

**MEDIDA DE LAS DEFORMACIONES POR
TEMPERATURA EN MATERIALES METALICOS
MEDIANTE MÉTODOS INTERFEROMETRICOS**

EDWIN FERNANDO MENDOZA CARREÑO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE FÍSICA
BUCARAMANGA**

2007

**MEDIDA DE LAS DEFORMACIONES POR
TEMPERATURA EN MATERIALES METALICOS
MEDIANTE MÉTODOS INTERFEROMETRICOS**

Trabajo de Grado como requisito para optar al título de Físico

EDWIN FERNANDO MENDOZA CARREÑO

Director

Dr. ARTURO PLATA GOMEZ

Codirector

Ing. WILSON VESGA RIVERA



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE FÍSICA
BUCARAMANGA**

2007

A los gestores de todos mis triunfos:

Al hombre que impulso mis sueños, mi amigo y mi guía desde pequeño, quien sacrifico sus mejores años y oportunidades por toda la familia, mi padre Edwin Fernando Mendoza Beltran. Su amor nunca dejó incentivar todo mi trabajo. A la mujer que estos últimos años estuvo hay para brindarme su cariño en los momentos difíciles, mi abuela Mirian Beltran Afanador. A mi madre Maria Eugenia Carreño ya que ella me brindo la vida y permitió que me volviera el hombre que soy hoy, al dejarme vivir una hermosa vida junto a mi padre

A mi familia y en especial a mi hermano Dennis Augusto que siempre me apoyaron. A la persona que me ha guiado, protegido y a cubierto con sus alas, a mi Tía Maria Praxedes Mendoza, que aunque no este en cuerpo presente su espíritu está a mi lado.

A mis amigos, Ingrid y Willian, que siempre estuvieron a mi lado para brindarme su apoyo y no permitirme retroceder. los quiero mucho y los llevo siempre en mi corazón.

Por ultimo, también quiero dedicar este trabajo a los hijos que tendré mas adelante, son ustedes la luz al final del camino y por ustedes siempre haré mi mejor esfuerzo.

Desde el fondo de mi corazón, muchisimas Gracias.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mis mas sinceros agradecimientos:

Al Doctor Arturo Plata Gomez que con toda su paciencia me dirigió y colaboro en todos los pasos de este trabajo, quien siempre estuvo hay para brindarme un consejo en el momento oportuno ya siendo en la parte laboral o en la parte familiar. Al Ingeniero Wilson Vesga Rivera, por aceptar ser mis orientador en la tesis, por toda su colaboración y su amistad.

A los profesores Dr. Jader Guerrero, Dra Maria del Carmen Lasprilla y al Dr Yezid Torres, por sus oportunos consejos y su disponibilidad en los momentos mas necesarios, por su amistad y continua colaboración.

A mis compañeros de pregrado *Carlos Alberto Chacon* y *Carlos Javier Perucho* por que solo ellos saben todo lo que se sufrio durante el desarrollo de este trabajo, por la amistad tan grande que me han regalado, por toda su ayuda y respaldo durante loa años que estuvimos juntos en el grupo y en las diferentes materias que vimos.

A mis compañeros de grupo, de doctorado Vladimir Jerez, de maestría Juan Jose Barrios, Gabriel Valdiviezo y Cristian Ariza, de pregrado Ricardo Contreras, por su amistad y ayuda incondicional.

Y por ultimo aunque el mas importante, al único que en todos los momentos, fáciles y difíciles, a pesar de mi negligencia y obstinación siempre ha guiado todos mis pasos, a quien me permitió todos estos momentos y el conocer a toda esta gente tan linda que nunca se borrará de mi mente, a quien me prestó la vida y me ayudó a llegar a donde hoy en día estoy, gracias DIOS por todo eso y por todas las demás cosas que jamás podré entender ni explicar.

TÍTULO : CARACTERIZACIÓN DE LAS DEFORMACIONES POR TEMPERATURA EN MATERIALES METÁLICOS MEDIANTE MÉTODOS INTERFEROMÉTRICOS *.

AUTORES : MENDOZA CARREÑO, Edwin Fernando †

PALABRAS CLAVES : Metrología óptica, interferencia, Deformaciones.

DESCRIPCIÓN : Se determinan las deformaciones transversales y longitudinales que sufren los materiales ferrosos como el Ferro-Niquel, no Ferrosos como el acero 316 y aleaciones como el Nitinol, cuando son expuestos a cambios de temperatura en el rango de 20⁰ a 32⁰ centígrados. Las transiciones micro estructurales que sufren los materiales metálicos como el Nitinol y otros elementos al cambiar su estado de austenita martensita son cuantificadas midiendo los cambios en su volumen con alta resolución (del orden de nanos). Observando las fluctuaciones de la temperatura se obtienen las curvas de Deformaciones Vs Temperatura y Rotación Vs Temperatura en materiales metálicos que presentan memoria de forma. Estas variaciones transversales y longitudinales evidencian las transformaciones de fase martensíticas que se dan en los materiales y las variaciones volumétricas de estos, las cuales se cuantifican mediante un sistema óptico (microscopio con un objetivo tipo Mirau) utilizando métodos interferométricos, ya que estos métodos combinados con una fuente de iluminación de baja coherencia nos permiten realizar una reconstrucción no solo de la topografía y textura, sino de las variaciones en las diferentes direcciones de deformaciones que sufren los materiales antes y después de ser expuesto a los cambios de temperatura, este método también nos permitió obtener

*Trabajo de Grado

†Facultad de Ciencias, Escuela de Física, Dr. Arturo Plata Gomez (Director) y Ing. Wilson Vesga Rivera (Codirector)

imágenes artificiales del material que permiten caracterizarlos mas objetivamente para poder cuantificar el estado de las superficies.

TITLE : MEASUREMENT OF THE DEFORMATIONS BY TEMPERATURE IN METALLIC MATERIALS BY MEANS OF INTERFEROMETRIC METHODS *.

