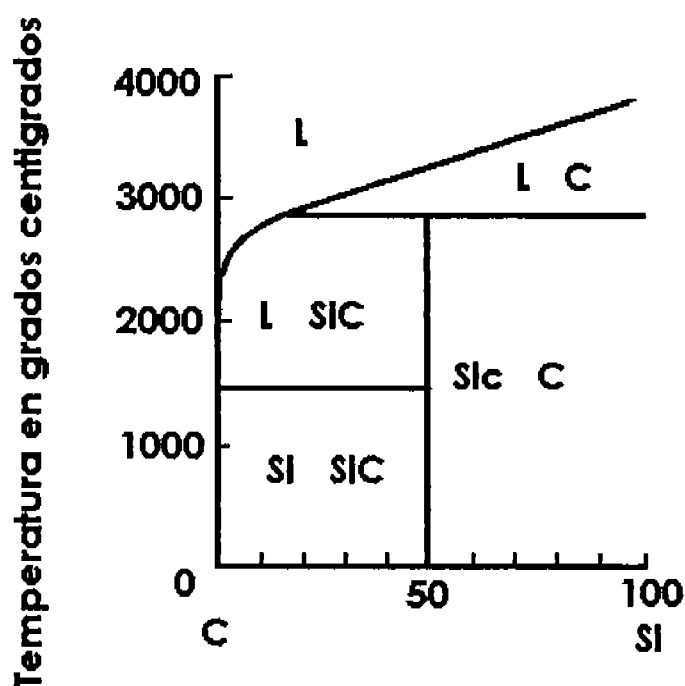
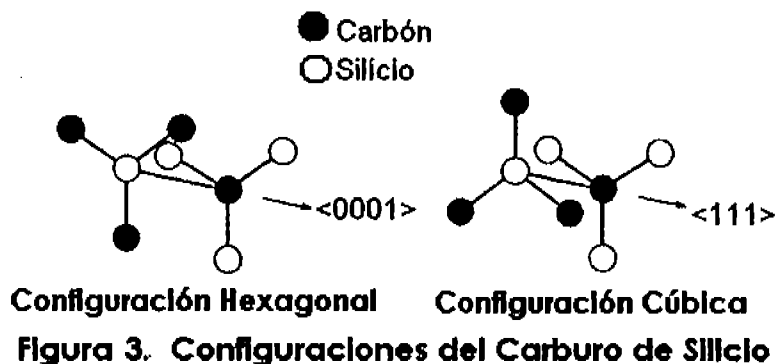


Figura 2. Concentración de Carbón en %

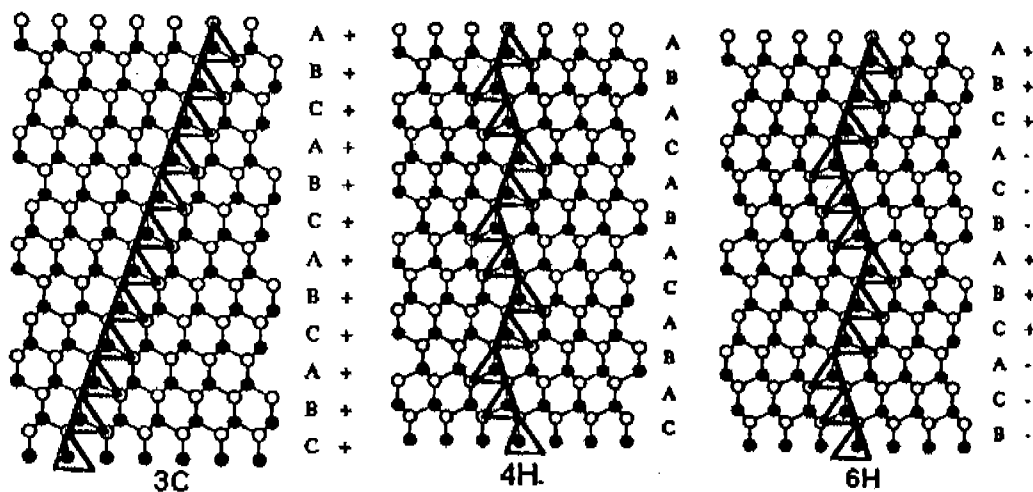
Está compuesto con tetraedros, dándonos una estructura cristalina de forma hexagonal, cúbica ó una combinación de las dos, con un átomo de Carbón en el centro y cuatro átomos de Silicio en los vértices, en donde la distancia de las aristas es de  $3.08 \text{ \AA}$  y la distancia del Carbón al Silicio es de  $1.89 \text{ \AA}$

Figura 3 <sup>[59]</sup>



El Carburo de Silicio (SiC) exhibe una forma de polimorfismo unidimensional, que cristaliza en muchos diversos tipos, y se diferencian uno del otro, solamente en la secuencia de una CAPA doble, que consiste en dos planos formados por los átomos: de Silicio y de Carbón<sup>[22-25]</sup>

Los tipos más comunes de carburo de silicio SiC son los 3C-SiC, 4H-SiC y los 6H-SiC. El tipo 3C, también conocido como el beta-SiC, es el único tipo con estructura cúbica. Figura 3<sup>[59]</sup>



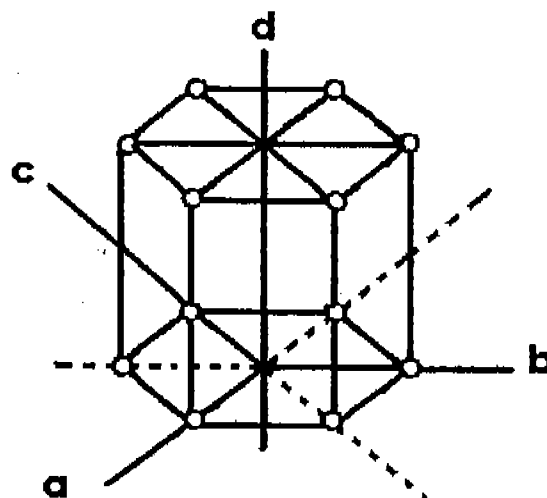
**Figura 4. Diagrama de secuencia de agrupamiento**

En el 6H-SiC la secuencia que apila a los planos compactos revela un patrón de zigzag. Sin embargo, el enrejado circundante no tiene la misma posición que en el enrejado de la posición B y que en el de C.

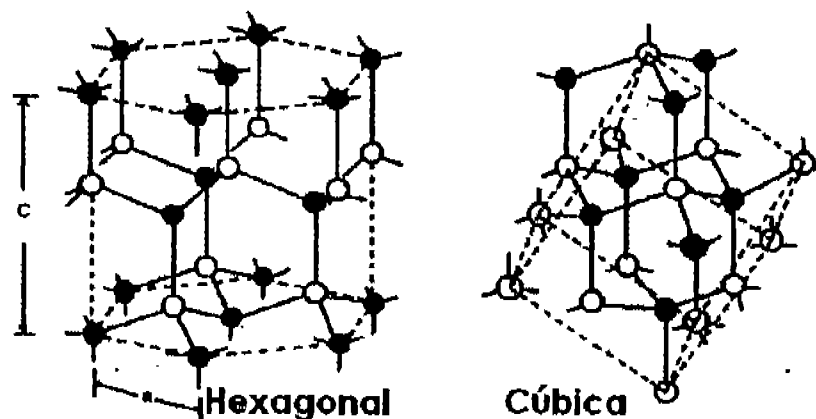
Hay cuatro índices de Miller que describen las direcciones en todos los politipos del SiC, a excepción del politipo 3C donde se utiliza la notación cúbica normal. Basados en un sistema de coordenadas que contienen cuatro ejes. Tres ejes corresponden a las direcciones compactas y quedan en el plano basal del cristal, formando ángulos de 120 grados unos con otros

El cuarto eje es normal al plano basal ver Figura 5.<sup>[5]</sup>

Una forma de describir gráficamente el apilamiento compacto de los átomos, es mediante sus poliedros de coordinación, dándonos las estructuras cristalinas 3C y HC de manera que el número de caras compartidas sea máximo.



**Figura 5. Los 4 ejes de coordenadas de un Cristal Hexagonal**



**Figura 6. Estructura Cristalina del Carburo de Silicio**

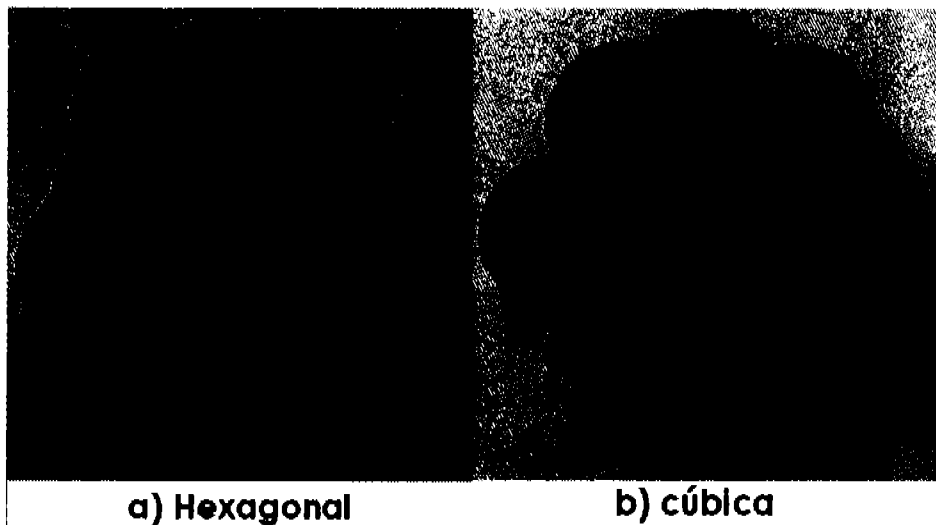
En la Figura 6 se describe la secuencia de apilamiento dándonos una estructura cristalina 3C y HC en cada una de ellas, los 6 átomos rodean a

uno central en un plano medio, con 3 más situados encima y otros 3 debajo de dicho plano. <sup>[5]</sup>

La única diferencia entre las estructuras HC y 3C es que, en el ordenamiento HC, los 3 átomos por encima del plano medio están colocados directamente encima; los 3 átomos que se hallan debajo de dicho plano y en el ordenamiento 3C ocupan un conjunto alternado de posiciones.

La estructura HC se describe como la secuencia de apilamiento de planos compactos, en una estructura cristalina ABAB.

Alternativamente, si se coloca el tercer plano de manera que sus átomos estén directamente encima de los “agujeros” entre los átomos, en el primero y segundo plano, resulta una secuencia de apilamiento de planos compactos en una estructura cristalina descrita como ABCABCABC. Figura. 7 <sup>[5,61,62]</sup>



**Figura 7. Estructura Cristalina en forma Compacta**

### **1.3- Filamentos.**

Los filamentos en el Carburo de Silicio son estructuras cristalinas, cúbicas centradas en las caras ó 3C y han sido uno de los materiales más populares de

reforzamiento para los compuestos de matriz cerámica (CMC). Los mejores factores de selección de los filamentos cerámicos para los CMC, son: <sup>[22,50]</sup>

- (1) La compatibilidad de enlace interfacial entre matrices y filamentos.
- (2) Los factores geométricos como la figura, la tersura y el tamaño.
- (3) El aspecto y compatibilidad en las propiedades físicas como los coeficientes de expansión térmica.

### 1.3.1.- Morfología de los Filamentos de Carburo de Silicio.

Se ha mostrado por medio de la difracción de rayos X, que los filamentos son predominantemente la face beta de estructura 3C.

Hay tres tipos de morfología en los filamentos: Tipo A, Tipo B y Tipo C.

- a) Los filamentos Tipo A, son generalmente delgados de (0.2-0.3 mm), cortos y rectos, como se muestra en la Figura 8(a).
- b) Los filamentos Tipo B, son más gruesos, (0.6 a 1.0 mm) y muy largos de 1 a 5 cm y más bien como figuras de bambú, como se muestra en la Figura 8(b).
- c) Los filamentos Tipo C, son generalmente delgados (0.8 a 1.2 mm) rectos y tersos como se muestra en la Figura 8(c).



**a** **b** **c**  
**Figura 8. Tipos de Filamentos de 3C -SiC**

### 1.3.2 Microestructura de los Filamentos 3C-SiC.

El apilamiento del tipo beta ocurre en la dirección  $\langle 111 \rangle$ , utilizando el borde del tetraedro SiC; dando como resultado una secuencia regular de tres capas. ABCABC.

Los politipos alfa SiC, se forman cuando la pareja de Carbono y Silicio gira  $180^\circ$ , ver Figura 3.

En la Figura 4(a), el diagrama de apilamiento 3C, o beta SiC, muestra todos los tetraedros de Carburo de Silicio, alineados de la misma manera.

En la figura 4(b), el diagrama de apilamiento 4H con una estructura cristalina **Hexagonal**, con un radio de  $3.073A^\circ$ , una altura de  $10.053A^\circ$  y una dureza de aproximadamente de 9 Mohs, muestra que cada 4 capas de Carburo de Silicio, los tetraedros rotan  $180^\circ$ .

En la figura 4(c), el diagrama de apilamiento 6H con una estructura cristalina **Hexagonal**, con un radio de  $3.081A^\circ$ , una altura de  $15.117A^\circ$  y una dureza de aproximadamente de 9 Mohs, muestra que cada 6 capas de Carburo de Silicio, los tetraedros rotan  $180^\circ$ .

Algunas veces los apilamientos pueden romper la periodicidad regular, resultando fallas en el mecanismo de apilamiento, las fallas de apilamiento son con frecuencia clasificadas como fallas de crecimiento y de deformación: Una falla de crecimiento en el cristal, resulta cuando una nueva capa se forma incorrectamente, desviándose su dirección, variando su diámetro o sus puntas son esféricas.

Una falla de deformación resulta, cuando una parte del cristal se desliza inicialmente, pasando a otro plano compacto, sufriendo una dislocación helicoidal.

En los filamentos tipo A, una falla de crecimiento que se puede presentar, es una gran cantidad de defectos transversales a todo lo largo del filamento, sin embargo en los filamentos tipo B, las secciones transparentes son cristales beta bien definidos; mientras que las secciones que no son transparentes contienen defectos transversales del tipo A. Ahora bien en los filamentos tipo

C, se presentan fallas en el borde a todo lo largo del filamento, de forma diagonal o de tipo "V".

### 1.3.3 Mecanismos de Reacción.

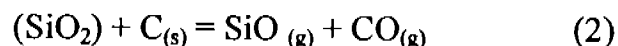
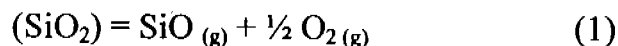
Los mecanismos de reacción para la formación de filamentos-SiC; por medio de la reducción carbotérmica de SiO<sub>2</sub> se realiza con compuestos binarios del grupo de los halógenos, con un elemento ó radical mas electropositivo. Este proceso de formación de filamentos requiere de reacciones que se generan con gases como: SiO, CO y O<sub>2</sub> y reacciones en donde el SiC ya esta formado. Una comprensión de estas reacciones es importante para la interpretación de los resultados del proceso y para la selección de los parámetros óptimos del proceso, tales como la relación entre SiO<sub>2</sub> y los elementos del grupo de los halógenos.

La reacción entre el SiO<sub>2</sub> y C en la formación de SiC es comúnmente aceptado la generación del SiO es un paso necesario para la formación de SiC.

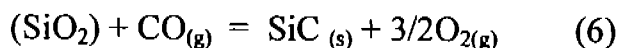
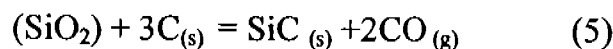
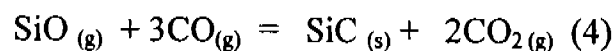
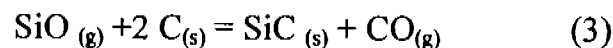
Existen varias opiniones con respecto a este mecanismo de reacción.

Las reacciones son:

#### (a) Generación de SiO



#### (b) Formación del SiC:



### 1.4- Extensometría.

Esta técnica tiene por objeto evaluar todas las magnitudes físicas de los cuerpos, cuando son sometidos a determinadas acciones exteriores, capaces de originar deformaciones elásticas superficiales. <sup>[17,18]</sup>

El elemento sensible para medir las deformaciones son los Extensímetros que consisten, en un hilo conductor fabricado de una aleación de Níquel y Cromo de formas diversas, adherido a un soporte, formando con éste y las conexiones correspondientes el circuito del conjunto, mediante pegamentos isoelásticos adecuados, se unen perfectamente al material de ensayo.

El material base se deforma al ser sometido a las condiciones mecánicas del ensayo, ya sea de tracción o de deformación.

La deformación del material va acompañada de una variación de longitud en el hilo conductor, que trae consigo un cambio de resistencia en éste y por consiguiente, una variación de la corriente que pasa por el Extensímetro.

En la Ley de Hooke, el alargamiento unitario que sufre un material sometido a una sollicitación de tipo mecánico.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{\sigma}{E} \quad \dots (1)$$

Es directamente proporcional al esfuerzo unitario,  $\sigma$  que se origina en el material que deseamos conocer, e inversamente proporcional a su Módulo de

Elasticidad  $E$  :

Esta ecuación nos permite conocer las tensiones producidas en el material sometido a presiones, carga, aceleraciones, etc.

#### **1.4.1 Principio de Medida:**

Un Extensímetro se une sólidamente a la estructura cuya deformación se quiere medir al aplicarle una fuerza.



La "resistencia eléctrica" del Extensómetro, está en función de la longitud del filamento de níquel y cromo y de su variación que se obtiene midiendo la variación de su resistencia eléctrica.

Ecuación fundamental: 
$$\frac{\Delta R}{R} = K \frac{\Delta L}{L} \quad \dots (2)$$

Siendo:

R = resistencia eléctrica del Extensómetro en Ohms.

$\Delta R$  = variación de la resistencia en Ohms.

L = longitud del Extensómetro en mm.

$\Delta L$  = variación de longitud en  $\mu\text{m}$ .

K = factor Extensómetro adimensional

#### 1.4.1.1 Unidades de Medida.

Las unidades de medida más usuales para definir los parámetros físicos empleados en extensometría son:

Mecánicas:

E = Módulo de elasticidad del material de ensayo ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )

$\epsilon$  = Deformación unitaria, =  $\frac{\Delta L}{L}$  (adimensional).