AUTHORS : MENDOZA CARREÑO, Edwin Fernando[†].

KEY WORDS : Optical Metrology, Interferometry, Deformations.

DESCRIPTION : The cross-sectional deformations are determined and longitudinal that undergoes the ferrous materials like Nickel-ferrous, nonFerrous like the steel 316 and alloys like Nitinol, when they are exposed to changes of temperature in the rank of 20⁰ to 32⁰ centigrade. The structural transitions micro that they undergo the metallic materials like the Nitinol and others elements when changing their martensita austenite state are quantified measuring the changes in its volume with hi resolution (the order of nanos). Observing the fluctuations of the temperature are obtained the curves of Deformations versus Temperature and Rotation versus temperature in metallic materials that present form memory. These cross-sectional and longitudinal variations demonstrate martésíticas transformations of phase that occur in the materials and the volumetric variations of these, which are quantified by means of an optical system (microscope with an objective Mirau type) using interferometric methods, since these methods combined with a source of illumination of low coherence us they allow to make a reconstruction not only of the topography and texture, but of the variations in the different directions from deformations that undergo the materials before and after being exposed to the changes of temperature, this method also us it allowed to obtain artificial images of the material that allow to characterize them but objectively to be able to quantify the state of the surfaces.

*Senior Project Tesis

[†]Facultad de Ciencias, Escuela de Física, Arturo Plata G y Ing Wilson Vesga R. (Directors)

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	1
1. INTERFEROMETRÍA	4
1.1. Introducción	4
1.2. Consideraciones Generales	5
1.2.1. Coherencia Espacial y Temporal	6
1.3. Interferencia de dos ondas	7
2. METROLOGÍA ÓPTICA	12
2.1. Introducción	12
2.2. Metrología en luz Monocromatica	13
2.3. Metrología en luz Blanca	14
2.4. Metrología Interferencial	16

2.4.1. Metrología Interferencial por fase	17
2.4.2. Metrología Interferencial por Amplitud	20
2.4.3. Metrología Interferencial por Polarización	20
2.5. Metrología en Microscópica Interferencial	23
2.5.1. Interfererometro de Mirua	24
2.5.2. Aplicaciones	24
3. TRANSFORMACIONES DE FASE EN MATERIALES METÁLICOS	27
3.1. Introducción	27
3.2. Transformaciones de Fase Martensíticas	28
3.2.1. Perspectiva Microscópica	29
3.2.2. Perspectiva Macroscópica	32
4. DEFORMACIONES EN MATERIALES	35
4.1. Deformación unitaria	37
4.1.1. Deformación unitaria normal	38
4.1.2. Deformación unitaria cortante	39

4.2. Desplazamientos	41
4.3. Matrices de Giro y Deformación	42
5. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL	47
6. RESULTADOS EXPERIMENTALES	52
6.1. Detección de Máximos	53
6.2. Reconstrucción 3D	54
6.3. Correlación	54
6.4. Extracción de las deformaciones y rotaciones	56
CONCLUSIONES	63
REFERENCIAS	66

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1. Patrones de interferencia logrados mediante la simulación de interferencia de dos ondas en MATLAB	11
2.1. Intensidad Vs Variación del piezo-eléctrico	15
2.2. A la derecha se muestra el esquema de un microscopio de TIC y a la izquierda tenemos las franjas de interferencia producidas por un TIC(total interference contars), imagen tomada del catalogo Zeizz	22
2.3. objetivo de microscopio interferometrico tipo Mirau	25
3.1. transformacion autenita a martensita [4]	31
3.2. Procesos de acomodamiento por deslizamiento y por maclado [4]	31
3.3. Representación de los cambios de las propiedades Vs temperatura en una transformación martensítica [4]	33
4.1. deformación	36

4.2. Deformación unitaria	39
4.3. Deformación unitaria cortante	40
4.4. Desplazamientos	42
4.5. Desplazamientos entorno del punto P	43
4.6. Interpretación Geométrica de la matriz de giro	45
5.1. Microscopio Nikon Eclipse ME600	48
5.2. Soporte para las diferentes muestras	49
5.3. Controlador de temperatura	50
5.4. Esquema del montaje experimental	51
6.1. (a)imagen de máximos, (b)imagen de rango	53
6.2. Reconstrucción 3D	55
6.3. Puntos para correlacionar	56
6.4. Pico de correlación	57
6.5. Gráfica de Deformación Vs Temperatura de la muestra de Nitinol N . .	58
6.6. Gráfica de Deformación Vs Temperatura de la muestra de Nitinol M . .	60
6.7. Gráfica de Deformación Vs Temperatura de la muestra de Acero 316 . .	61

6.8. Gráfica de Deformación Vs Temperatura de la muestra de Fe-Ni	62
6.9. Gráfica de Rotaciones Vs Temperatura de las diferentes muestras	62

ÍNDICE DE TABLAS

3.1. Composición química y algunas propiedades de las SMA [4]	34
6.1. Deformaciones del material Nitinol N	58
6.2. Deformaciones del material Nitinol M	59
6.3. Deformaciones del material Acero 316	60
6.4. Deformaciones del material Fe-Ni	61

INTRODUCCIÓN

Una de las ramas de la Física es la óptica, de la cual se desprende la Metrología óptica; ésta se encarga de realizar mediciones utilizando las propiedades que tiene la luz, como la polarización, la fase y la frecuencia; igualmente se pueden hacer seguimientos de fenómenos de interferencia y difracción. Observando los patrones de interferencia se puede decodificar la información portada por la fase y la amplitud de las ondas que se están estudiando; también con los patrones de interferencia podemos determinar parámetros topográficos, los cambios del índice de refracción y la longitud de onda de la fuente de iluminación entre otras aplicaciones. Estas mediciones se hicieron extensas a la microscópica para la determinación de la topografía, la reflexividad y la textura de los materiales con precisión de nanos. El método interferométrico permite observar centésimas de π en la variación de la fase, debido a la modulación de intensidad del patrón de interferencia; si se utiliza un laser de He-Ne, éste posee una longitud de onda de alrededor de los $630nm$, por lo tanto, se hicieron mediciones de variación de camino óptico del orden de los nanómetros.

Cuando se trabajan los diferentes materiales que existen y teniendo en cuenta las diferentes características que estos poseen, se puede decir que los materiales metálicos, por poseer una alta reflectividad pueden ser analizados bajo el microscopio interferométrico con objetivo tipo Mirau que posee el GOTS (Grupo de óptica y tratamiento de señales),

ya que en éste tipo de objetivos uno de los rayos que producen la interferencia debe pasar por la muestra.

Hay ciertas características de los materiales que ya han sido estudiadas tales como la reflectividad, la textura y la topografía [16, 15], se plantea la utilización de éstos métodos para la determinación de las deformaciones volumétricas y longitudinales que sufren los materiales metálicos al ser expuestos a cambios de temperatura.

Entre los materiales metálicos podemos encontrar aleaciones con propiedades tan excepcionales como son los materiales con memoria de forma; esta aleación consiste en que si se le aplica un esfuerzo inicial al material y se deja en contacto con un cuerpo mas frío, éste vuelve a su estado inicial de forma. Estos materiales se caracterizan porque en las aleaciones sufren un cambio en su estructura cristalina convirtiéndose en una estructura BCC (cubica centrada en el cuerpo) pasando a ser una estructura FCC (cubica centrada en las caras). Este cambio en su estructura, produce un deslizamiento de las láminas de aleación, que puede producir un cambio en la forma.

Los cambios en el volumen de las transformaciones de fase de los materiales con memoria de forma no han sido cuantificadas por métodos ópticos, por lo tanto se requiere un método óptico de alta precisión para poder determinar si las transformaciones de fase producen un cambio en su volumen expandiéndose por los efectos térmicos al ser expuestos a la temperatura. Estos materiales son de gran importancia en la medicina ya que se caracterizan por su biocompatibilidad con los cambios de temperatura que se producen en el cuerpo humano, ya sean ocasionados por factores externos o internos. Pensando aplicar el estudio de estas transformaciones en el cuerpo humano, se buscó un rango de $35^{\circ}C$ y $40^{\circ}C$, por lo que se propene realizar un estudio más amplio desde los $20^{\circ}C$ a los $60^{\circ}C$; así se podrán ver no sólo los efectos de las transformaciones fase en el

volumen, sino también los efectos de la temperatura.

Este documento consta de seis partes entre las cuales se encuentra un capítulo en el cual se trabaja la interferometría y sus generalidades, como son la coherencia espacial y temporal, y la interferencia de dos ondas tanto en luz monocromática como en luz blanca. En el segundo capítulo se trata el tema de la metrología óptica, sus divisiones, aplicaciones y alcances. En éste capítulo se trata el tema de la metrología con microscopía interferencial, dando un mayor enfoque en los microscopios que utilizan objetivos tipo Mirau. En el tercer capítulo se hace una breve descripción de los aspectos que influyen en las transformaciones de fase entre sólidos. El cuarto capítulo trata de las deformaciones y la forma de obtenerlas mediante los desplazamientos de un material al ser expuestos a una fuerza externa. Los siguientes dos capítulos son El Dispositivo Experimental y Los Resultados Experimentales; en estos se describe el montaje que se utilizó para la realización de éste trabajo; también se muestran los pasos y los resultados experimentales que se llevaron a cabo para esta investigación. Por último, tenemos las recomendaciones y las conclusiones.

Este trabajo se realizó en el marco de colaboración del CENM(Centro de Excelencia en Nuevos Materiales) y el laboratorio de Biomateriales de la Universidad Industrial de Santander.

INTERFEROMETRÍA

1.1 INTRODUCCIÓN

Los patrones de color que resplandecen sobre una mancha de aceite en el pavimento asfáltico mojado son el resultado de una de las manifestaciones más comunes del fenómeno de interferencia. En una escala macroscópica podríamos considerar el problema relacionado de la interacción de las ondulaciones de la superficie en una tina de agua. Nuestra observaciones nos permitirán visualizar una distribución compleja de perturbaciones. Puede haber regiones en donde dos o más ondas se superponen anulándose entre sí, o incluso complementándose, en estas regiones podrían incluso los valles y las crestas, del patrón hacerse más pronunciados que si tuviéramos una de las ondas solamente[2].

La teoría ondulatoria de la naturaleza electromagnética de la luz nos da una base para analizar estos fenómenos de interferencia. Si recordamos el principio de superposición podremos hacer la suma vectorial de las perturbaciones de los campos eléctricos. Por lo que decimos que la interferencia óptica es una interacción de dos o más ondas de luz que

producen una intensidad resultante, la cual se desvía de la suma de las componentes de las intensidades.

En este capítulo analizaremos la interferencia de dos ondas, en luz monocromática y en luz blanca, también se escogerán los sistemas ópticos interferométricos de mayor importancia: por división del frente de onda y por división de amplitud. En el primer caso se usan porciones del frente de onda original, como fuentes secundarias o como un conjunto para la creación del nuevo frente de onda. En el último caso la onda original es dividida en dos segmentos que viajan por diferentes caminos antes de recombinarse.

1.2 CONSIDERACIONES GENERALES

La luz es un fenómeno vectorial, puesto que los campos magnéticos y eléctricos son campos vectoriales. De acuerdo al principio de superposición. la interacción del campo eléctrico \vec{E} , en un punto del espacio, que proviene de los campos separados $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \vec{E}_3, \dots$, de varias fuentes que contribuyen, esta dada por:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots \quad (1.1)$$

debemos hacer notar que el campo eléctrico \vec{E} , varía sumamente rápido en el tiempo aproximadamente $4,3 * 10^{14} Hz$ a $7,5 * 10^{14} Hz$ [1], hace que el campo real sea una cantidad prácticamente indetectable. por otro lado la cantidad que nosotros podemos detectar con los diferentes instrumentos que existen en la actualidad es la Intensidad, por lo que abordaremos el tema de la interferencia por medio de esta.