La unidad más empleada para definir ésta es la Microdeformación. ( $\mu\text{m}$ ) que equivale a

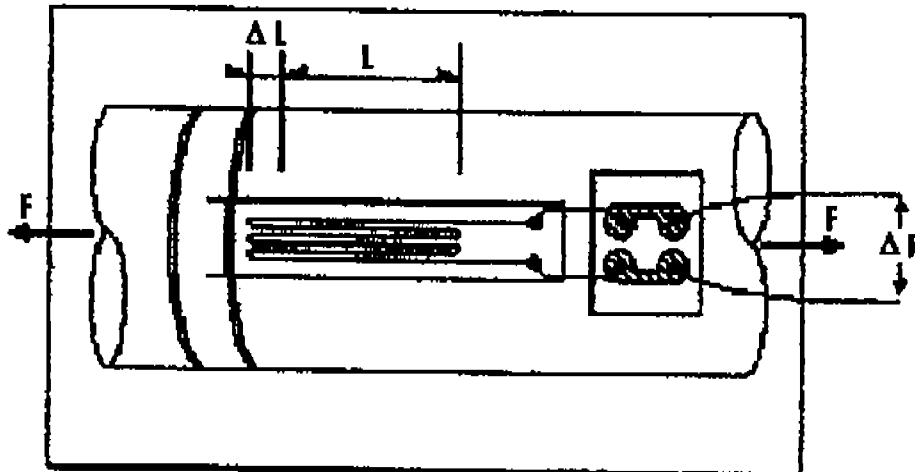
$$1\text{k}\epsilon = 10^{-6}; \quad \epsilon \frac{m}{m} \text{ (adimensional)}$$

Eléctricas:

R = Resistencia del Extensómetro en (Ohms)

I = Intensidad de corriente (mA)

V = Voltaje (mV)



**Figura 9. Principio de medida del Extensómetro.**

El Extensómetro está formado por un hilo metálico cilíndrico replegado varias veces sobre sí mismo, como indica la Figura 9

Sea:

$L$  = Longitud inicial del Extensómetro en mm.

$R$  = Resistencia inicial del Extensómetro en Ohms

$S$  = Sección circular del hilo metálico en mm.

$r$  = Radio de la sección circular en mm.

$\rho$  = Resistividad del hilo metálico Ohms mm

$\nu$  = Coeficiente de Poisson del hilo metálico adimensional.

### 1.4.2 Ecuación Fundamental de la Extensometría.

R. Resistencia del Extensómetro;  $\rho$  . Resistividad del hilo metálico;

L. Longitud inicial del Extensómetro; S. Sección circular del hilo

metálico;  $\nu$  .Relación de Poisson del hilo metálico;

4 variables: 1 dependiente; 3 independientes

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad \dots (3) ; S = \pi r^2 \dots \quad 4 \text{ sustituyendo 4 en 3;}$$

$$R = \rho \frac{L}{\pi r^2} ;$$

$$dR = \frac{L}{\pi r^2} d\rho + \rho \frac{1}{\pi r^2} dL - \frac{2}{\pi} \frac{\rho L}{r^3} dr \quad \dots 5$$

Dividiendo entre R

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - 2 \frac{dr}{r} \quad \dots 6$$

La relación de Poisson nos dice

$$\nu = - \frac{\frac{dr}{r}}{\frac{dL}{L}} = \frac{\text{Deformación unitaria lateral}}{\text{Deformación unitaria axial}} \quad \dots 7 \quad \therefore$$

$$\frac{dr}{r} = -\nu \frac{dL}{L} \quad \dots 8 \quad \text{sustituyendo 6 en 5 ;}$$

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} + 2\nu \frac{dL}{L} \Rightarrow$$

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + (1 + 2\nu) \frac{dL}{L} \quad \dots 9$$

Sabemos que la variación unitaria de la resistividad se debe al cambio de volumen del hilo y de su material.

$$\frac{d\rho}{\rho} = C \frac{dV}{V} \quad \dots 10 ; \quad V = \pi r^2 L ; \text{diferenciando}$$

$$dV = \pi r^2 dL + 2(\pi L r dr)$$

dividiendo entre V

$$\frac{dV}{V} = \frac{dL}{L} + 2 \frac{dr}{r} \quad \dots 11 ; \quad \text{sustituyendo 6 en 9 ;}$$

$$\frac{dV}{V} = \frac{dL}{L} + 2 \left( -\nu \frac{dL}{L} \right) \Rightarrow$$

$$\frac{dV}{V} = (1 - 2\nu) \frac{dL}{L} \quad \dots 12 ; \quad \text{sustituyendo 10 en 8 ;}$$

$$\frac{d\rho}{\rho} = C(1 - 2\nu) \frac{dL}{L} \quad \dots 13 ; \quad \text{sustituyendo 13 en 9 ;}$$

$$\frac{dR}{R} = C(1 - 2\nu) \frac{dL}{L} + (1 + 2\nu) \frac{dL}{L} \Rightarrow$$

$$\frac{dR}{R} = [1 + 2\nu + C(1 - 2\nu)] \frac{dL}{L} ; \text{ donde}$$

$[1 + 2\nu + C(1 - 2\nu)]$  es el factor de la Extensímetro  $\therefore$

**LA ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA EXTENSOMETRIA ES:**

$$\frac{dR}{R} = K \frac{dL}{L} \quad \dots 14$$

### 1.5- Tipos de Extensímetros Utilizados.

La necesidad de realizar medidas precisas y muy localizadas (casi puntuales), hace necesario recurrir a elementos sensibles pequeños.

Pero implica una menor sensibilidad del hilo conductor que dificultaría la medida. Esto trae como consecuencia, que se tenga que concentrar la mayor cantidad de hilo conductor en la dirección de la deformación y en el menor espacio posible. Atendiendo, por otra parte, a las limitaciones impuestas por las posibilidades de manejo. Se deduce, por lo tanto, que utilizaremos dos tipos de Extensímetros 031 CC - 350 y 062 TA - 305 para ensayos de flexión y tracción como la siguiente Figura: 10(a y b) <sup>[19,20]</sup>

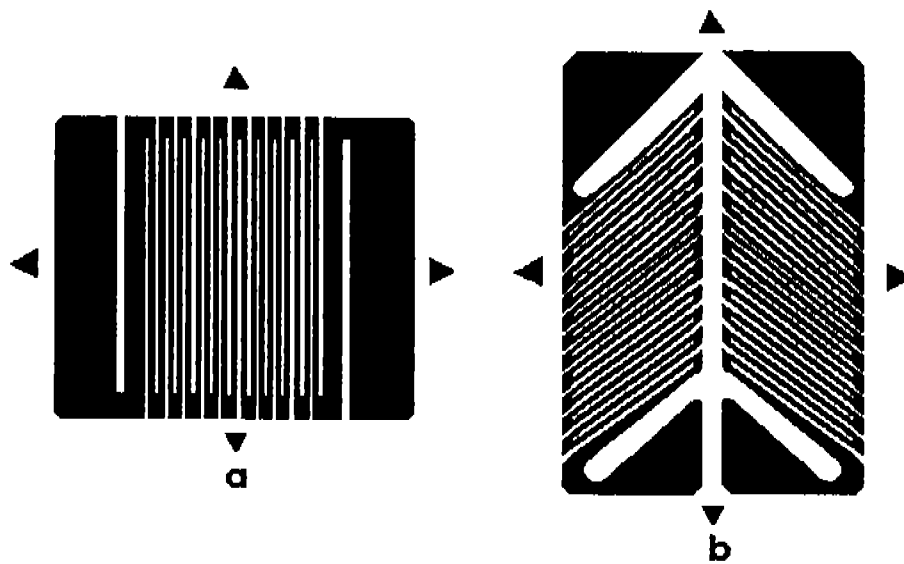
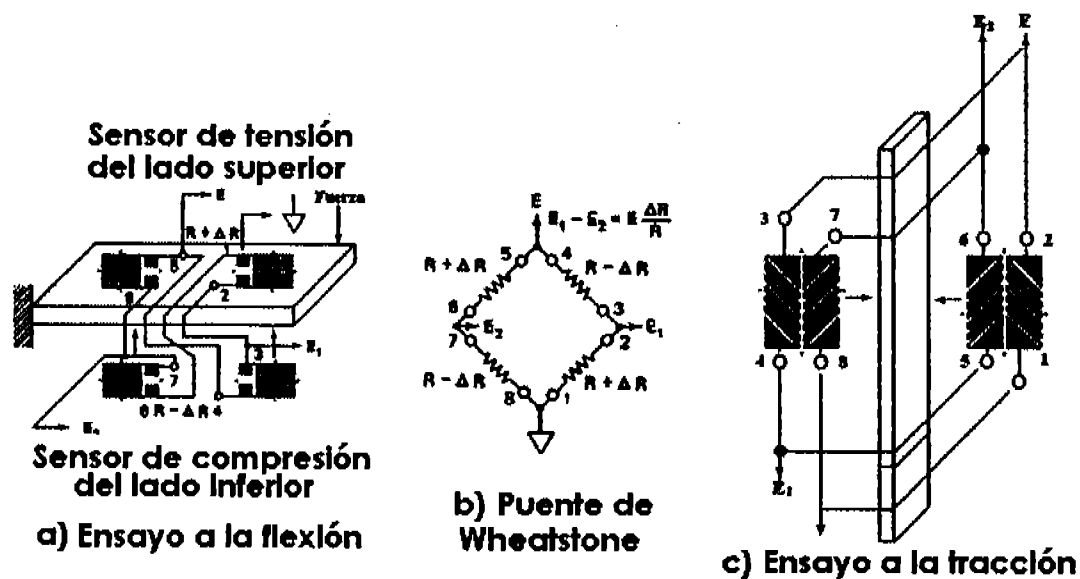


Figura 10. Extensímetros a) 062TA-305 y B) 031CC-350

#### 1.5.1 Localización y Encolado de los Extensímetros.

En la figura 11 se muestra un esquema del encolado de los Extensímetros, para someterlos a flexión y tracción, así como el puente de Wheatstone para el cableado, proporcionándonos la suma de los voltajes de las dos ramas de salida.



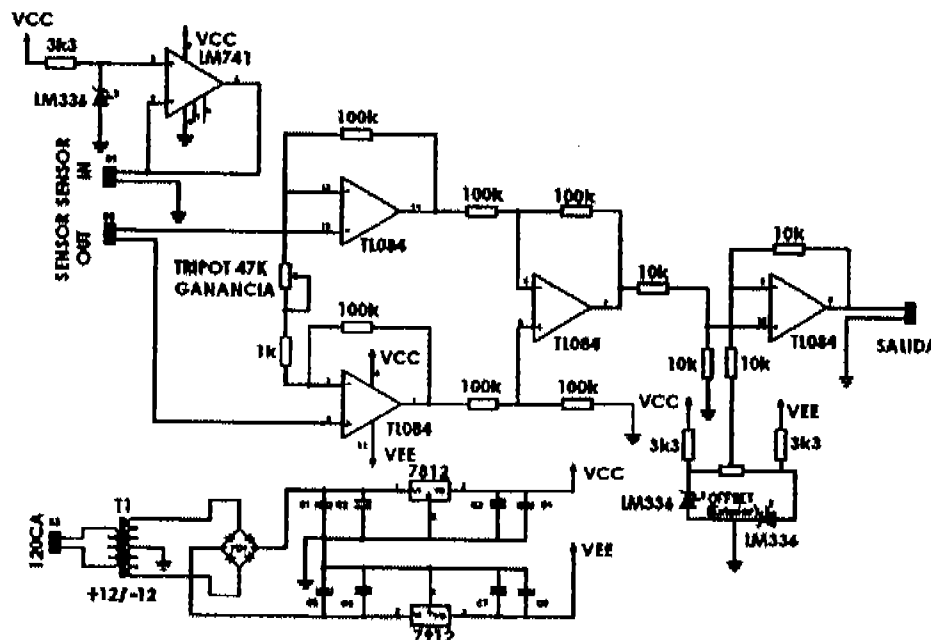
**Figura 11. Localización de los Extensímetros**

### 1.6- Amplificador de la Señal.

Tiene tres objetivos (1) amplificarla (2) eliminar el modo común y (3) fijar la salida del amplificador. [11,12]

- (1) Como la señal que obtenemos de los extensímetros es muy pequeña hay la necesidad de amplificarla pasándola del orden de los mv. a volts, medida más manejable y menos influenciada por el ruido del entorno.
- (2) En general, el sensor entrega una diferencia de tensión entre las terminales de salida, pero con un voltaje común a ambas terminales. Eliminar el modo común es sacar la diferencia de voltajes entre las terminales.
- (3) Fijar la salida del amplificador, es decir el punto en el que queremos que se interprete la salida del sensor como cero.

Normalmente, en vez de medir directamente la resistencia del elemento sensor, se coloca éste como una resistencia de un puente de wheatstone, se alimentan dos de los extremos con una tensión de referencia muy estable y en los otros dos extremos se mide la tensión que será proporcional a la variación de la resistencia con un nivel de tensión de aproximadamente la mitad de la tensión de alimentación.



**Figura 12. Amplificador de la Señal**

### 1.6.1 Descripción del Circuito del Amplificador de la Figura 12.

A través de la  $B_1$  alimentamos el sensor con la tensión de referencia que fija el regulador LM7812. Por lo tanto, la tensión que tendremos en ese punto deberá ser de aproximadamente 12 volts estables y sin oscilaciones.

En  $B_2$  tendremos el voltaje que entrega el sensor, en mv. Pero cada uno de ellos con respecto a la masa tendrá una tensión de 6 volts.

El potenciómetro  $RV_2$  exterior al circuito, nos permite fijar el nivel de la salida a cero, mientras que  $RV_1$  fija la ganancia.

El IC3A e IC3B se encarga de amplificar la señal a la salida es decir, pines 14 y 1 del IC3.

Las señales provenientes de IC3A e IC3D se introducen en IC3B a través de las resistencias  $R_2$  y  $R_7$ . Este operacional, configurado como restador gracias a  $R_2$ ,  $R_3$  y  $R_7$ .  $R_8$  elimina el modo común dejando a la salida la diferencia de voltaje.

Por último, el operacional IC3C se encargará de fijar el nivel de la salida a cero. Este operacional también está configurado como restador, de manera que a su salida tendremos la diferencia entre el pin 7 y la salida del potenciómetro RV2.

De esta forma podemos situar donde deseemos el principio de la escala de medida. Las tensiones de referencia que tomamos de Q2 y Q3, dos LM336 que nos proporciona un nivel de referencia de 5 volts. Dándonos una tensión de +5.00 volts y -5.00 volts estable.

Por último con Q1, LM336 y LM741 nos aporta la tensión y corriente estabilizada, suficiente para el sensor.

### 1.7- Transductor de Desplazamiento con Transformador Diferencial Lineal Variable.

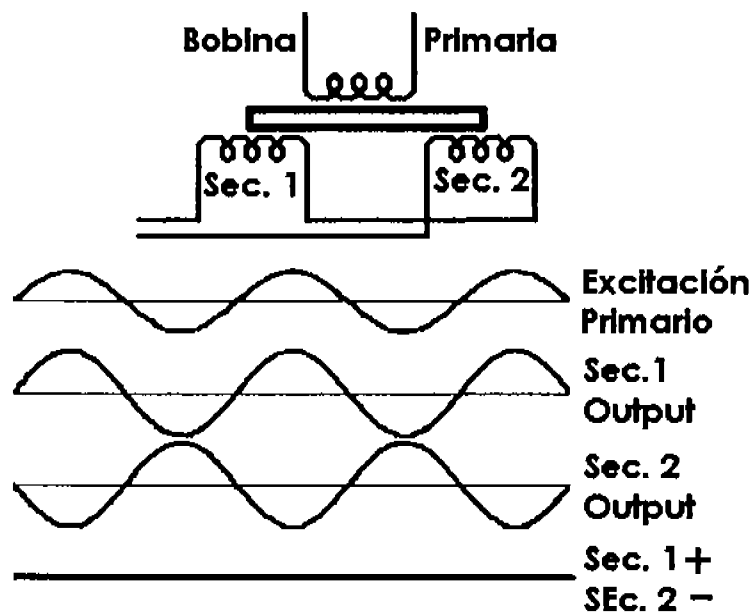
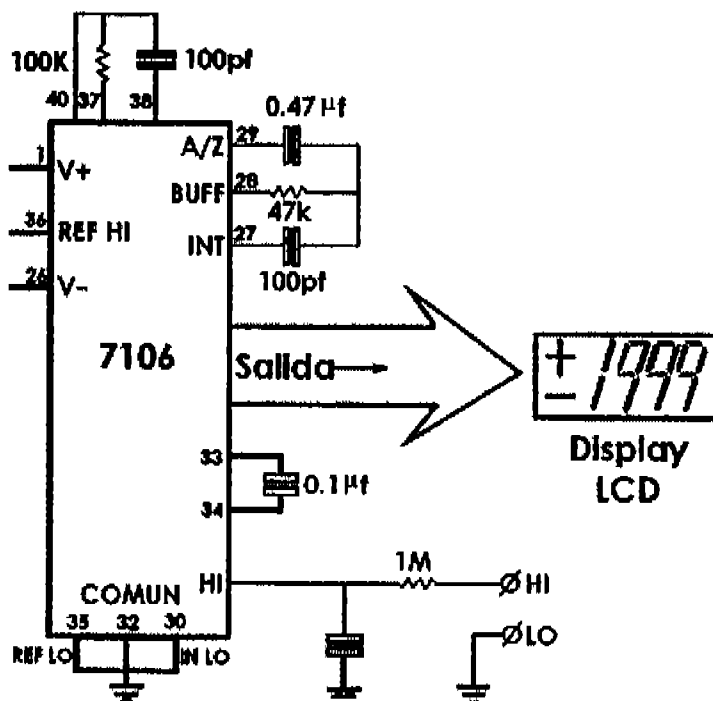


Figura 13. Transductor de Desplazamiento



Son transductores electromagnéticos, Figura 13. que convierten el movimiento de un núcleo magnético en un voltaje proporcional a dicho movimiento.

Constan de un devanado primario y dos secundarios. El primario está excitado por una corriente estable proporcionada por un oscilador con una onda alterna, induciendo voltaje en los dos devanados secundarios, que están conectados entre sí en serie y en oposición, de tal forma que cuando el núcleo magnético está centrado, se contrarrestan las dos salidas del secundario y la respuesta del transductor es nula. Al mover el núcleo respecto a su posición central, hay una señal de salida que proporciona el desplazamiento. [49,52]



**Figura 14. Convertidor Analógico Digital**

### 1.8- Convertidor Analógico Digital

Por medio de un LM7106 Fig. 14 podemos convertir la señal analógica a digital en donde la entrada analógica requerida para generar una salida de escala completa de 2000 conteos es de:  $V_{IN}$

$= 2V_{REF}$ . Existiendo un factor de escala diferente a la unidad entre el voltaje de entrada y la lectura digital.