1.2.1. COHERENCIA ESPACIAL Y TEMPORAL

Para observar una distribución de franjas, las dos fases de las ondas que interfieren no tienen por que estar en fase una con la otra. Una figura de interferencia ligeramente desplazada es obtenida si entre las dos fuentes existe un desfase inicial, siempre y cuando permanezca constante. Dichas fuentes se denominan *coherentes*. A menudo es conveniente dividir los efectos de coherencia en dos clasificaciones, temporal y espacial. La primera se relaciona directamente con el ancho de banda finito de la fuente, y la última con la extensión finita en el espacio.

Para estar seguros, si la luz fuera monocromática, $\Delta\nu$ (inverso del ancho de frecuencia) sería cero y Δt sería infinito, pero esto es una idealización. Sin embargo, sobre un intervalo mucho más corto que δt , una onda real se comporta esencialmente como si fuera monocromática. En efecto, el tiempo de coherencia es *el intervalo temporal sobre el cual podemos predecir razonablemente la fase de la onda luminosa en un punto dado del espacio*. Esto es lo que se quiere significar por *coherencia temporal*, es decir si Δt es grande la onda tiene un alto grado de coherencia temporal y viceversa. Esta característica puede considerarse en forma diferente. Imaginemos que tenemos dos puntos separados P_1 y P_2 , ambos trazados desde una fuente puntual cuasimonocromática. Si la longitud de coherencia, $c\Delta t$, es mucho más grande que la distancia (r_{12}) entre P_1 y P_2 , entonces un solo tren de onda puede extenderse sobre toda la separación. La perturbación en P_1 estaría altamente correlacionada con las perturbaciones ocurridas en P_2 . Por otra parte, si esta separación longitudinal fuera mucho más grande que la longitud de coherencia, muchos trenes de onda, cada uno con fases no relacionadas, cubrirían la brecha r_{12} . En este caso, las perturbaciones en los dos puntos del espacio serán independientes para cualquier tiempo dado. El grado para el cual la correlación existe algunas veces se conoce, alternativamente, como la cantidad de *coherencia longitudinal*. Ya sea

en que pensemos en términos del tiempo de coherencia (Δt) o longitud de coherencia ($c\Delta t$), el efecto surge del ancho de banda finito de la fuente.

La idea de *coherencia espacial* se usa con más frecuencia para describir los efectos que surgen por la extensión finita de fuentes de luz ordinaria. Supongamos entonces que tenemos una fuente monocromática extendida. Dos puntos radiadores sobre ella, separados por una distancia lateral la cual es grande comparada con λ , se pueden comportar de modo independiente. Es decir, faltara la correlación que puede existir entre las fases de las dos perturbaciones emitidas. Las fuentes extendidas de este tipo se conocen como incoherentes.

1.3 INTERFERENCIA DE DOS ONDAS

Una gran parte del análisis de la interferencia se efectuará sin especificar la forma particular de los frentes de onda y por consiguiente los resultados son muy generales. Sin embargo, podemos simplificar el análisis considerando dos fuentes puntuales P_1 y P_2 emitiendo ondas monocromáticas de la misma frecuencia en un medio homogéneo. Además, separadas una distancia d que es mucho mas grande que λ . Coloquemos un punto de observación P lo suficientemente lejos como para que el frente de onda sea considerado plano. Consideraremos solamente ondas polarizadas linealmente de la forma:

$$\vec{E}_1(\vec{r}, t) = \vec{E}_{01} \cos(\vec{k}_1 \cdot \vec{r} - \omega t + \varepsilon_1) \quad (1.2a)$$

$$\vec{E}_2(\vec{r}, t) = \vec{E}_{02} \cos(\vec{k}_2 \cdot \vec{r} - \omega t + \varepsilon_2) \quad (1.2b)$$

En donde \vec{E}_{02} y \vec{E}_{01} brindan la información de la amplitud y la polarización de la onda,

\vec{k}_2 y \vec{k}_1 son los vectores de onda, ε_2 y ε_1 serán la fase inicial. Por definición tenemos que:

$$I = \epsilon v \langle \vec{E}^2 \rangle$$

En donde v es la velocidad de propagación del campo y ϵ es la constante dieléctrica del medio. Puesto que sólo nos concierne la intensidad relativa dentro del mismo medio, despreciaremos las constantes y pondremos:

$$I \approx \langle \vec{E}^2 \rangle$$

donde $\langle \vec{E}^2 \rangle$ es el promedio en el tiempo de la magnitud de la intensidad del campo eléctrico al cuadrado. por consiguiente $\vec{E}^2 = \vec{E} \cdot \vec{E}$ en donde

$$\vec{E}^2 = (\vec{E}_1 + \vec{E}_2) \cdot (\vec{E}_1 + \vec{E}_2)$$

si tomamos el promedio de las intensidades tenemos:

$$I = I_1 + I_2 + I_{12} \quad (1.3)$$

donde $I_1 = \langle \vec{E}_1^2 \rangle$, $I_2 = \langle \vec{E}_2^2 \rangle$ y $I_{12} = 2\langle \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \rangle$, donde esta última expresión se conoce como *término de interferencia*. Para el caso que estamos trabajando tenemos que:

$$\vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 = \vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02} \cos(\vec{k}_1 \cdot \vec{r} - wt + \varepsilon_1) \cdot \cos(\vec{k}_2 \cdot \vec{r} - wt + \varepsilon_2) \quad (1.4)$$

Recordemos que el promedio temporal de alguna función $f(\tau)$, tomado sobre un intervalo T , es

$$\langle f(\tau) \rangle = \frac{1}{T} \int_{\tau}^{\tau+T} f(\tau') d\tau' \quad (1.5)$$

El periodo τ de las funciones armónicas es de $2\pi/\omega$ y para nuestro caso $T \gg \tau$. En ese caso el coeficiente $1/T$ en frente de la integral tiene un efecto dominante. Después de multiplicar y sacar el promedio, la ecuación 1.4 queda

$$\langle \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \rangle = \frac{1}{2} \vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02} \cos(\vec{k}_1 \cdot \vec{r} + \varepsilon_1 - \vec{k}_2 \cdot \vec{r} - \varepsilon_2) \quad (1.6)$$

donde $\langle \cos^2(wt) \rangle = 1/2$, $\langle \sin^2(wt) \rangle = 1/2$, $\langle \cos(wt) \sin(wt) \rangle = 0$. El el termino de interferencia es

$$I_{12} = \vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02} \cos \delta \quad (1.7)$$

y δ , igual a $(\vec{k}_1 \cdot \vec{r} - \vec{k}_2 \cdot \vec{r} + \varepsilon_1 - \varepsilon_2)$, es la *diferencia de fase* que proviene de combinar una diferencia de longitud de trayectoria y una diferencia de fase inicial. Normalmente los \vec{E}_{01} es paralelo a \vec{E}_{02} por lo que la irradiancia se reduce a

$$I_{12} = E_{01} E_{02} \cos \delta$$

y la irradiancia total queda

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta \quad (1.8)$$

En varios puntos del espacio, la irradiancia resultante depende del valor de I_{12} , la cual puede tomar un valor máximo cuando $\cos \delta = 1$, de modo que

$$I_{max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \quad (1.9)$$

cuando

$$\delta = 0, \pm 2\pi, \pm 4\pi, \dots$$

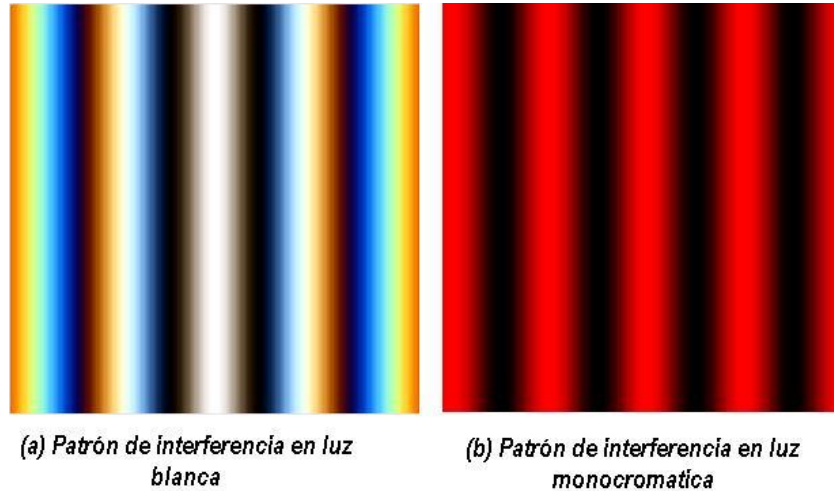
Este caso se conoce como ***interferencia constructiva total***, el desfase entre las dos ondas es un múltiplo entero de 2π . Cuando $0 < \cos \delta < 1$ las ondas están fuera de fase, $I_1 + I_2 < I < I_{max}$ y el resultado se denomina *interferencia constructiva*. Con $\delta = \pi/2$, el $\cos \delta = 0$ entonces las perturbaciones están defasadas 90° e $I = I_1 + I_2$. Para $0 > \cos \delta > -1$ disponemos de las condiciones de *interferencia destructiva*, $I_1 + I_2 > I > I_{min}$. Una irradiancia mínima se produce al estar las ondas defasadas 180° , los valles se superponen a las crestas, $\cos \delta = -1$ y

$$I_{min} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2} \quad (1.10)$$

esto se produce cuando $\delta = \pm\pi, \pm 3\pi, \pm 5\pi, \dots$ y se denomina ***interferencia destructiva total*** [ver figura 1.1(b)].

Con una fuente de luz blanca, el sistema de franjas es producido por cada longitud de onda; las intensidades de este sistema de franjas son sumadas en cualquier punto en el plano de observación. Entonces, la diferencia de camino óptico al centro de el plano de observación en un interferómetro es cero para todas las longitudes de onda, todos

Figura 1.1: Patrones de interferencia logrados mediante la simulación de interferencia de dos ondas en MATLAB



los sistemas de franjas formados tienen un máximo en este punto, resultando en una franja central blanca (figura 1.1.a). Sin embargo, porque el espaciamiento de las franjas varía con la longitud de onda, ellas rápidamente salen del centro del patrón, resultando en una secuencia de colores de interferencia. Estos colores se vuelven menos y menos saturados con el incremento de la diferencia de camino óptico.

Para la interferencia de una lamina delgada de aire encerrada entre dos superficies de vidrio, nosotros debemos introducir una fase adicional de π producida por reflexiones en una de las superficies. Como un resultado la lamina aparece negra cuando el espesor de la lamina es muy pequeño comparado con la longitud de onda. cuando el espesor de la lamina aumenta, una secuencia de colores de interferencia es observada. Cálculos detallados de los cambios de color en este caso fueron hechos por Kubota[9, 10]. Estos cálculos también pueden ser usados en interferómetros de división de amplitud; sin embargo, en este caso, se debe introducir una diferencia de fase introducida por la reflexión de los dos rayos en el Beam-splitter.

METROLOGÍA ÓPTICA

2.1 INTRODUCCIÓN

La metrología óptica es la rama de la óptica que tiene como propósito efectuar medidas de muy alta precisión usando las ondas de la luz como escala. Esto se hace por medio de instrumentos llamados interferómetros, basados en el fenómeno de la interferencia, que se describió en el capítulo anterior. Ya que dicha aplicación está fundamentada en la naturaleza ondulatoria de la luz, se comenzarán por describir los diferentes tipos de metrología de acuerdo con el tipo de iluminación. Posteriormente se hará énfasis en una de las técnicas de mayor importancia para este trabajo como lo es la microscópica interferencial.