Los valores adecuados para un reóstato integrado y un capacitor serán de  $100K\Omega$  Y DE  $0.47\mu f$ . Haciendo al sistema más silencioso. [11]

### 1.9- Deflexión de la Viga

Para obtener las ecuaciones generales de la curvatura de deflexión de una viga en cantiliever en la Figura 15, se toma:

El origen de coordenadas en el extremo fijo con el eje X dirigido a la derecha y el eje Y hacia abajo en un marco de referencia XY donde actúan todas las cargas.

La deflexión "y" de una viga en cualquier punto  $m_1$  a una distancia "x" del origen, es la translación de ese punto en la dirección "y" medida desde el eje X hasta la curva de deflexión.

La deflexión hacia abajo es positiva.

La deflexión "y" es una función de "x" y representa a la ecuación de la curva de deflexión.

El ángulo de rotación  $\theta$  del eje de la viga en cualquier punto  $m_1$  es el ángulo entre el eje X y la Tangente a la curva de deflexión; positivo en el sentido de las manecillas del reloj.<sup>[6,7]</sup>

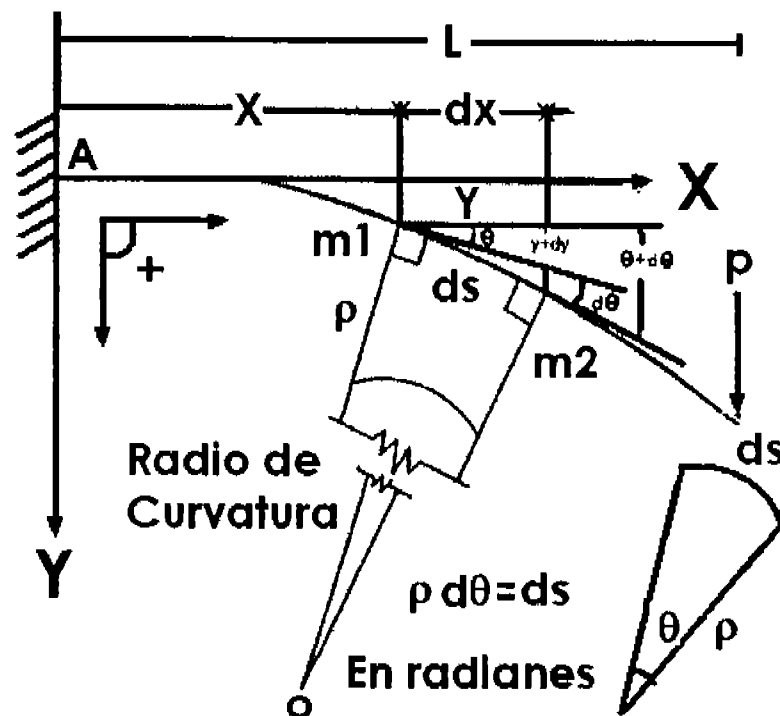


Figura 15. Deflexión de una viga.

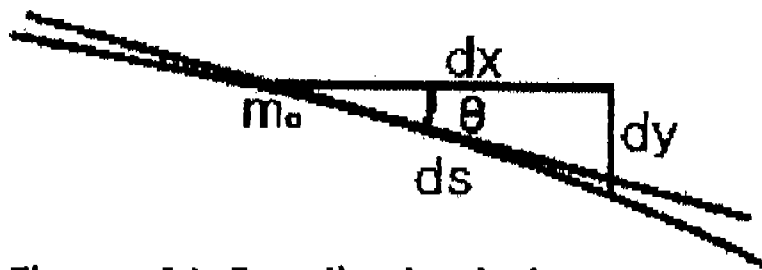
Por geometría ;  $\rho d\theta = ds$  en radianes Ecuación. 15

$$\rho = \frac{ds}{d\theta}; \quad \frac{1}{\rho} = \frac{d\theta}{ds} = \kappa; \quad (\text{kappa es la curvatura de la viga}) \quad \dots 16$$

Por cálculo, la pendiente de la curva: Figura 16  $m_c = \frac{dy}{dx} = \text{Tg}\theta \Rightarrow$

$$\theta = \text{arctg}\left(\frac{dy}{dx}\right) \dots 17$$

\* Cuando las vigas sufren pequeñas rotaciones, las curvas de deflexión son muy planas y extremadamente pequeñas por lo que:



$$\text{El } \cos\theta = \frac{dx}{ds}; \text{ y}$$

$$\text{el } \lim_{\theta \rightarrow 0} \cos\theta \approx 1$$

**Figura 16. Pendiente de la curva.**

por lo tanto  $\Rightarrow ds \approx dx \dots 18$

Sustituyendo en la Ecuación. 16

$$\frac{1}{\rho} = \frac{d\theta}{dx} = \kappa \dots 19; \quad \Rightarrow \text{si } \theta \rightarrow 0; \quad \text{para ángulos pequeños, en radianes}$$

$$\theta \approx \text{Tg}\theta = \frac{dy}{dx};$$

luego para pequeñas rotaciones  $\theta = \frac{dy}{dx}$ . Observando la variación del ángulo cuando cambia x,

$$\text{es decir } \frac{d\theta}{dx} = \frac{d\left(\frac{dy}{dx}\right)}{dx} = \frac{d^2y}{dx^2} \dots 20 \text{ sustituyendo en la } \dots 19 \Rightarrow$$

$$\kappa = \frac{1}{\rho} = \frac{d\theta}{dx} = \frac{d^2y}{dx^2} \dots 21$$

Para determinar las deformaciones Internas de una viga, consideremos dos

secciones transversales continuas  $\overline{mn}$  y  $\overline{pq}$

según la Figura 17. Antes de aplicar la carga, éstas son paralelas entre si y después de aplicar los momentos, éstas siguen siendo planas pero han girado. Evidentemente, las fibras superiores se alargaron deformándose y las fibras inferiores se acortaron. [6,7].

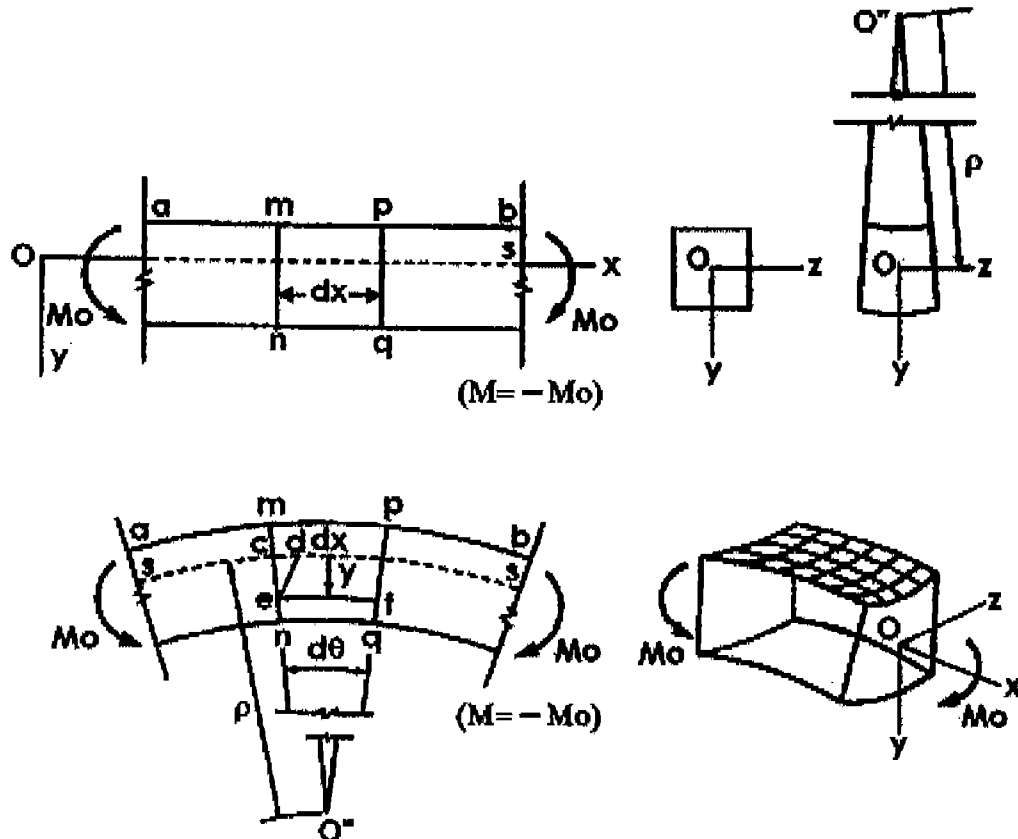


Figura 17. Deformaciones Internas de una Viga

Tracemos una paralela  $\overline{ed}$  a  $\overline{pq}$  :

Por triángulos semejantes 
$$\frac{cd}{ef} = \frac{ed}{fo''} = \frac{y}{\rho}$$

siendo la deformación, muy pequeña  $\epsilon_x$

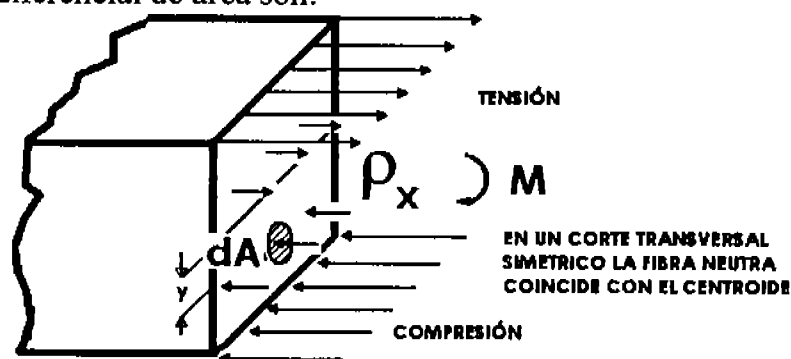
$\varepsilon_x = -\frac{y}{\rho}$ ; según la Ecuación.16 =  $-ky$ ; el signo (-) es porque la deformación está por debajo de la fibra neutra y hay una contracción.

\*Todo está basado en principios geométricos; luego son aplicables a una viga de cualquier material.

Por otro lado, si el material es elástico, con un diagrama lineal esfuerzo-deformación podemos utilizar:

La ley de Hooke  $\sigma = E\varepsilon$  ... 22 ;  $\sigma_x = E\varepsilon_x = -Eky$  ... 23

Así los esfuerzos normales en un corte transversal según la Figura 18 para un elemento diferencial de área son:



EN UNA FLEXIÓN PURA  
LA RESULTANTE DE TODAS LAS  
FUERZAS NORMALES AL CORTE  
ES NULA

Figura 18. Esfuerzos Normales en un corte Transversal

$$dF = \frac{Ey}{\rho} dA \quad \dots 24 \quad \text{Integrando la Ecuación. 24}$$

$$\int \frac{Ey}{\rho} dA = \frac{E}{\rho} \int y dA = 0 \quad \dots 25 \quad E \text{ y } \rho \text{ son constantes } \therefore$$

$$\int y dA = 0 \quad \text{que representa el momento estático}$$

Respecto al eje neutro

El momento de la fuerza elemental  $dF$  está dado por

$$dM = ydF = y\left(\frac{Ey}{\rho}dA\right) \dots 26$$

La resultante de los momentos de todas esas fuerzas elementales en toda la sección nos da el momento flector  $M$

### 1.9.1 Momento de Inercia

Integrando .... 26

$$M = \frac{E}{\rho} \int y^2 dA \dots 27 \text{ vemos que la integral}$$

es el momento de inercia

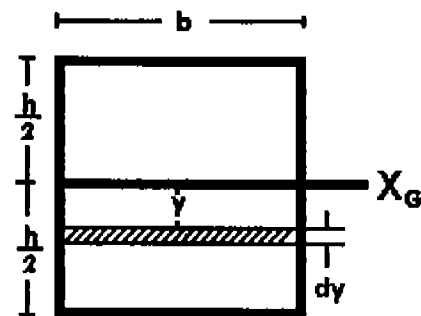
$$M = -\frac{EI}{\rho} = -\frac{1}{\rho} EI = -\kappa EI$$

$$\kappa = -\frac{M}{EI} \dots 28$$

sustituyendo : en la Ecuación. 21

$$\frac{d\theta}{dx} = \frac{d^2 y}{dx^2} = -\frac{M}{EI} \dots 29$$

$$I_{xG} = \int y^2 dA \dots 30 ; dA = bdy$$



**Figura 19.** EN UNA VIGA CON UN CORTE TRANSVERSAL QUE TENGA EJE DE SIMETRÍA; LA FIBRA NEUTRA COINCIDE CON EL CENTROIDE

sustituyendo en : en la Ecuación. 29;

$$I_{xG} = b \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} y^2 dy \dots 31$$

$$\Rightarrow b \left[ \frac{y^3}{3} \right]_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \Rightarrow b \left[ \frac{h^3}{24} + \frac{h^3}{24} \right] \Rightarrow \frac{bh^3}{12} \dots 32$$

Diferenciando la ecuación 29, vemos que la variación del momento con respecto a "x" ó la tercera derivada del ángulo  $\theta$

nos da :  $V = \frac{dM}{dx}$  ...33 que es el cortante y si es cero el momento es

constante o bien  $\frac{d^3 y}{dx^3} = -\frac{V}{EI}$  ... 34

Volviendo a diferenciar  $-\frac{dV}{dx} = q(x)$  ... 35 obtenemos la variación del cortante dándonos la intensidad de la carga distribuida ó

**1.9.2 Ecuación Diferencial de la viga**  $\frac{d^4 y}{dx^4} = \frac{q(x)}{EI}$  ... 36

De la ecuación 36 podemos obtener la deflexión "y" por medio de la Transformada de Laplace donde "E" y "I".son el Modulo de Elasticidad y el Momento de Inercia. En este caso la deflexión y(x) debe satisfacerlas condiciones:

**1.9.3 Condiciones del Empotramiento**

$$y(0) = 0; y'(0) = 0; y''(L) = 0; y'''(L) = 0$$

Las primeras dos condiciones establecen que la deflexión y la pendiente son cero en x=0, y las ultimas dos, que el momento torsionante y la fuerza cortante son nulas en x=L

Hacer  $C_1 = y''(0); C_2 = y'''(0);$

$$EI \mathcal{L} \left\{ \frac{d^4 y}{dx^4} \right\} = \mathcal{L} \{ q(x) \} \quad \dots 37$$

La carga q(x) se halla uniformemente distribuida a lo largo de su longitud esto es q(x) = q(0), siendo 0 < x < L.

$$EI [ S^4 F(s) - S^3 y(0) - S^2 y'(0) - S y''(0) - y'''(0) ] = \frac{q_0}{S} \quad \dots 38$$

$$[ S^4 F(s) - S y''(0) - y'''(0) ] = \frac{q_0}{EIS}$$

como  $C_1 = y''(0)$  y  $C_2 = y'''(0)$

$$[S^4 F(s) - SC_1 - C_2] = \frac{q_0}{EIS}$$

$$; S^4 F(S) = SC_1 + C_2 + \frac{q_0}{EIS}$$

$$F(s) = \frac{C_1}{S^3} + \frac{C_2}{S^4} + \frac{q_0}{EIS^5} \dots 39$$

$$y(x) = \frac{C_1}{2!} \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{2!}{S^3} \right\} + \frac{C_2}{3!} \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{3!}{S^4} \right\} + \frac{q_0}{4!EI} \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{4!}{S^5} \right\} \dots 40$$

#### 1.9.4 Ecuación de la Flecha de la Viga.

Con carga uniformemente repartida

$$y(x) = \frac{C_1}{2} x^2 + \frac{C_2}{6} x^3 + \frac{q_0}{24EI} x^4 \dots 41$$

dándonos la flecha en la viga en el intervalo  $0 \leq X \leq L$ . Obtenemos la ecuación 42

$$E = \frac{q_0}{y(x) I} \left( \frac{L^2}{4} x^2 - \frac{L}{6} x^3 + \frac{x^4}{24} \right)$$

$$Si \quad x = L \Rightarrow$$

$$E = \frac{q_0 L^4}{8y(x)I} \dots 42$$



## CAPITULO II

### EXPERIMENTACIÓN

#### **2.1 Obtención de la Materia Prima a utilizar:**

Primero se procedió a obtener el Carburo de Silicio en polvo con un tamaño de grano de 37 micrones, el silicato de sodio líquido, grafito en polvo con un tamaño de grano de 13 micrones, ácido bórico con un tamaño de grano de 149 micrones, bentonita con un tamaño de grano de 13 micrones, carbón marino con un tamaño de grano de 13 micrones y Lignosulfonato de Calcio de 90 micrones. Que son las dimensiones para un buen reparto granulométrico con la serie  $\sqrt{2}$  de Tyler<sup>[10]</sup>

#### **2.2 Diseño de la Probeta:**

Disponiendo de un horno de combustión de la marca LINDBERG modelo F8420-1 temperatura de 1500° centígrados, tubo de Silimanita de 7/8 de pulgada de diámetro y 20" de largo; con aislante de fibra cerámica y resistencias de grafito de 3200 watts a 220 volts.

Se diseña las dimensiones que tendrá la probeta de 15 x 4.4 x 81 mm. para que pueda ser alojada dentro del tubo de combustión y ser sinterizada; siendo un tamaño suficiente para los ensayos.

#### **2.3 Fabricación de la Matriz para Compactar los Polvos:**

Se dispone de dos placas de acero 4140 de 120mm.x100mm.x28mm., con una aleación de 0.38- 0.43 % de carbón, 0.75-1.00% de manganeso para dar tenacidad, de 0.20%-0.35% de silicio para la mecanibilidad y evitar la oxidación de los elementos al fundirlos 0.80-1.10% de cromo para dar resistencia al desgaste y 0.15%-0.25% de molibdeno ó vanadio para afinar el grano.

## **24 Maquinado de la Matriz:**

Disponiendo del equipo necesario, junto con el plan de trabajo y la secuencia del maquinado del cuadro N°1, según el dibujo de la figura 20. Se maquinó la matriz como lo muestra la fotografía de la Figura 21.

### **2.5 Equipo:**

#### **2.5.1 Torno:**

Marca MULTI-PURPOSE MACHINE Modelo JN28 N° Serie 1092

Características:

Paso de alimentación: 12mm.

Velocidad de 480 rpm.

Motor  $\frac{3}{4}$  Hp 550w/110v/60Hz.

#### **2.5.2 Fresa**

Marca: MULTI-PURPOSE MACHINE Modelo JP67 N° 1043

Velocidad del husillo: 400 rpm.

Motor:  $\frac{3}{4}$  Hp. 110V 550W/60Hz.

#### **2.5.3 Herramental**

Prensa de sujeción de 100x95mm.

Plato con 4 buriles con pastilla de Carburo de Tungsteno de 6.25mm.

Machuelo de 8mm, cuerda 18G hilos por pulgada con maneral,

Gramil, regla, escuadra y tinta.

### **2.6 Plan de Trabajo:**

#### **2.6.1 Trazado con Gramil y Escuadra.**

#### **2.6.2 Fresado de los Cantos**

- a) Sujeción del cortador en el chucks.
- b) Sujeción bloque en la prensa, nivelación y alineación del mismo.
- c) Desbaste y afine de los cuatro cantos.

#### **2.6.3 Fresado de las Superficies Planas 2 superiores y 2 inferiores.**

- a) Sujeción de la barra con el buril en el broquero.

- b) Sujeción del bloque en la prensa, nivelación y alineación.
- c) Desbastado y afinado de la superficie.

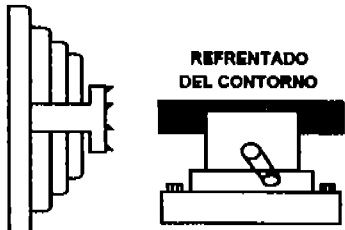
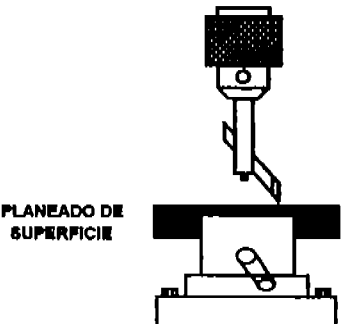
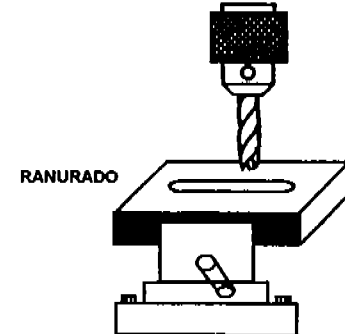
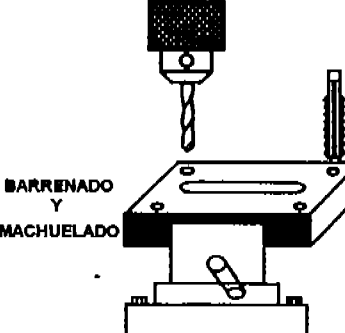
#### **2.6.4 Ranurado del Primer Bloque.**

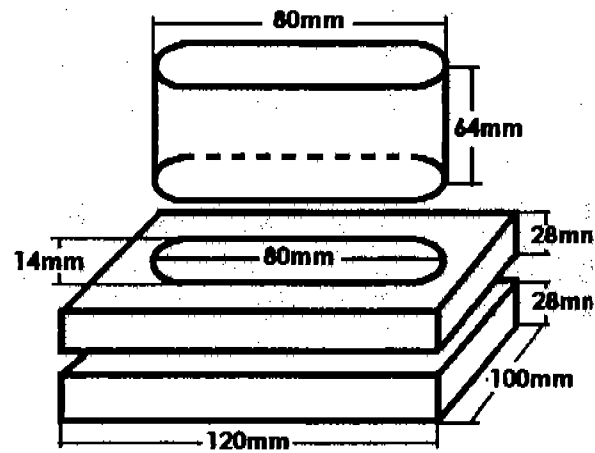
- a) Sujeción del primer bloque, nivelación y alineación.
- b) Sujeción del cortador vertical de 12.7mm de diámetro.
- c) Hacer una ranura centrada en la placa de acero de 15mm.x81mm.24mm.

#### **2.6.5 Trazado de los Barrenos en los 2 Bloques.**

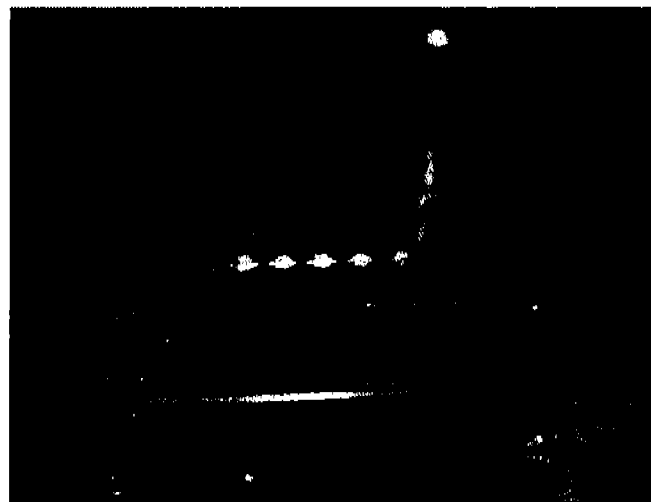
- a) Sujeción nivelación y alineación de los 2 bloques.
- b) Abrir 4 barrenos al primer bloque.
- c) Abrir 4 barrenos segundo bloque y machuearlos a 5/16 <sup>[13]</sup>

Cuadro N° 1 Secuencia de Maquinado

Op.#	CROQUIS Y DESCRIPCIÓN	MAQUINA	LUB	$n = \frac{v1000}{\pi d}$ ; $th = \frac{L}{sn}$
1 ∇	 <p>REFRENTADO DEL CONTORNO</p>	TORNO	ACEITE	$n = \frac{22000}{50\pi} = 140rpm$ $Th = \frac{820}{(0.1)(140)} = 59 \text{ min}$
2 ∇ ∇	 <p>PLANEADO DE SUPERFICIE</p>	FRESA	ACEITE	$n = \frac{22000}{25\pi} = 280rpm$ $Th = \frac{4560}{(0.1)(280)} = 162 \text{ min}$
3 ∇ ∇ ∇	 <p>RANURADO</p>	FRESA	ACEITE	$n = \frac{22000}{12.7\pi} = 550rpm$ $Th = \frac{15800}{(0.1)(550)} = 290 \text{ min}$
4 ∇	 <p>BARRENADO Y MACHUELADO</p>	TALADRO	ACEITE	$n = \frac{12000}{60.25\pi} = 600rpm$ $Th = \frac{3820}{(0.1)(600)} = 63 \text{ min}$



**Figura 20. Matriz para compactar polvos**



**Figura 21. Maquinado de la Matriz**

### **2.7 Temple y Revenido de la Matriz**

Se temple a 850 °C durante una hora, se enfría en aceite y se reviene durante dos horas a 400 °C para lograr una dureza de 42- 45 Rockwell C suficiente para que no se deforme en el momento de someterla a presión al compactar los polvos con las distintas formulaciones en una prensa con una presión de aceite de 10000 libras Lb/pulg<sup>2</sup>. Por último, se limpia con un chorro de arena.

## 2.8 Formulación de las Probetas: <sup>[39--41,44--46]</sup>

Cuadro N°2 Formulación de las Probetas

<b>Primera formulación:</b>		<b>Segunda formulación:</b>	
Agua	5 %	Alcohol etílico	5 %
Bentonita	6 %	Dextrina	2 %
Carbón marino	1 %	Silicato de Sodio	3%
Carburo de Silicio	88 %	Carburo de Silicio	90 %
<b>Tercera formulación</b>		<b>Cuarta formulación</b>	
Acido Bórico	1.5 %	Acido Bórico	1 %
Grafito	2%	Alcohol etílico	5 %
Oxido férrico	0.5 %	Grafito	3 %
Resina fenólica	3 %	Lignosulfonato de Calcio	2.3 %
Carburo de Silicio	93 %	Oxido férrico	0.5 %
		Carburo de Silicio	88.2 %

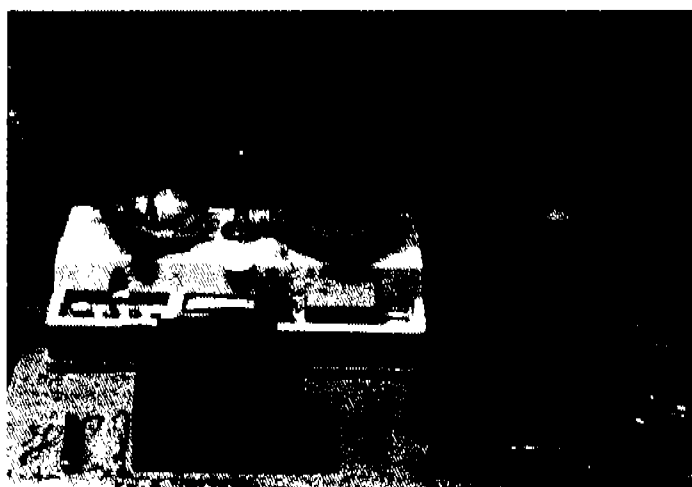


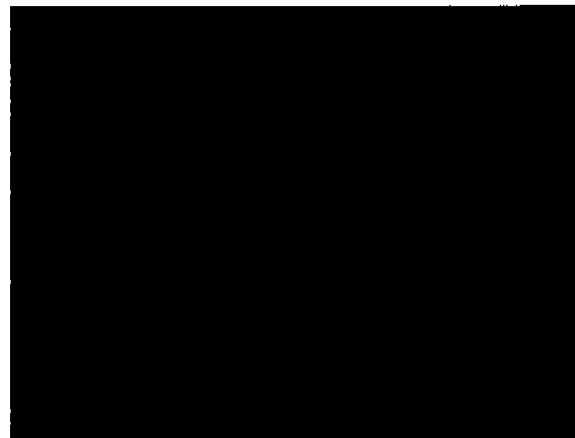
Figura 22. Preparación de las Mezclas

### 2.9 Secado:

Una vez compactadas las probetas se secan en una estufa durante 24 horas a 100 °C hasta tener una humedad de 2.5%-3%;

### 2.10 Sinterizado: <sup>[47]</sup>

Una vez secas se metieron en el horno manteniendo una temperatura de 1490 °C en una atmósfera de nitrógeno durante 15 días.



**Figura 23. Obtención de Probetas**

### 2.11 Molienda



**Figura 24. Obtención de los Polvos para Análisis por Difracción de Rayos X**

Se molió en un mortero de ágata y se pasaron por un tamiz de 150 mallas ó 90 micrones algunas probetas para analizar los polvos por Difracción de rayos X. en un Difractómetro Modelo D5000 Marca Siemens radiación  $K_{\lambda}$  Cu 1.5406 Å° 30Kv @ 20mA.

Se prepararon muestras de 5mmx5mmx4.4mm pegándolas con pasta grafitada en una probeta de aluminio para el Microscopio Electrónico de Barrido (SEM) Marca Cambridge Leica Modelo Stereo-Scan 440

## 2.12 Preparación de Probetas para el Microscopio Óptico:

Se colocaron las muestras de Carburo de Silicio de las probetas que se obtuvieron de las 4 formulaciones, en recipientes hechos exprofeso para que posteriormente se vaciaran con Resina Metacrilato de Metilo



**Figura 25. Probetas para el Microscopio Óptico**

catalizándola con Peróxido de Metil Etil Cetona de Cobalto y Peróxido de Benzoilo y aceleró con Dimetilanilina o Dietilanilina dejándolas reaccionar a temperatura ambiente.

Posteriormente se observaron en un Microscopio Óptico con cámara Marca Dialux Leite con cabeza para 3 oculares de 10X con objetivos de 2.5X/0.08, 10X/0.25, 25X/0.5, 40X/0.6, y con aceite 100X/1.3, 6V/15W Cámara Orthomat automática de 35mm con sistema ajustable de 6.3X-10X

## 2.13 Encolado del Extensímetro:



**Figura 26. Encolado del Extensímetro**

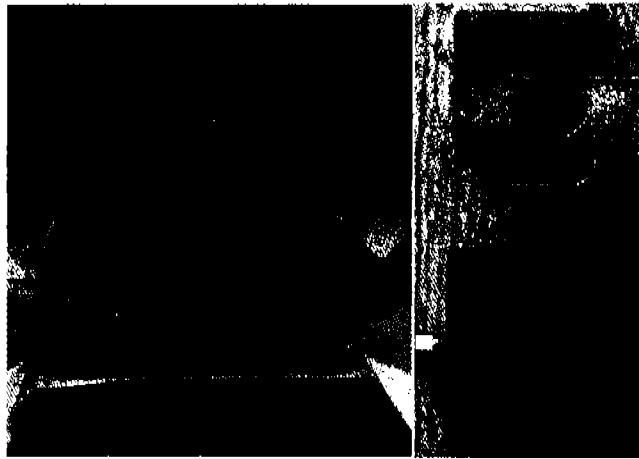
Una vez localizado el sitio en la probeta se encolaron los Extensímetros y resistencias Eléctricas con una cola isoelástica BR610 con una presión de 15 Newtons y una Tempertura de 280 °C, para poder obtener las

propiedades mecánicas .



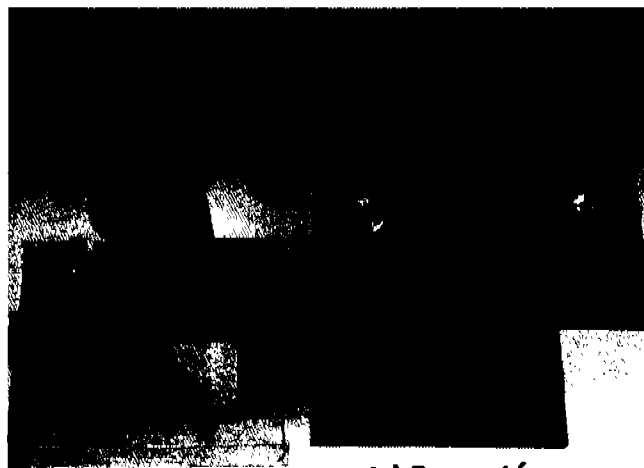
### 2.14 Maquinado de 2 Celdas de carga para medir la Tracción y la Compresión

Se maquinaron dos transductores de micro medida, uno de aluminio con capacidad de 10 Newton, el segundo, de acero inoxidable con capacidad de 150 Newton.



**Figura 27. Maquinado de los Transductores**

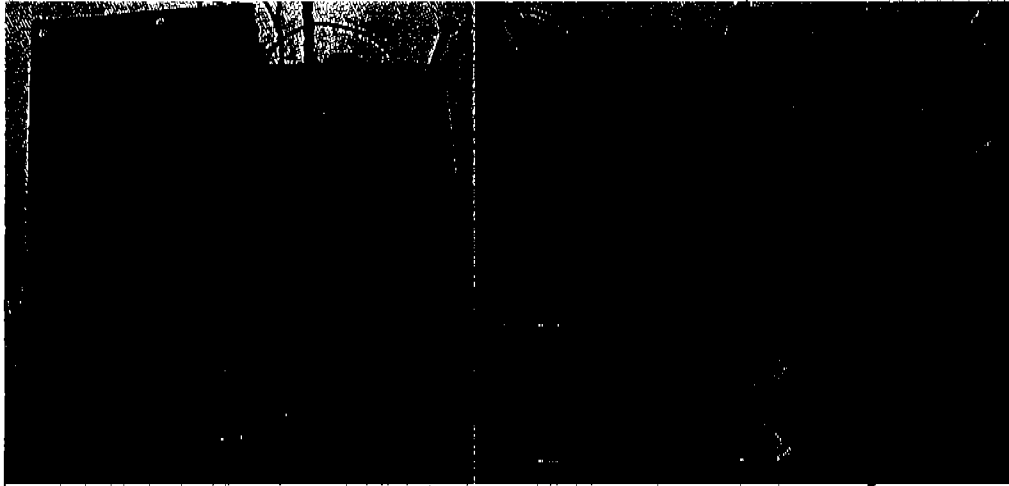
2.15 Se construyeron los Dispositivos para la Fijación de las Probetas en los Ensayos de Flexión y Tracción:



**a) Flexión                      b) Tracción**  
**Figura 28. Dispositivos de Fijación**

Dispositivos de fijación: a) para empotrar la probeta en la columna, uno de sus extremos. b) para fijar la probeta por medio de mordazas en los dos extremos.

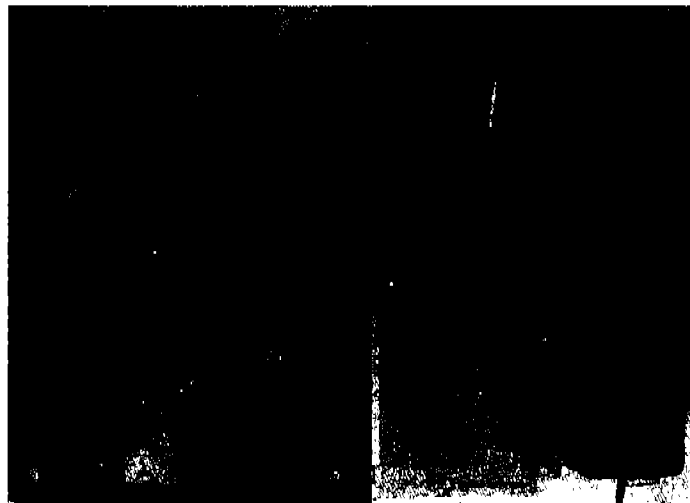
**2.16 Se hace un Amplificador de Instrumentación con su Fuente de Voltaje.**



**Figura 29. Amplificador de Instrumentación**

El amplificador de instrumentación nos proporciona la microdeformación adimensional

**2.17 Transformador Diferencial Lineal Variable con Amplificador y su Oscilador**



**Figura 30. Transformador diferencial Variable**

Con el transformador diferencial variable obtenemos el desplazamiento de la flecha en mm.

## CAPITULO III

### RESULTADOS

#### 3.1 Ensayos no Destructivos:

Se tomaron 4 probetas para encolarles Extensímetros y someterlas, una a ensayos de tracción y tres a flexión, variando las cargas desde 100gr. hasta 5000gr. para obtener las deformaciones y flechas. Así obtener por 4 distintos Métodos el Modulo de Elasticidad

##### 3.1.1 Ensayo de Flexión:

Sujetando la probeta en el dispositivo que aparece en el inciso a) de la Fotografía de la figura 28, se somete el extremo libre de la probeta a una fuerza variable por medio de la celda de carga para provocar una micro deformación y al mismo tiempo un desplazamiento, según el esquema 31 y la Fotografía de la Figura 32 en donde se aprecia el Ensayo de Flexión con Extensímetros y el Desplazamiento con un Transformador Lineal Diferencial Variable.