La interferometría es ahora una herramienta indispensable en muchas actividades en las que sea necesario realizar mediciones. A partir de 1947 se han extendido estas técnicas a las ondas de radio, iniciándose así la radiointerferometría astronómica. Hoy en día, por medio de técnicas interferométricas se pueden realizar una gran variedad de medidas sumamente precisas.

2.2 METROLOGÍA EN LUZ MONOCROMÁTICA

En la primera sección se trato el fenómeno de la interferencia con una fuente de luz monocromática y se obtuvieron las ecuaciones que nos caracterizan este fenómeno. Pero ahora nos vamos a concentrar en las diferentes técnicas que existen para realizar medidas.

En la actualidad existen variadas técnicas que utilizan la luz monocromática para la determinación de las alturas de los diferentes objetos; entre las mas conocidas tenemos la triangulación laser, la cual consiste en proyectar una linea laser (o un punto) sobre el objeto y así medir cuanto esta varia en una dirección para así poder realizar la reconstrucción 3-D del objeto; las alturas por este método están codificadas en el desplazamiento lateral que sufre la linea laser. la otra técnica mas utilizada es la de proyección de franjas la cual utiliza un patron de franjas (modelado por una función senoidal) que se corre en diferentes tiempos y en los cuales esta incluido la información de la altura del objeto, en esta técnica lo que nos interesa es la extracción de la fase de estos patrones de franjas ya que hay esta codificada la altura de los objetos de estudio.

Estas técnicas han sido utilizadas por el GOTS para realizar medidas de los surcos que dejan los cañones de las armas cuando son disparados, para reconstrucción 3D para la detección de ampollas en recubrimientos[14], para la reconstrucción 3D de objetos discontinuos[12] entre otros trabajos que se encuentran realizados.

2.3 METROLOGÍA EN LUZ BLANCA

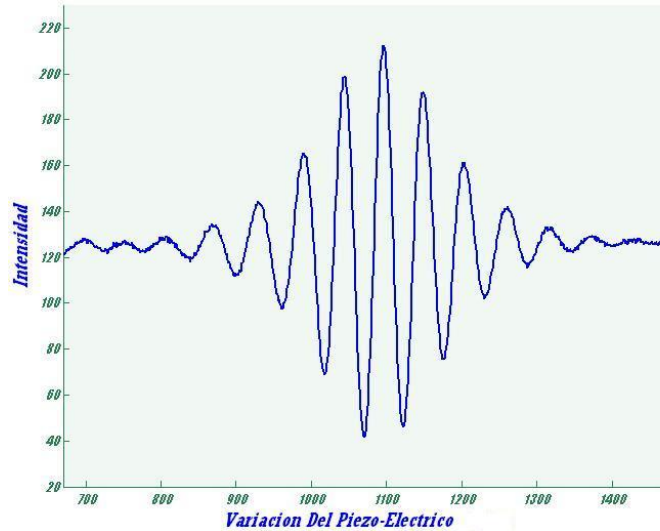
El problema de las ambigüedades desfase 2π presentado por la periodicidad y la larga longitud de coherencia del patrón de interferencia en luz monocromática, puede ser dominado usando luz blanca y examinando el objeto a fondo. Se asume que el origen de coordenadas es tomado en un punto en el eje Z en los cuales los dos caminos ópticos son iguales, y esta superficie estudiada es movida a lo largo del eje Z (haciendo referencia a un movimiento vertical) en series de pasos de tamaño ΔZ . La intensidad en cualquier punto en el plano imagen, correspondiente a un punto en el objeto cuya altura es h , puede entonces ser escrita como:

$$I(Z) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} g(p) \cos \left[\left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) p + \varphi_0 \right] \quad (2.1)$$

Donde I_1 y I_2 son las intensidades de los dos rayos que actúan independientemente, $g(p)$ es la franja visible, o función de coherencia (la cual corresponde a la envolvente de las franjas de interferencia), y el $\cos[(2\pi/2)p + \varphi_0]$ es una modulación cosenoidal. En la ecuación 2.1, λ corresponde al significado de la longitud de onda de la fuente; $p = 2(z - h)$ es la diferencia en las longitudes de los caminos ópticos atravesados por los dos rayos, y φ_0 es la diferencia de fase que cambia en reflexión al divisor de rayos y los espejos.

La figura 2.1, muestra las variaciones de intensidad en un punto dado de la imagen a lo largo de la altura del eje z . Cada uno de estos patrones de interferencia puede ser procesado para obtener la envolvente de las variaciones de intensidad (la función de franjas visibles) y determinar el pico de amplitud de la variación de intensidad también como la localización de este pico a lo largo del eje examinado. Los valores de la amplitud del pico corresponden a una imagen del objeto puesto a prueba. Mientras los valores

Figura 2.1: Intensidad Vs Variación del piezo-eléctrico



de la localización de este pico a lo largo del eje medido rinden la altura de la superficie en los correspondientes puntos.

El método más ampliamente usado en recuperación de la función visible de franjas de los datos muestreados tiene que ser por filtrado digital en el dominio frecuencial. Este proceso implica dos transformadas de Fourier (frontal e inverso) a lo largo de la dirección z por cada píxel en la muestra. Esto es necesario, además, para el tamaño del paso en la dirección z corresponde a un cambio en la diferencia de camino óptico de menor que un cuarto de la corta longitud de onda; típicamente, el paso Δz está alrededor de los 50 nm.