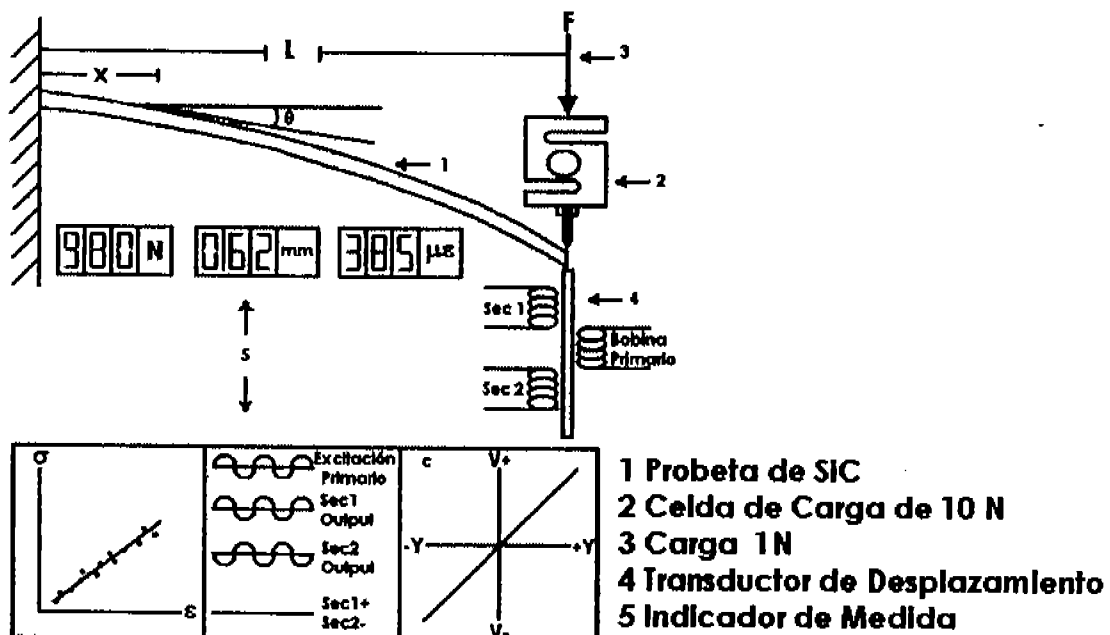


Figura 31. Esquema de Ensayo a la Flexión



**Figura 32. Ensayo a la Flexión**

### 3.1.2 Ensayo a la Flexión, Deformación contra Carga

Tabla N°1

Resultados del Ensayo en la Probeta de la Formulación N°1  
Deformación contra Carga

$\epsilon$	$\sigma$	$\epsilon * \sigma$	$\epsilon * \epsilon$
160	200	32000	25600
190	260	49400	36100
290	390	113100	84100
410	530	217300	168100
510	660	336600	260100
590	790	466100	348100
690	920	634800	476100
760	1000	760000	577600
810	1050	850500	656100
920	1190	1094800	846400
5330	6990	4554600	3478300

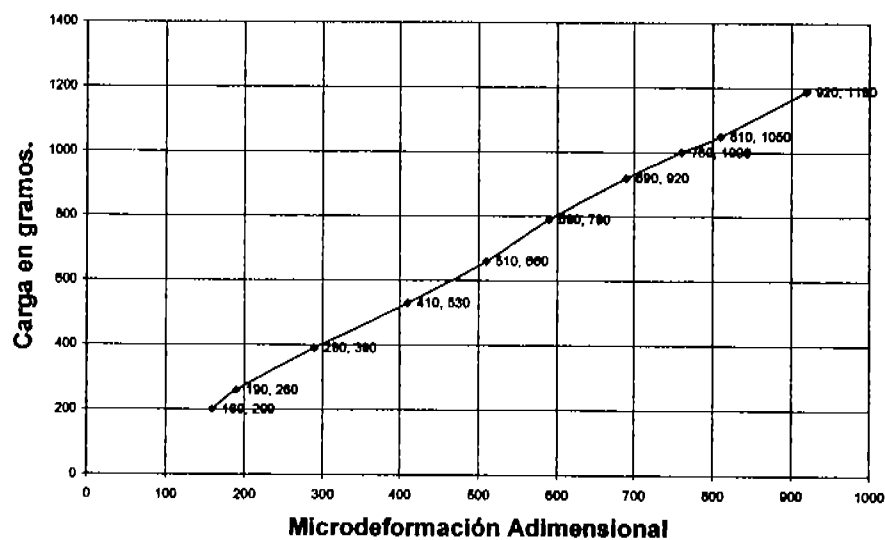


Figura 33. Gráfica de los Resultados de la Probeta de la Muestra 1

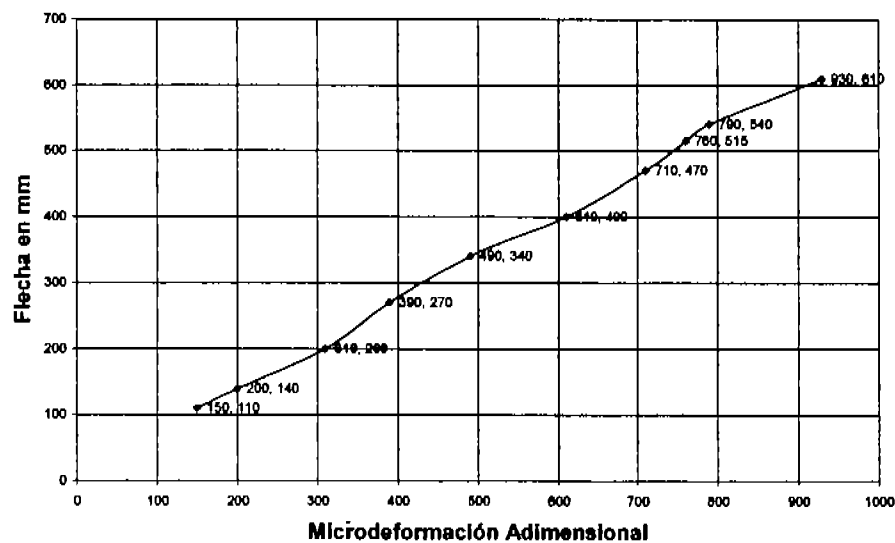
En la figura 33. Se observa la curva que nos representa la variación de la Deformación en la Probeta, de la Muestra 1, al someterla a un Ensayo a la Flexión, empotrando uno de sus extremos y aplicando la carga en el extremo libre.

### 3.2 Ensayo a la Flexión, Deformación Contra Flecha.

Tabla N°2

Resultados del Ensayo en la Probeta de la Formulación N°2  
Deformación contra Flecha medida con L.V.D.T

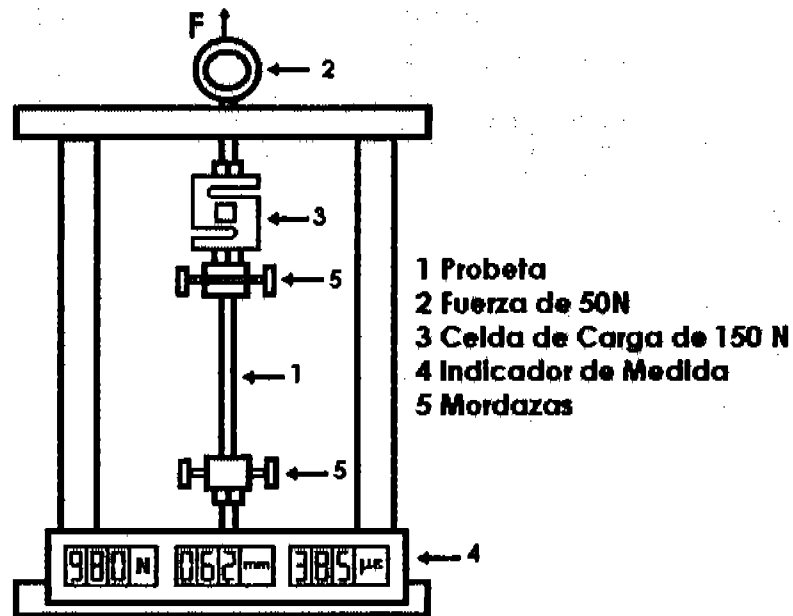
$\epsilon$	$\gamma$	$\epsilon \cdot \gamma$	$\epsilon \cdot \gamma$
150	110	16500	22500
200	140	28000	40000
310	200	62000	96100
390	270	105300	152100
490	340	166600	240100
610	400	244000	372100
710	470	333700	504100
760	515	391400	577600
790	540	426600	624100
930	610	567300	864900
5340	3595	2341400	3493600



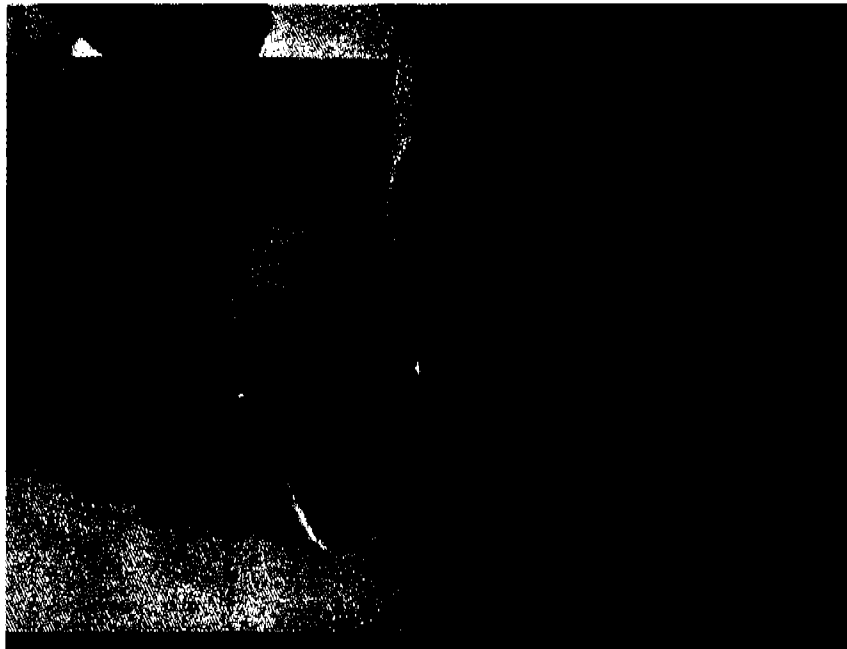
**Figura 34. Gráfica de los resultados de la Probeta de la Muestra 1**

En la Figura 34. Se observa la curva que nos representa la variación de la Flecha en la Probeta, medida con un L.V.D.T. de la Muestra 2, al someterla a un Ensayo a la Flexión, empotrando uno de sus extremos y aplicando una fuerza en el Extremo libre al variar la Deformación

### 3.3 Ensayo a la Tracción, Deformación contra Carga



**Figura 35. Ensayo a la Tracción**

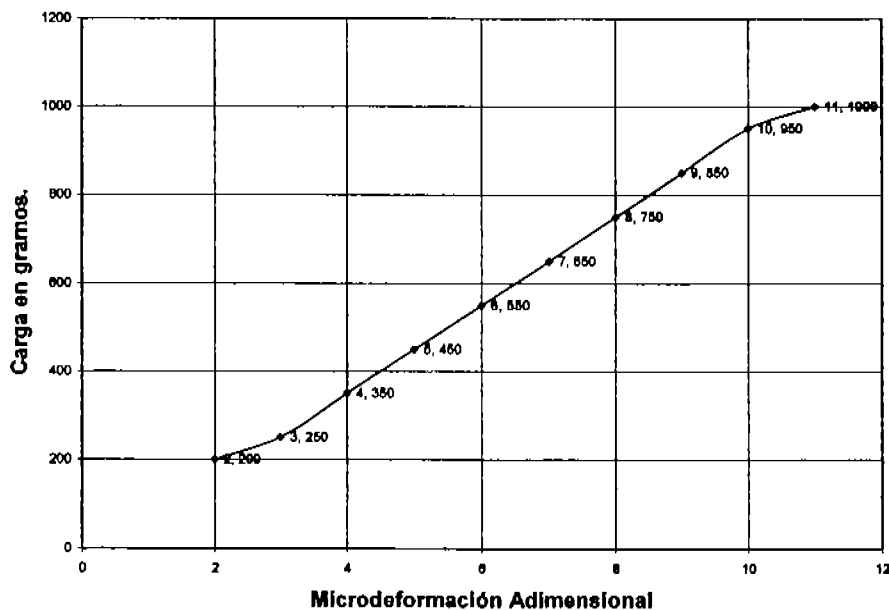


**Figura 36. Ensayo a la Tracción**

Dispositivo para fijar la probeta con las mordazas en sus extremos y someterla a tracción.

**Tabla N°3**  
**Resultados del Ensayo en la Probeta de la Formulación N°3**  
**Deformación contra Carga**

$\epsilon$	$\sigma$	$\epsilon * \sigma$	$\epsilon * \epsilon$
2	200	400	4
3	250	750	9
4	350	1400	16
5	450	2250	25
6	550	3300	36
7	650	4550	49
8	750	6000	64
9	850	7650	81
10	950	9500	100
11	1000	11000	121
65	6000	46800	505



**Figura 37. Gráfica de los resultados de la Probeta de la Muestra 3**

En la Figura 37. Se observa la curva que nos representa la variación de la Deformación en la Probeta, de la Muestra 3, al someterla a una fuerza en un Ensayo a la Tracción sujetándola con mordazas en los 2 extremos y aplicando una fuerza.



### 3.4 Ensayo a la Flexión Flecha contra carga Aplicada por medio de un micrómetro

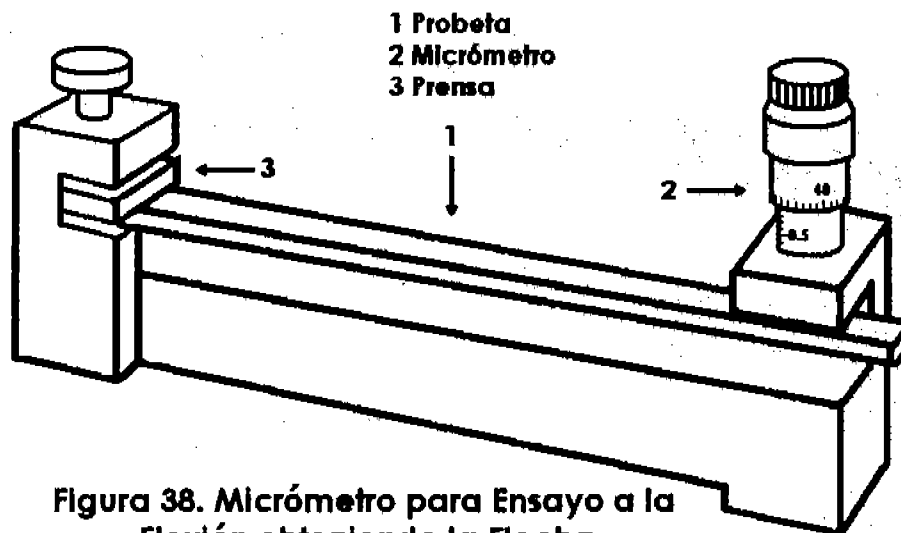


Figura 38. Micrómetro para Ensayo a la Flexión obteniendo la Flecha

Se sujeta la probeta en uno de sus extremos, posteriormente se flexiona por medio del tornillo micrométrico como se ve en la Figura 39 .

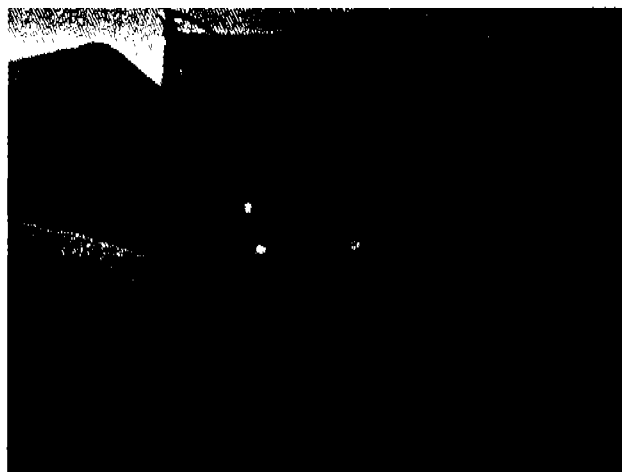


Figura 39. Ensayo a la Flexión medida con Micrómetro

Tabla N°4  
Resultados de la Formulación N°4

Flecha contra Carga medida con Micrómetro

$y$	$\sigma$	$y^*\sigma$	$y^*y$
150	240	36000	22500
190	330	62700	36100
250	400	100000	62500
300	490	147000	90000
370	570	210900	136900
400	660	264000	160000
440	740	325600	193600
515	845	435175	265225
550	900	495000	302500
610	1000	610000	372100
3775	6175	2686375	1641425

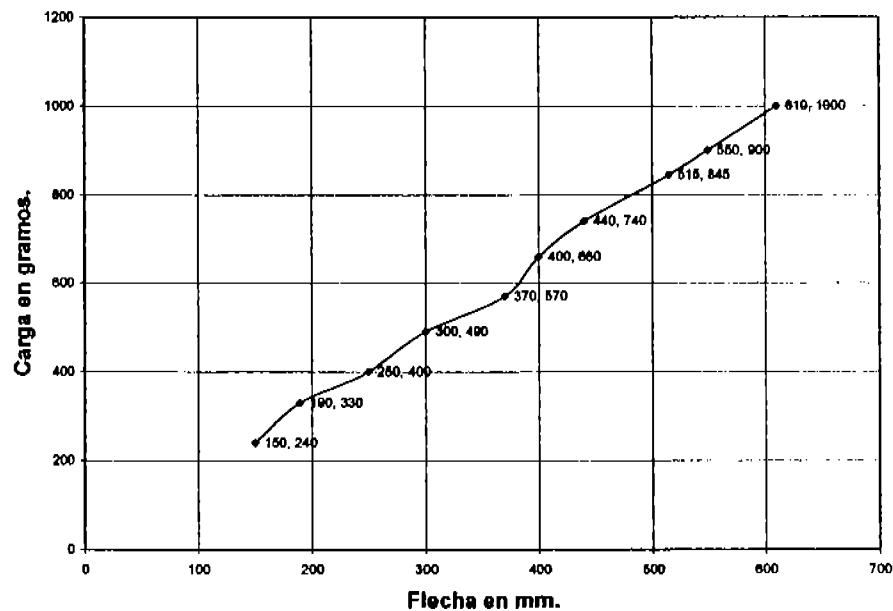


Figura 40. Gráfica de los resultados de la Probeta de la Muestra 4

En la figura 40. Se observa la curva que nos representa la variación de la Flecha en la Probeta, medida con un Micrómetro, de la Muestra 4, al someterla a un Ensayo a la Flexión, empotrando uno de sus extremos y aplicando una fuerza en el Extremo libre al variar la Deformación

## 3.5 Difracción de Rayos X

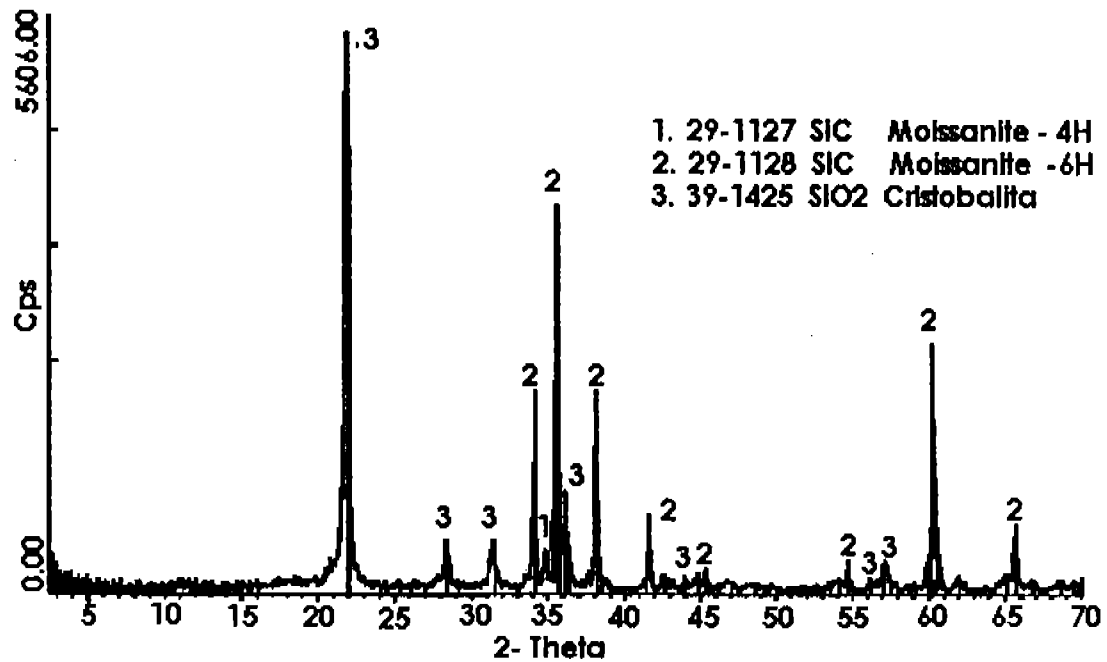


Figura 41. Difractograma de la formulación N°1

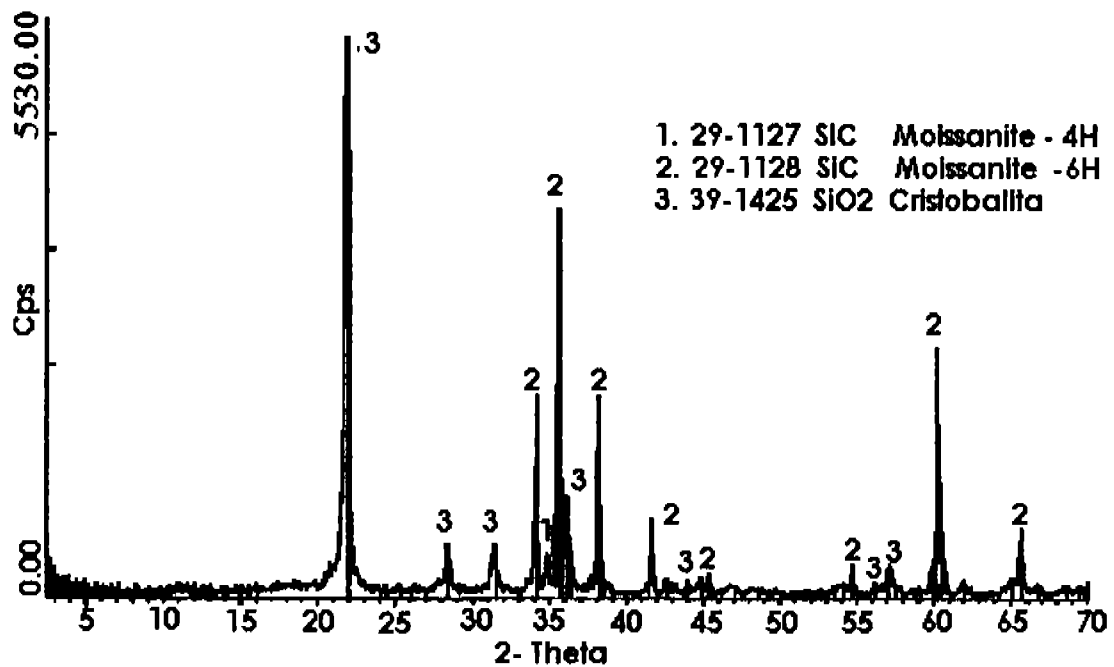


Figura 42. Difractograma de la formulación N°2

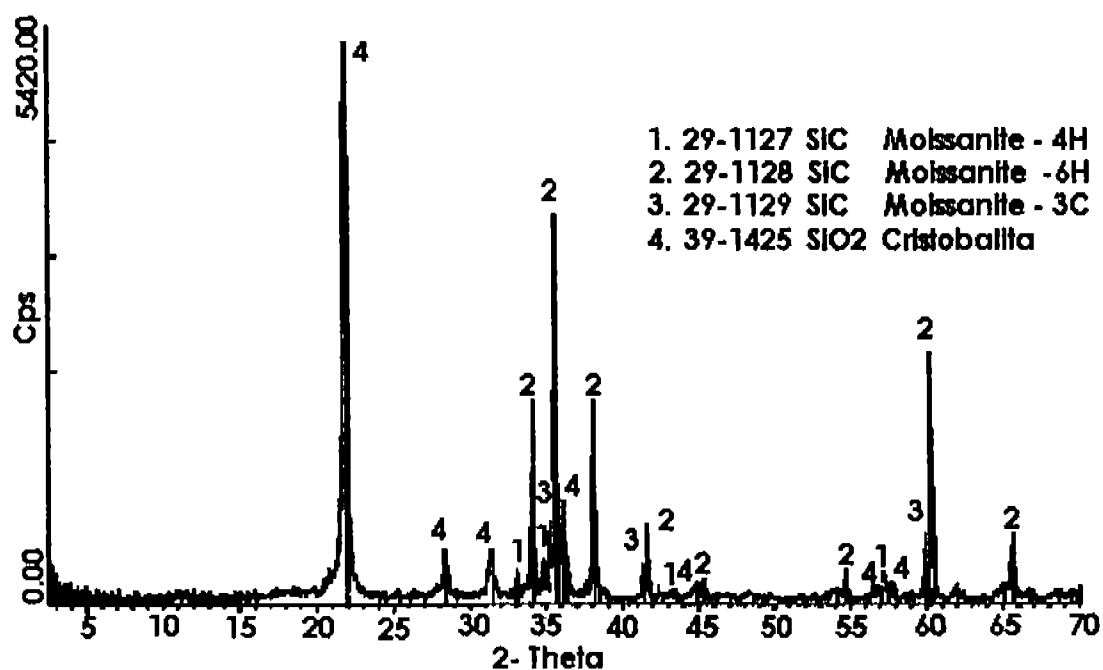


Figura 43. Difractograma de la formulación N°3

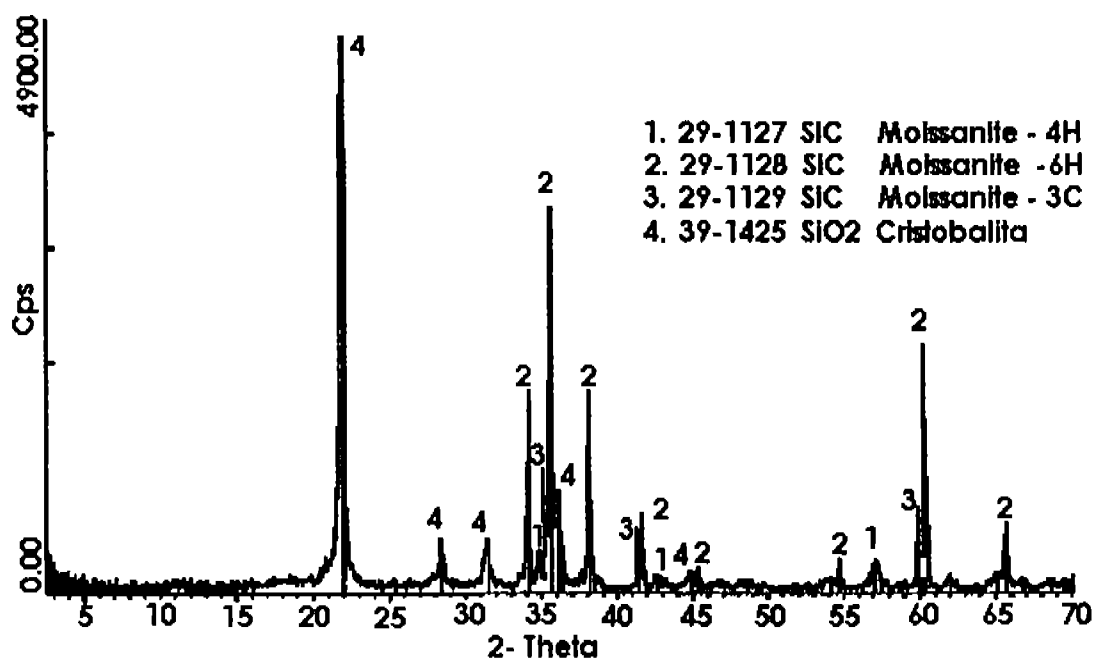


Figura 44. Difractograma de la formulación N°4

3.5.1 En la Tabla N°5 se presentan los resultados de los Difractogramas

TABLA N °5

RESULTADOS DEL ENSAYO DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X

2θ	MUESTRA N°1			MUESTRA N°2			MUESTRA N°3				MUESTRA N°4			
	SiO <sub>2</sub>	4H	6H	SiO <sub>2</sub>	4H	6H	SiO <sub>2</sub>	3C	4H	6H	SiO <sub>2</sub>	3C	4H	6H
21,984	35,3			35,3			32,3				32,3			
28,438	2,9			2,9			2,9				2,9			
31,461	3,1			3,1			3,1				3,1			
33,549		2,2			2,2				1,6				1,7	
34,088			5,9			5,9				5,6				5,6
34,756									2,8				2,8	
35,597								3,7				5		
35,655			19,1			19,1				16				16
35,67														
36,079	5,7			5,7			5,7				5,7			
38,15			7,4			7,4				5,4				5,4
38,151														
41,383								0,7				1		
41,403			2,8			2,8				1,8				1,8
43,297									0,57				0,46	
44,842	0,57			0,57			0,57				0,57			
45,322			0,57			0,57				0,57				0,57
54,683			0,85			0,85				0,85				0,85
56,218	0,28			0,28			0,28				0,28			
57,082	0,57			0,57			0,57				0,57			
57,295								1,4	0,57			0,8	0,57	
57,506	0,28			0,28			0,28				0,28			
59,977														
59,994			9,6			9,6				8,7				8,7
65,712			2,8			2,8				2,8				2,8

### 3.6 Micrografías del Microscopio Óptico



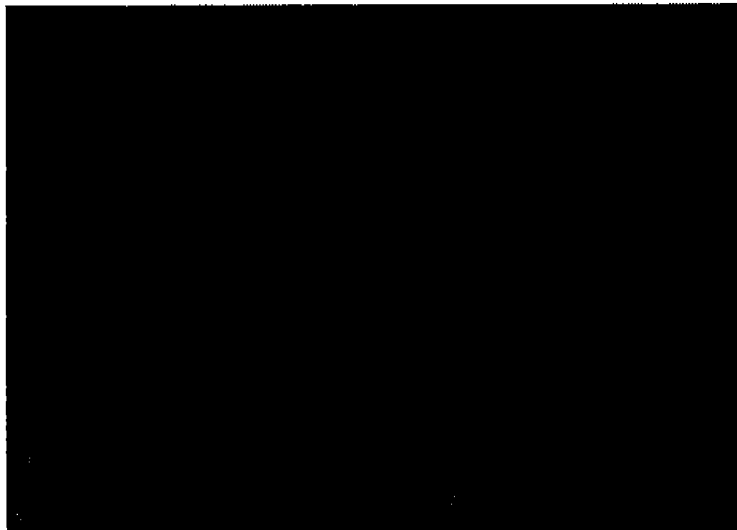
**Figura 45. Micrografía de la Muestra N°1 del Microscopio Óptico a 2.5X/0.08**

En la Figura 45, la Micrografía de la Muestra N°1 con 49.3% de Cristobalita partes claras, 2.2% de Carburo de Silicio 4H y 49% de Carburo de Silicio 6H partes oscuras y substratos de Grafito marcados por las flechas.



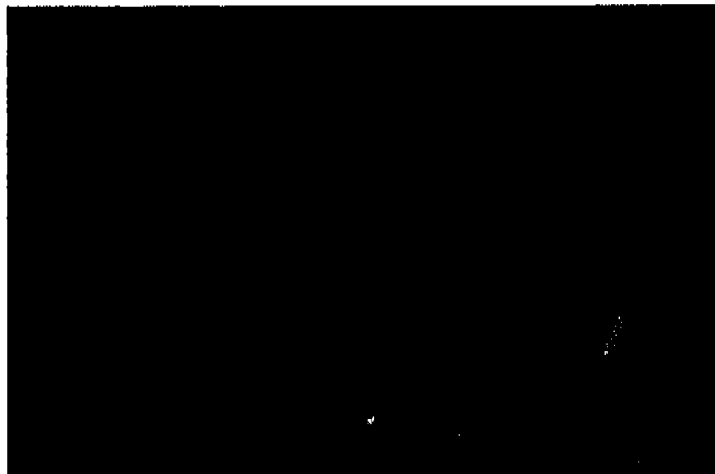
**Figura 46. Micrografía de la Muestra N°2 del Microscopio Óptico a 40X/0.6**

En la Figura 46 de la Micrografía de la Muestra N°2 Con 49.3% de Cristobalita 2.2% de Carburo de Silicio 4H y 49% de Carburo de Silicio 6H también se ve que está muy homogénea en donde las partes oscuras son Carburo de Silicio y las partes claras son de Dióxido de Silicio.



**Figura 47. Micrografía de la Muestra N°3 del Microscopio Óptico 10X/0.25**

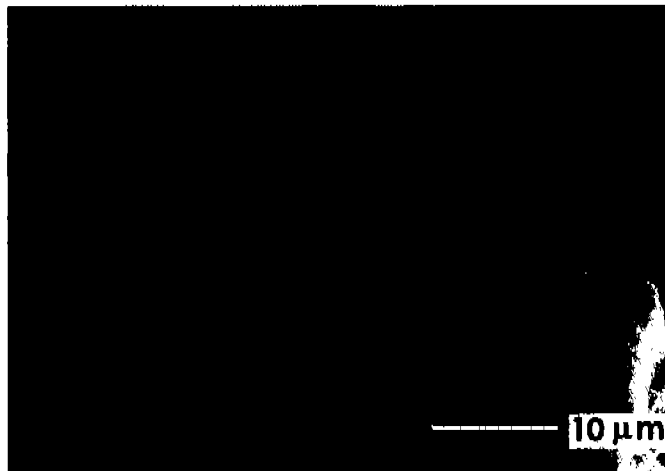
En la Figura 47 de la Micrografía de la Muestra N°3 Con 45.7% Cristobalita, 5.8% de Carburo de Silicio 3C 5.6% de Carburo de Silicio 4H y 42% de Carburo de Silicio 6H. También observamos poros y zonas oscuras que son substratos de grafito.



**Figura 48. Micrografía de la Muestra N°4 del Microscopio Óptico a 10X/0.25**

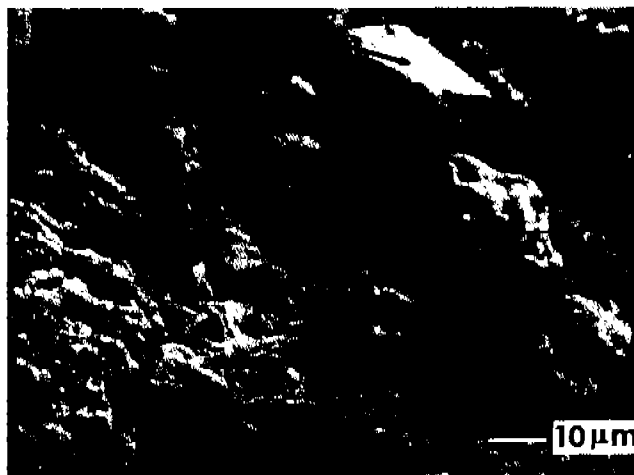
En la Figura 48 de la Micrografía de la Muestra N°4 Con 45.6% de Cristobalita 6.8% de Carburo de Silicio 3C 5.5% de Carburo de Silicio 4H y 42% de Carburo de Silicio 6H vemos que está mas homogénea porque los substratos de grafito están más distribuidos.

### 3.7 Microscopio Electrónico de Barrido



**Figura 49. Micrografía del Microscopio Electrónico de Barrido de la Muestra N°1 a 10KV X7.00**

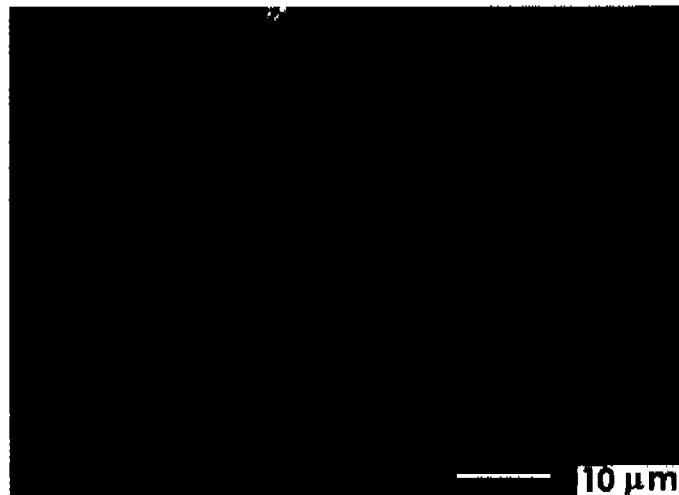
En la Figura 49 de la Micrografía del Microscopio Electrónico de Barrido de la Muestra N°1 de la Formulación N°1, se observa una sinterización completa a pesar de las depresiones de los poros; donde las zonas oscuras son de carburo de Silicio 6H y las zonas claras son de Dióxido de Silicio.