Consecuentemente, este procedimiento requiere una gran cantidad de memoria y tiempo de procesamiento, sin embargo estos requerimientos pueden ser reducidos de algo tan extenso, y se obtiene una buena precisión, por modificación del muestreo y técnicas de procesamiento. [2]

2.4 METROLOGÍA INTERFERENCIAL

La interferometría es actualmente un procedimiento estándar que permite, basados en la localización de las franjas, determinar la diferencia de camino óptico de dos haces. Sí se conoce el camino de uno de ellos, se puede determinar el camino del segundo. Observando la diferencia de camino para todos los puntos de la fuente se logra obtener la información topográfica de un objeto, la cual es optimizada realizando algoritmos de tratamiento digital de imágenes.

Entre las técnicas diseñadas para decodificar la información de la fase del interferograma; se encuentra el método de *Phase Shifting*, cuyo concepto básico es determinar la fase del interferograma, adquiriendo varias imágenes del mismo al cambiar la fase en cierta cantidad conocida; estos cambios pueden ser introducidos tanto en el rayo objeto como el de referencia. Hay varios algoritmos usados para extraer la información de la fase, estos dependen del número de imágenes tomadas durante el cambio de fase; pero este método presenta problemas para discontinuidades discretas que sobrepasen una variación de fase de 2π .

Otra técnica fue desarrollada por P. De Groot and L. Deck [2] al realizar un análisis en el dominio de frecuencia. Una tercera técnica de decodificación se realiza por medio de detección de máximos, de una manera análoga al confocal, y consiste fundamentalmente en localizar la posición de máxima intensidad para todos los puntos de la muestra, desplazando en dirección z uno de los brazos del interferómetro. También citado como *Scanning Coherence* por Byron S. Lee and Timothy C. Strand, Diferentes algoritmos han sido desarrollados para obtener la información topográfica de muestra y poder eliminar las desventajas que presentan cada uno de ellos.

2.4.1. METROLOGÍA INTERFERENCIAL POR FASE

El incremento del uso de técnicas electrónicas para la medición de la fase en los diferentes patrones interferométricos con una muy alta precisión a revolucionado la Interferometría. La técnica de corrimiento de fase permite medidas simultaneas en varios puntos usando una CCD(charge-coupled-detector).

En uno de los métodos[5], la diferencia de camino óptico es cambiada en pasos iguales por medio de un espejo montado en un piezo eléctrico, y los correspondientes valores de intensidad de cada punto del patron de interferencia son grabados. Si las amplitudes complejas de los frentes de ondas de referencia y sensado son escritos como

$$a(x, y) = a_0 \exp(-ikp) \quad (2.2a)$$

y

$$b(x, y) = b_0 \exp(-ikW(x, y)) \quad (2.2b)$$

donde $W(x, y)$ representa el perfil del frente de onda que se observa, la intensidad en el patron de interferencia es

$$I(x, y, p) = a_0^2 + b_0^2 + 2a_0b_0 \cos(k[W(x, y) - p]) \quad (2.3)$$

otra forma de escribir la ecuación 2.3 es

$$I(x, y, p) = f + g_1 \cos(kp) + h_1 \sin(kp) \quad (2.4)$$

donde los coeficientes f , g_1 y h_1 son funciones de x y y . Esto es una serie de Fourier

la que consiste del termino dc y el primer armónico. Acordemente, los coeficientes en cada punto pueden ser encontrados midiendo la intensidad $I(x, y, p)$ para valores de p dados por

$$p = p_j = j\lambda/2m$$

donde $j = 1, 2, \dots, mq$, y m y q son enteros. Entonces nosotros tenemos

$$g_1 = \left(\frac{2}{mq}\right) \sum_{j=1}^{mq} I(x, y, p_j) \cos(kp_j) = 2a_0b_0 \cos[kw(x, y)] \quad (2.5)$$

y

$$h_1 = \left(\frac{2}{mq}\right) \sum_{j=1}^{mq} I(x, y, p_j) \sin(kp_j) = 2a_0b_0 \sin[kw(x, y)] \quad (2.6)$$

así que

$$W(x, y) = \left(\frac{1}{k}\right) \arctan\left(\frac{h_1}{g_1}\right) \quad (2.7)$$

Mientras que es mucho el tiempo requerido para hacer mas de 100 ($m = 25, q = 4$) lecturas, en implementaciones típicas la técnica usada es la de tomar una modulación de ocho pasos ($m = 8, q = 1$) de la diferencia de camino óptico. Sin embargo el algoritmo más usado para calcular la diferencia de fase, es el que utiliza cuatro imágenes de los datos grabados con los corrimientos de fase de $0, \pi/2, \pi$, y $3\pi/2$. En este caso

$$\tan \phi = \frac{I(3\pi/2) - I(\pi/2)}{I(0) - I(\pi)} \quad (2.8)$$

En otro método[6, 7, 8], la diferencia de camino óptico entre los frentes de ondas que interfieren esta hecho por variaciones lineales con el tiempo. La intensidad en cualquier

punto $P(x, y)$ en el patron de interferencia puede ser escrito como una función del tiempo

$$I(x, y, t) = I_0(x, y) \left\{ 1 + \nu \sin \left[\frac{2\pi t}{T} + \phi(x, y) \right] \right\} \quad (2.9)$$

donde $I_0(x, y)$ es la intensidad promedio en el punto P , ν es la visibilidad de la franjas, T es el periodo de la modulación resultante, la diferencia de fase entre los dos frentes de onda que interfieren en P , cuando $t = 0$, es $\phi(x, y) - \pi/2$. Para determinar $\phi(x, y)$, integrando la salida de cada uno de los elementos leídos hacia afuera y hacia adentro, para cuatro valores de intervalo convirtiéndose cada uno es su respectivo periodo, y si estos limites son tomados como A, B, C y D respectivamente, la fase puede ser hallada con

$$\tan \phi(x, y) = \frac{(A - C)}{(B - D)} \quad (2.10)$$

Este sistema requiere que las variaciones de camino óptico con respecto del tiempo sean estrictamente lineales, aunque el efecto de no linealidad puede ser reducido mediante el incremento de los periodos de integración por ciclo a ocho.[2]

Entonces las mediciones pueden ser tomadas rápidamente, y los datos almacenados, los efectos de corrientes de aire e inestabilidad mecánica pueden ser reducidos mediante el promedio del numero de observaciones realizadas. Similarmente, es posible eliminar errores del sistema mediante la calibración previa del interferometro y la toma de unos datos previos del sistema.