**Figura 50. Micrografía del Microscopio Electrónico de Barrido de la Muestra N°2 10KV X1.5K**

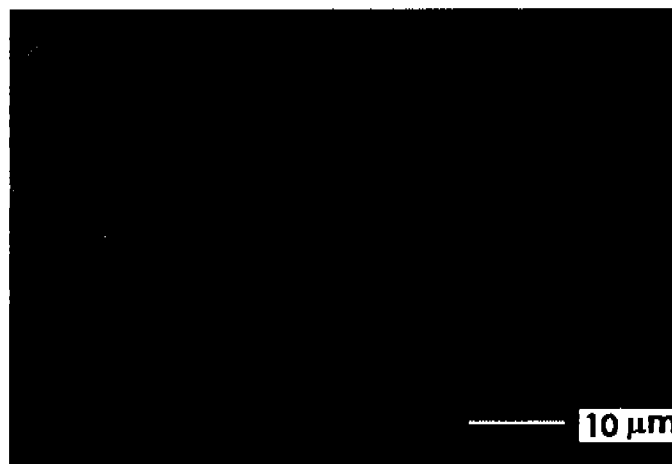
En la Figura 50 de la Micrografía del Microscopio Electrónico de Barrido de la Muestra N°2 de la Formulación 2, vemos que no ocurre una sinterización completa pues todavía hay granos sueltos de carburo de Silicio 6H sueltos.





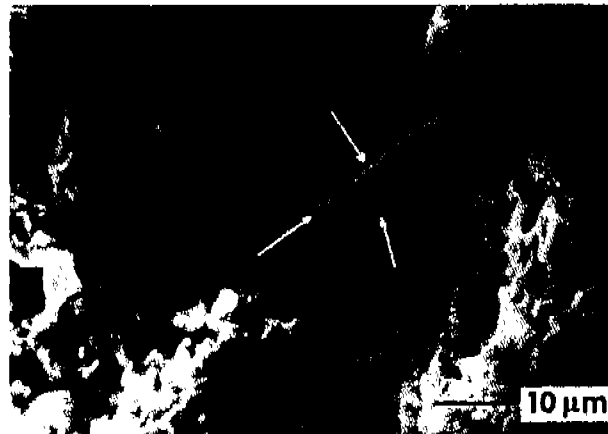
**Figura 51. Micrografía del Microscopio  
Electrónico de Barrido de la Muestra N°3.1  
10KV X3.00K**

En la Figura 51 de la Micrografía del Microscopio Electrónico de Barrido de la Muestra N°3.1 de la Formulación N°3, vemos la formación de una estructura parecida a un cristal Hexagonal de SiC con una longitud de aproximadamente 20 μm



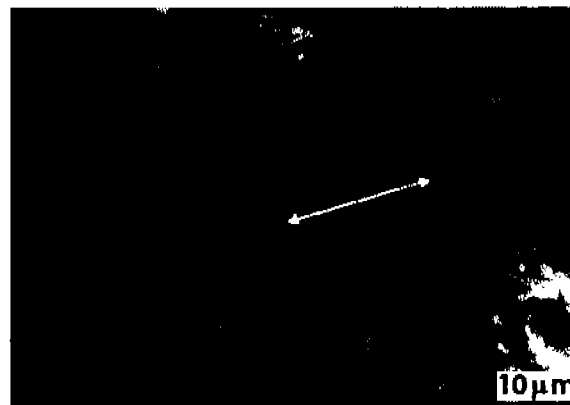
**Figura 52. Micrografía del Microscopio  
Electrónico de Barrido de la Muestra N°3.2  
10KV X3.00**

En la Figura 52 del Microscopio Electrónico de Barrido de la Muestra N°3.2 de la Formulación N°3, vemos la formación de una nueva capa incorrecta entre las capas átomos en el mecanismo de dislocación deslizándose a otro plano al desviarse el crecimiento del filamento de SiC de 30μm<sup>[22]</sup>



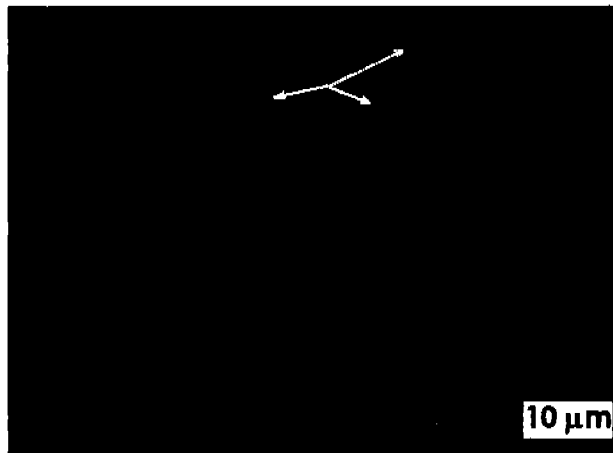
**Figura 53. Micrografía del Microscopio Electrónico de Barrido de la Muestra N°3.3  
10KV X3.00K**

En la Figura 53 de la Micrografía del Microscopio Electrónico de Barrido de la Muestra N°3.3 de la Formulación N°3, vemos una falla de deformación, en el crecimiento del filamento de SiC, de 20m $\mu$  de longitud, cambiando su dirección y rompiendo la periodicidad en el diámetro. <sup>[22]</sup>



**Figura 54. Micrografía del Microscopio Electrónico de Barrido de la Muestra N° 3.4  
10KV X3.00K**

En la Figura 54 de la Micrografía del Microscopio Electrónico de Barrido de la Muestra 3.4 de la Formulación N°3, vemos como por el Mecanismo de crecimiento Vapor Líquido Solidó "VLS" de los filamentos de SiC de 20 a 30 m $\mu$  de longitud, formándose en los substratos de grafito.



**Figura 55. Micrografía del Microscopio Electrónico de Barrido de la Muestra N°3.5  
10KV X3.00K**

En la Figura 55 del Microscopio Electrónico de Barrido de la Muestra 3.5 de la Formulación N°3, observamos filamentos de SiC de aproximadamente 30  $\mu\text{m}$  de longitud en donde las puntas tienen forma esférica provocada por el Fe en el mecanismo de crecimiento.

Además vemos que las raíces de los filamentos SiC son delgadas variando su diámetro en el mecanismo de crecimiento<sup>[22]</sup>



**Figura 56. Micrografía del Microscopio Electrónico de Barrido de la Muestra N°4.1  
10KV X2.00K**

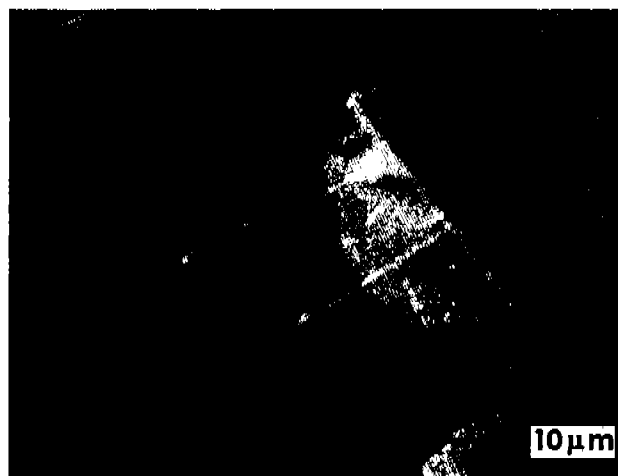
En la Figura 56 de la Micrografía del Microscopio Electrónico de Barrido de la Muestra N°4.1 de la formulación N°4, podemos observar en la parte derecha, una zona de filamentos de Carburo de Silicio de aproximadamente

unos 20 $\mu$ m de longitud, con una estructura de 3 C ó  $\beta$  SiC. y otra zona clara Cristobalita y zonas oscuras 6H SiC. [22]



**Figura 57. Micrografía del Microscopio Electrónico de Barrido de la Muestra N°4.2**  
10KV X3.00K

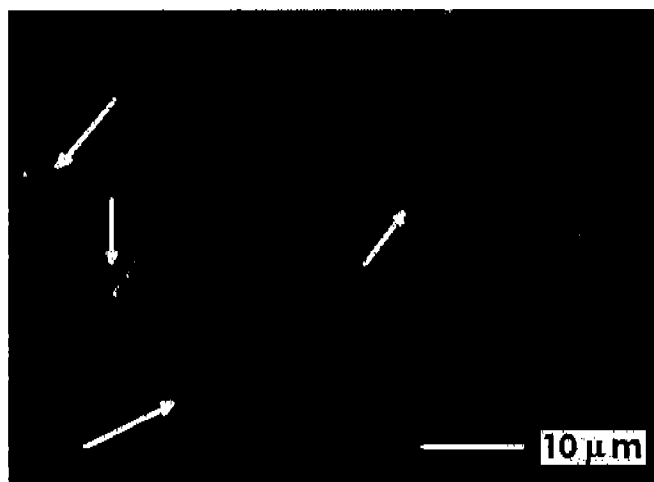
En la Figura 57 de la Micrografía del Microscopio Electrónico de Barrido de la Muestra 4.2 de la Formulación N°4 , vemos la formación de los filamentos de Carburo de Silicio de 5 a 10  $\mu$ m de longitud, de 3C ó  $\beta$  SiC, también observamos las zonas oscuras que son Carburo de Silicio 6H y las zonas claras Dióxido de Silicio o Cristobalita [22]



**Figura 58. Micrografía del Microscopio Electrónico de Barrido de la Muestra N°4.3**  
10 KV X3.50K

En la Figura 58 de la Micrografía del Microscopio Electrónico de Barrido de la Muestra N°4.3 de la Formulación N°4, vemos una vista general de

filamentos típicos de SiC de 20 a 30  $\mu\text{m}$  de longitud, con una pequeña perturbación cuando cambia el ángulo de contacto entre la gotita y el filamento. Sitio perfecto para generar una punta alargada y doblada, provocada por una falla en el apilamiento. <sup>[22]</sup>



**Figura 59. Micrografía del Microscopio Electrónico de Barrido de la Muestra 4.4  
10KV X3.50K**

En la Figura 59 de la Micrografía de microscopio Electrónico de Barrido de la Muestra N°4.4 de la Formulaci3n N°4, observamos como en los filamentos de Carburo de Silicio, Parece ser que los átomos pierden la memoria al moverse superficialmente para acomodarse a una posici3n mas favorable debido a una pequeña diferencia de energía en el cristal cuando se apilan, produciendo mecanismos de dislocaci3n helicoidales 3 crecimientos en espiral, cambiando el car3cter del cristal.

Tambi3n observamos que un filamento gemelo provoca un aumento en el 3rea de la superficie lateral relativamente grande variando as3 su di3metro <sup>[22]</sup>

## CAPITULO IV

### ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 4.1 Regresión Lineal Simple

##### 4.1.1 Método de Mínimos Cuadrados

Considerando una relación funcional postulada de la forma:

$$\eta = \alpha + \beta x ; \hat{Y} = a + bx \quad \text{o} \quad \sigma = a + b\varepsilon$$

Aplicando el método de mínimos cuadrados y resolviendo el sistema por determinantes:

##### 4.1.1.1 Para la Formulación N°1

Basándose en la Tabla N°1 y la Figura 33 en donde la variable independiente es la Microdeformación, adimensional y la variable dependiente es el Esfuerzo en gramos, obtenemos los siguientes resultados:

$$a = \frac{\sum \varepsilon^2 \sum \sigma - \sum \varepsilon \sum \varepsilon \sigma}{n \sum \varepsilon^2 - (\sum \varepsilon)^2} \quad b = \frac{n \sum \varepsilon \sigma - \sum \varepsilon \sum \sigma}{n \sum \varepsilon^2 - (\sum \varepsilon)^2}$$

$$a = \frac{3478300 * 6990 - 5330 * 4554600}{10 * 3478300 - 5330^2} = 5.851649645$$

$$b = \frac{10 * 4554600 - 5330 * 6990}{10 * 3478300 - 5330^2} = 1.300465948$$

Ecuación para la Formulación N°1

$$\sigma = 1.3\varepsilon + 5.85 \quad \dots 43$$

##### 4.1.1.2 Para la Formulación N°2

Con la Tabla N°2 y la Figura 34 en donde la variable independiente es la microdeformación adimensional y la variable dependiente es la Flecha en mm. Da los resultados siguientes:

$$a = \frac{\sum \varepsilon^2 \sum y - \sum \varepsilon \sum \varepsilon y}{n \sum \varepsilon^2 - (\sum \varepsilon)^2} \quad b = \frac{n \sum \varepsilon y - \sum \varepsilon \sum y}{n \sum \varepsilon^2 - (\sum \varepsilon)^2}$$

$$a = \frac{3493600 * 3595 - 5340 * 2341400}{10 * 3493600 - 5340^2} = 8.786991466$$

$$b = \frac{10 * 2341400 - 5340 * 3595}{10 * 3493600 - 5340^2} = 0.6567659336$$

$$y = 0.7\varepsilon + 8.78 \quad \dots 44$$

#### 4.1.1.3 Para la Formulación N°3

De la Tabla 3 y la Figura 37 donde la variable independiente es la microdeformación adimensional y la variable dependiente es el Esfuerzo en gramos se extraen los siguientes resultados:

$$a = \frac{\Sigma \varepsilon^2 \Sigma \sigma - \Sigma \varepsilon \Sigma \varepsilon \sigma}{n \Sigma \varepsilon^2 - (\Sigma \varepsilon)^2} \quad b = \frac{n \Sigma \varepsilon \sigma - \Sigma \varepsilon \Sigma \sigma}{n \Sigma \varepsilon^2 - (\Sigma \varepsilon)^2}$$

$$a = \frac{505 * 6000 - 65 * 46800}{10 * 505 - 65^2} = -14.5454545$$

$$b = \frac{10 * 46800 - 65 * 6000}{10 * 505 - 65^2} = 94.5454545$$

$$\sigma = 94.5\varepsilon - 14.5 \quad \dots 45$$

#### 4.1.1.4 Para la Formulación N°4

De la Tabla N°4 y la Figura 40 en donde la variable independiente es la Flecha en mm. y la variable dependiente es el Esfuerzo en gramos obtenemos los siguientes resultados:

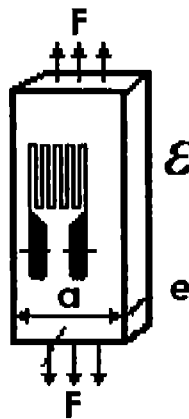
$$a = \frac{\Sigma y^2 \Sigma \sigma - \Sigma y \Sigma y \sigma}{n \Sigma y^2 - (\Sigma y)^2} \quad b = \frac{n \Sigma y \sigma - \Sigma y \Sigma \sigma}{n \Sigma y^2 - (\Sigma y)^2}$$

$$a = \frac{1641425 * 6175 - 3775 * 2686375}{10 * 1641425 - 3775^2} = -2.433993876$$

$$b = \frac{10 * 2686375 - 3775 * 6175}{10 * 1641425 - 3775^2} = 1.642209255$$

$$\sigma = 1.64y - 2.44 \quad \dots 46$$

#### 4.2. Tabla N°6 Fórmulas para Cálculos de los Extensímetros.



$$\varepsilon = \frac{F}{E a e}$$

**Extensímetro a Tracción**

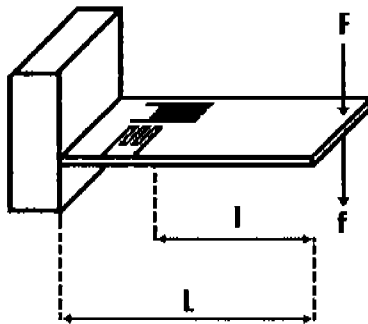
**F = Fuerza aplicada**

**E = Módulo de Elasticidad**

**a = ancho**

**e = espesor**

**$\varepsilon$  = Microdeformación**



**Extensímetro a la Flexión**

**F = Fuerza Aplicada**

**l = Distancia de la fuerza aplicada al Extensímetro**

**f = Desplazamiento de la Flecha**

**e = espesor**

**a = ancho**

**E = Modulo de Elasticidad**

$$\varepsilon = \frac{6 F l}{E a e^2} \quad \varepsilon = \frac{3 e l}{2 L^3} f \quad f = \frac{4 F L^3}{E a e^3}$$

\*NOTA: Al encolar los Extensímetros y empotrar la probeta, puede variar la medida.



### 4.3. Explotación de los Transductores

#### 4.3.1 Formulación N° 1

Para un kilogramo de carga en el extremo libre, Largo = 49.5mm, ancho = 15.5mm, espesor = 4.4mm y una Microdeformación de 760. Que sustituyendo en la formula 47 de la Tabla N° 6 nos da:

$$E = \frac{6 F l}{\varepsilon a e^2} = \dots 47$$

$$\frac{(6) (9.81N) (49.5mm)}{(0.000760) (15.5mm) (4.4^2 mm^2)} = 12775.34 \frac{N}{mm^2}$$

Y en la formula 48 nos da una flecha de:

$$y = \frac{2 \varepsilon L^3}{3 e l} = \dots 48$$

$$\frac{(2) (0.000760) (60.5^3 mm^3)}{(3) (4.4mm) (49.5mm)} = 0.515mm$$

### 4.3.2 Formulación N° 2

Para un kilogramo de carga en el extremo libre,  $L = 64\text{mm}$ ,  $a = 15.5\text{mm}$ ,  $e = 4.4\text{mm}$  y con un transformador diferencial lineal (LVDT).

Se obtuvo una flecha de  $0.609\text{ mm}$ . y sustituyendo en la formula 49

$$E = \frac{4 F L^3}{y a e^3} = \dots 49$$

$$\frac{(4) (9.81\text{N}) (64^3 \text{mm}^3)}{(0.609\text{mm}) (15.5\text{mm}) (4.4^3 \text{mm}^3)} = 12792.69 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

### 4.3.3 Formulación N° 3

Esta probeta se somete a tracción encolándole dos rosetas a  $45^\circ$  en cada lado en sentido opuesto para que así de esta manera se absorba cualquier esfuerzo fuera de su eje axial ; sometiéndola a una carga de un kilogramo, un voltaje de excitación de  $2\text{ Vcd}$ . y Extensímetros de  $305\ \Omega$ .

Con un factor de la galga de 2

$$E_1 - E_2 = \frac{V_0}{\text{Ganancia}} = 44.3\text{mv} \dots 50$$

$$\Delta R = \frac{R(E_1 - E_2)}{E} = \frac{305\Omega(0.043 \times 10^{-3}\text{V})}{2\text{V}} = 0.006557\Omega \dots 51$$

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{0.006557\Omega}{305\Omega} = 21.5 \times 10^{-6} \mu \frac{\Omega}{\Omega} \dots 52$$

K factor de la galga

$$\frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta L}{L}} \therefore \frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta R}{K} = \frac{21.5 \times 10^{-6} \mu \frac{\Omega}{\Omega}}{2} = 10.75 \times 10^{-6} \mu \varepsilon \quad \dots 53$$

De la formula 54 donde  $a = 15.5\text{mm}$   $e = 4.4\text{mm}$  se obtiene el Módulo de Elasticidad

$$E = \frac{F}{\varepsilon a e} \quad \dots 54$$

$$\frac{9.81\text{N}}{10.75 \times 10^{-6} \quad 15.5\text{mm} \quad 4.4\text{mm}} = 13380 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

#### 4.3.4 Formulación N° 4

Midiendo la flecha con un micrómetro, nos da una flecha de 0.66mm. con una carga de 0.452 N/mm en función de la distancia entre el Extensímetro y el punto de aplicación de la Fuerza de 49.5 mm. que sustituyendo en la formula (42), y el Micrómetro Figura. 26, obtenemos:

$$E = \frac{q_0 L^4}{8y(x)I} = \frac{(0.452\text{N/mm})(64^4\text{mm}^4)}{8(0.66\text{mm})(106.5\text{mm}^4)}$$

$$13485.74 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

#### 4.4 Gráficas de los datos obtenidos de las Muestras de las Formulaciones

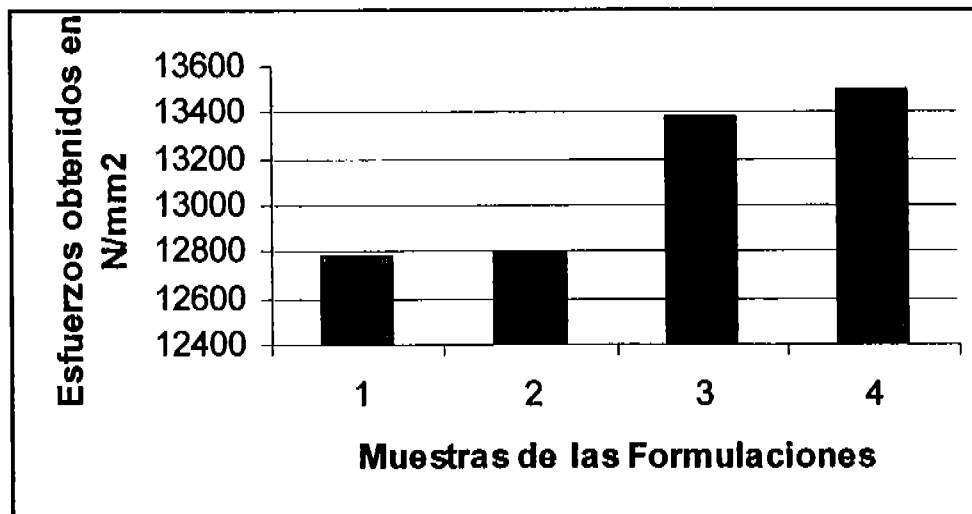


Figura 60. Gráfica de las Muestras de las Formulaciones contra los Esfuerzos en  $N/mm^2$

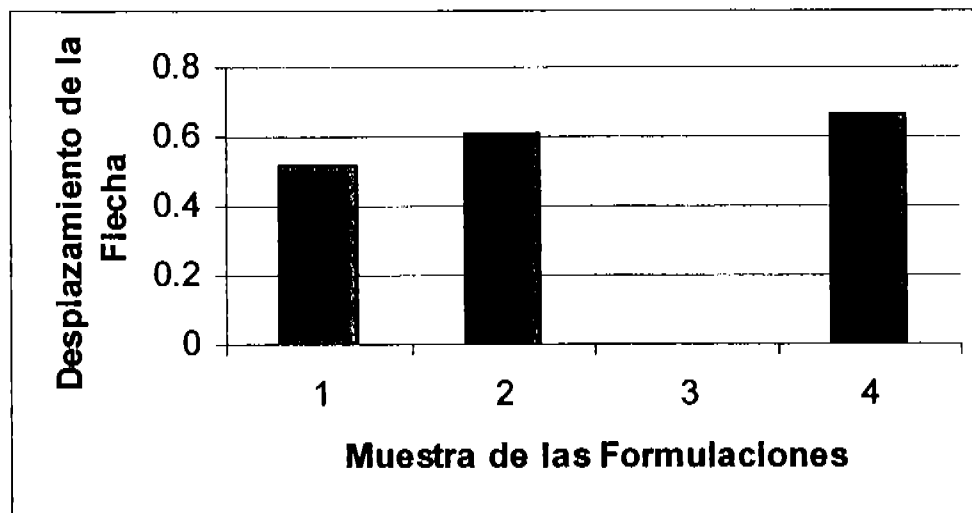


Figura 61. Gráfica de las Muestras de las Formulaciones contra la variación de la Flecha en mm.

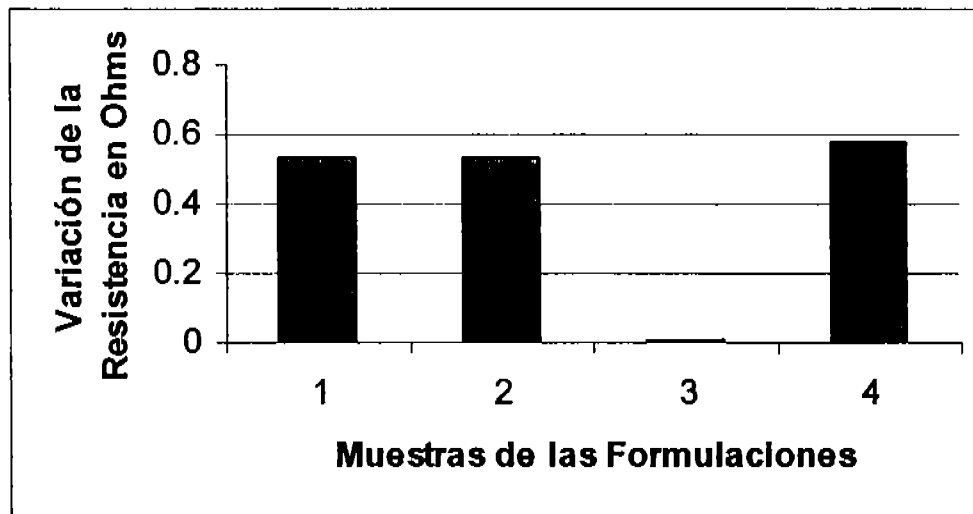


Figura 62. Gráfica de las Muestras de las Formulaciones contra la Variación de la Resistencia en Ohms.

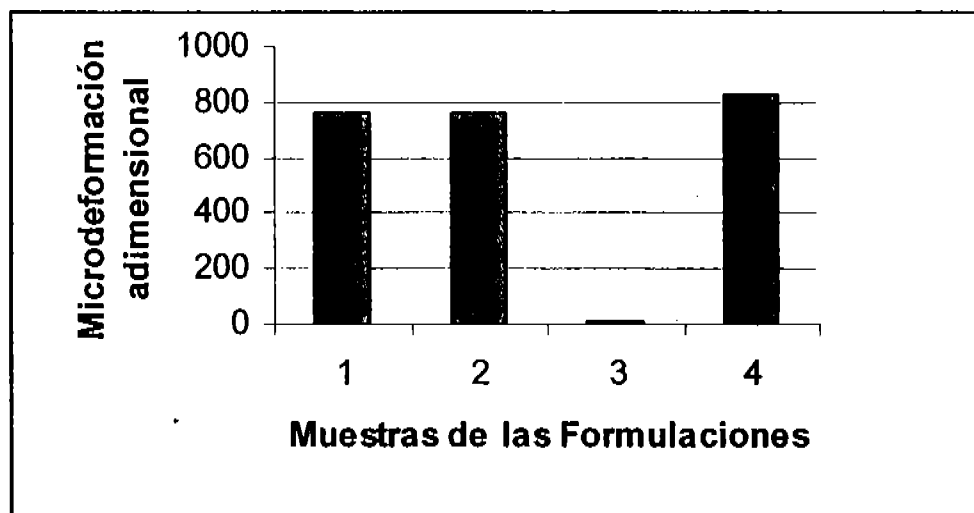


Figura 63. Gráfica de las Muestras de las Formulaciones contra la Microdeformación adimensional.

## CAPITULO V

### CONCLUSIONES

Del Trabajo experimental de investigación realizado (Microscopía Óptica, Microscopía Electrónica de Barrido, Difracción de Rayos X, Ensayos a la Flexión, Ensayos a la Tracción y construcción de equipo. se puede establecer los resultados siguientes:

1. El Objetivo de la presente investigación se cumplió, al determinar los Módulos de Elasticidad del material que se obtuvo, en donde la Formulación N°4 fue la mejor con el aglutinante de Lignosulfonato de Calcio pues es la que tiene mayor cantidad de Filamentos

2. La Tecnología que se utilizó, fue la Extensometría, que es la más adecuada, cuando se desconocen las propiedades de los materiales; por fiel y confiable, pues toda la teoría que se desarrolla, se demuestra en la práctica.

3. El desarrollo y construcción del equipo que se realizó es Preciso y Exacto hasta la tercera cifra decimal, sin tener variación

4. En los Difractogramas que se obtuvieron propiamente predominan la Cristobalita y el Carburo de Silicio 6H, dándonos como consecuencia poca cantidad de filamentos 3C SiC, como se observa en las Micrografías de Microscopio Electrónico de Barrido.

5. Las pendientes en la regresión lineal son muy parecidas dándonos Módulos de Elasticidad muy parecidos del orden de Megapascales.

6. Esta Técnica se puede aplicar a cualquier material, con la ventaja de que los ensayos que se realizan no son destructivos.

7. Toda esta experiencia, nos da una pauta a seguir, pues en un futuro ensayo se puede aumentar la cantidad de filamentos 3C SiC, que es lo que recomienda los artículos de Cerámica<sup>[22-36]</sup>, que como consecuencia obtendremos Módulos de Elasticidad del orden de Gigapascales mejorando

las propiedades mecánicas, que ligadas a otro material puede dar las propiedades deseadas-

### **Recomendaciones:**

1. Se recomienda en un próximo proyecto la construcción de un Horno de Inducción, según las patentes US 2637091, US 6458207 ó US 619705B2 para lograr temperaturas arriba de 2000° centígrados.

2. Utilizar cascarilla de arroz para obtener Silicio lo más puro que se pueda para hacerlos reaccionar con compuestos del grupo de los Halógenos, más electropositivos

3. Producir cerámica de Carburo de Silicio haciendo pasar un flujo de gas de Tetracloruro de Silicio ( $\text{SiCl}_4$ ) o Tetracloruro de Carbono ( $\text{CCl}_4$ ) en atmósfera de Nitrógeno. (Para lograr mayor cantidad de filamentos) <sup>[39-41,45-47,50, 53 y 55]</sup>

4. También, por medio de otra técnica que consiste en hacer crecer cristales por sublimación introduciendo cristales sencillos de SiC para que actúen como semillas en el crecimiento del cristal y reduciendo la presión del reactor para incrementar el paso del transporte de masa, obteniendo cristales de figuras uniformes grandes y de alta calidad, reduciendo en gran cantidad las dislocaciones en la estructura.

## BIBLIOGRAFIA

- 1.- F. L. Matthews and R. D. Rawlings Composite Materials: Engineering and Science Woodhead Publishing Limited (Cambridge England)  
Páginas. (55-59, 207-221)
  
- 2.- Institute of Materials Science Academy of Science of the Ukrainian SSR  
Kiev, USSR. Silicon Carbide Edited by Academician I. N. Frantsevich  
Páginas (1-36).
  
- 3.- R. G. De Anna J Mitchell Finite Element Modeling of 3C-SiC Membranes  
US Army Research Laboratory, NASA.
  
- 4.- F Giorgis A Chiodini. Structural Properties of 3C-SiC Layers Grown on Si  
Substrates by Electron Cyclotron Resonance CVD Technique
  
- 5.- William G. Moffatt, George W. Pearsall y John Wulff Estructura Editorial  
Limusa Wiley, s.a. México 1968 Páginas. (11-81).
  
- 6.- William A. Nash, Ph. D McGraw-Hill. Resistencia de Materiales  
Addison- Wesley Publishing Company, Inc. Páginas (110-154).
  
- 7.- James M. Gere y Stephen-P. Timoshenko Mecánica de Materiales Grupo  
Editorial Iberoamérica McGraw-Hill. Páginas. (81-361).
  
- 8.- George E. Dieter, Jr. Metalurgia Mecánica Editorial Aguilar. Páginas. (18-  
82)



- 9.- Fernando Flores Benítez Probabilidad y Estadística Editado por la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlan. Páginas. (132-139).
- 10.- The Profitable Use of Testing Sieves Catalog 53 THE W.S. TYLER COMPANY
- 11.- Edwin C. Lowenberg. Ph.D. Circuitos Electrónicos Mc Graw Hill Páginas. (122-176).
- 12.- Robert F. Coughlin y Frederick F. Driscoll Amplificadores Operacionales y Circuitos Integrados Lineales Prentice-Hall Hispanoamericana, S.A. Páginas (216-246).
- 13.- Heinrich Gerling Alrededor de las Maquinas Herramientas Editorial Reverte,S.A.
- 14.- Catalogo de Aceros Fortuna S.A.
- 15.- Tomas de Galiana Mingot Diccionario Técnico Larousse Ediciones Larousse (1979)
- 16.- Kurt Gieck Manual de formulas técnicas Editorial Alfaomega P1-P9
- 17.- Par Jean Avril Encyclopedie VISHAY D'ANALYSE DES CONTRAINTES VISHAY MICROMESURES. Páginas. (169-304)
- 18.- Apuntes de extensometría Ingeniería Española de procesos de control SA.
- 19.- Catalog 500 Strain gages listings Micro-Measurements Division Kyowa Products
- 20.- Measuring System. Kyowa Electronic Instruments
- 21.- William H. Cubberly y Robert Stedfeld Guide to Engineered Materials Editorial Staff Páginas. (16, 30, 42, 51, 64, 85)

- 22.- Journal of Materials Research Society: Volumen 7 N° 1, Enero, 1992  
Páginas. (105-116, 136- 169, 235-252)
- 23.- Journal of Materials Research Society: Volumen 8 N° 10, Octubre, 1993  
Páginas. (2569- 2576, 2725-2733)
- 24.- Journal of Materials Research Society: Volumen 8 N° 11, Noviembre,  
1993 Páginas. (2753- 2756)
- 25.-Journal of Materials Research Society: Volumen 9 N° 1, Enero, 1994  
Páginas. (198-215)
- 26.- Journal of Materials Research Society: Volumen 9 N° 7, Julio, 1994  
Páginas. (1767-1779)
- 27.- Journal of Materials Research Society: Volumen 10 N° 6, Enero, 1995  
Páginas. (1349-1351)
- 28.- Journal of Materials Research Society: Volumen 10 N° 3, Marzo, 1995  
Páginas. (596-601, 651-679, 736- 747)
- 29.- Journal of Materials Research Society: Volumen 10 N° 10, Octubre,  
1995 Páginas. (2481-2493)
- 30.- Journal of Materials Research Society: Volumen 11 N° 7, Julio, 1996  
Páginas, (1601-1604, 1645-1652)
- 31.- Journal of Materials Research Society: Volumen 11 N° 9, Septiembre,  
1996 Páginas, (2346-2358)
- 32.- Journal of Materials Research Society: Volumen 12 N° 7, Julio, 1997  
Páginas, (1785-1789)
- 33.- Journal of Materials Research Society: Volumen 13 N° 8, Agosto, 1998  
Páginas, (2251-2261)
- 34.- Journal of Materials Research Society: Volumen 13 N° 9, Septiembre,  
1998 Páginas, (2632-2642)
- 35.-American Institute of Physics Volumen 62 N° 20, 17, Mayo, 1993
- 36.- American Institute of Physics Volumen 69 N° 25, 16, Diciembre, 1996

- 37.- U.S. 3 19,945. ELECTRIC SMELTING FURNACE. Patented Juno 9, 1885.
- 38.- U.S. 2,636,825 REFRACTORY CARBIDE AND NITRIDE PRODUCT AND METHOD OF MAKING Patented December 30, 1948
- 39.- U.S. 2,637,091 BONDED SILICON CARBIDE ARTICLES AND METHOD OF MAKJNG SAME Patented March 26, 1949
- 40.- U.S. 2,908,553 PROCESS FOR THE PRODUCTION OF SILICON CARBIDE Patented January 10, 1956
- 41.- U.S. 2,916,460 SILICON CARBIDE RESISTANCE BODIES AND METHODS OF MAKING SAME Patented December 8, 1959
- 42.- U.S. 3,065,088 OXIDATION RESISTANT GAPHITE ARTICLE AND METHOD Patented November 20, 1962
- 43.- U.S. 3,079,273 THEIMALLY RESISTANT ARTICLES AND METHOD FOR THEIR FABRICATION Patented February 26, 1963
- 44.- U.S. 3,085,863 METHOD OF MAKING SILICON CARBIDE Patented April 16, 1963
- 45.- U.S. 3,808,012 DENSE COMPOSITE CERAMIC BODIES Patented April. 30, 1974
- 46.- U.S. 3,852,099 DENSE SILICON CARBIDE CERAMIC AND METHOD OF MAKING SAME Patented December 3, 1974
- 47.- U.S. 4,004,934 SINTERED DENSE SILICON CARBIDE Patented January. 25, 1977
- 48.- U.S. 4,634,973 POSITION DETECTING APPARATUS Patented January 6, 1987
- 49.- U.S. 4,906,924 LINEAR VARIABLE DISPLACEMENT TRANSDUCERS INCLUDING PHASE SHIFTING SERIES CONNECED COILS Patented March. 6, 1990
- 50.-U.S. 5,192,719 METOHOD OF PRODUCING HIGH-STRENGTH  $\beta$  TYPE SILICON CARBIDE SINTERED BODIES Patented March. 9, 1993

51.- U.S. 5,491,633 POSITION SENSOR FOR ELECTROMECHANICAL SUSPENSION Patented February. 13, 1996

52.- U.S. 6,404,184 B1 SIMPLIFIED LOW BACKLASH LVDT COUPLING Patented June. 11, 2002

53.- U.S- 6,458,207 B1 SILICON CARBIDE SINGLE-CRYSTALS Patented October 1, 2002

54.-U.S. 6,819,705 B2 INDUCTION FURNACE Patented November. 16, 2004

55.-US 6,905,992 B2 CERAMIC BODY REINFORCED WITH COARSE SILICON CARBIDE WHISKERS AND METHOD FOR MAKING THE SAME Patented June. 14, 2005

56.- US 6,909,773 B2 PORTABLE X-RAY DIFFRACTOMETER Patented June. 21, 2005

57.- <http://vshields.jpl.nasa.gov/SiC/CubicHex.html>

58.- <http://www.grc.nasa.gov/WWW/SiC/discoveries.html>

59.- <http://home.cwru.edu/~djy/Photos/JMM-04.pdf>

60.- [http://neon.materials.cmu.edu/rohrer/ceramographic/pipe\\_98.pdf](http://neon.materials.cmu.edu/rohrer/ceramographic/pipe_98.pdf)

61.- <http://www.sixon.com/6hn.html>

62.- <http://www.Moissanite.com>