2.4.2. METROLOGÍA INTERFERENCIAL EN LUZ POLICROMÁTICA

En esta técnica se aprovecha la propiedad de un interferograma producido por una fuente policromática, según la ecuación 2.11 (la cual es una variante de la ecuación 1.8) las franjas se encuentran moduladas por una envolvente presentando un máximo de intensidad cuando la diferencia de camino óptico es cero. De una manera análoga al confocal, el problema radica en localizar la posición de máxima intensidad del interferograma para todos los puntos de la muestra, desplazando en dirección Z uno de los brazos del interferómetro. En este método se busca que el desplazamiento Z realizado por un mecanismo Piezoeléctrico sea tal que la franja brillante del interferograma recorra todos los puntos de la muestra, almacenando estas posiciones se obtiene la topografía de la muestra.

$$I(P') = I_1'(P') + I_2'(P') + g(\tau) \cos(2\pi\tau/\lambda_0) \quad (2.11)$$

Para esta técnica se utiliza el movimiento del Piezo, para que todos los puntos de la muestra pasen por el contacto óptico, debe de ser del orden del rango de alturas de la muestra, introduciendo la no-linealidad del Piezo, y además del ruido sistemático.

2.4.3. METROLOGÍA INTERFERENCIAL POR POLARIZACIÓN

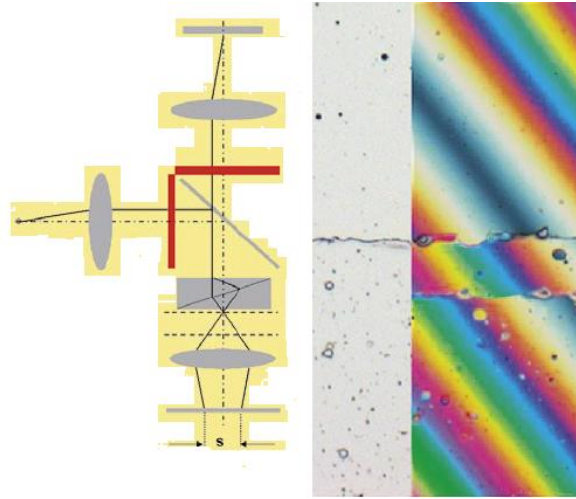
En todas las combinaciones de interferencia un haz de luz es dividido por un instrumento en dos o más rayos los cuales son superpuestos para causar la interferencia. El

fenómeno puede ser clasificado de acuerdo al método empleado para la división del haz incidente. En un interferómetro de Michelson, por ejemplo, cada rayo incidente es parcialmente reflejado y parcialmente transmitido por un Beam-splitter, y este proceso es conocido como división de amplitud. En un interferómetro de Rayleigh las dos rejillas angostas cuyos rayos son emitidos por la fuente en diferentes direcciones, ellos son parte del frente de onda. El fenómeno de interferencia observado con un cristal birefringente pertenece a la primera categoría. Un rayo incidente es dividido dentro del cristal en dos rayos, uno rayo ordinario y un rayo extraordinario. Estos rayos adquieren una cierta diferencia de camino cuando atraviesan el cristal y pueden interferir en una región del espacio donde ellos se superponen.

Los rayos ordinario y extraordinario producidos por el cristal birefringente vibran en direcciones que son ortogonales. Para que ellos puedan interferir, las direcciones de vibración deben ser paralelas entre sí. Esto es realizado por medio de un polarizador, la dirección de transmisión que es establecida a 45° de las dos vibraciones ortogonales. La orientación de 45° es escogida en orden que la interferencia de los dos rayos se da por que son de igual amplitud. Estos polarizadores sin embargo no son suficientes para la interferencia en un lugar en el espacio. Se tiene que un rayo de luz natural es equivalente a dos componentes mutuamente incoherentes de igual amplitud de vibración en direcciones perpendiculares. Para que los rayos O y E producidos por el cristal sean coherentes entre sí, se coloca un polarizador entre el rayo incidente y el cristal para que solo una componente de la luz sea transmitida después del cristal. La dirección de transmisión de este polarizador es de 45° de la dirección privilegiada del cristal.

En el caso de una lamina plana de caras paralelas, el rayo incidente es dividido en dos rayos los cuales emergen de la lamina en direcciones paralelas. Estos rayos interferirán en el infinito o en el plano focal de una lente convergente, entonces para observar el patrón de interferencia es necesario que los rayos que son incidentes sean de todas las

Figura 2.2: A la derecha se muestra el esquema de un microscopio de TIC y a la izquierda tenemos las franjas de interferencia producidas por un TIC (total interference contrast), imagen tomada del catalogo Zeiss



posibles inclinaciones. Tal situación es obtenida por diferentes modos como lo son la envolvente de una fuente extendida o por imágenes de una fuente puntual encerrada en la lamina por medios de una lente de gran apertura. Una lamina de calcita de caras planas paralelas con un eje óptico normal a las caras muestra franjas circulares. Si la lamina es cortada paralela al eje óptico el sistema es equilateral y se observan hipérbolas.

En el caso de una lamina birefringente de espesor variable, el fenómeno es observado en luz paralela y el ojo es focalizado en la misma lamina. La observación está hecha como en el caso de una lamina delgada isotrópica. Entre los polarizadores cruzados, la intensidad en cada punto de la lamina está dada por

$$I = \sin^2 \left(\frac{\phi}{2} \right) \quad (2.12)$$

donde ϕ es la diferencia de fase entre los rayos ordinario y extraordinario en cada punto. Entre polarizadores paralelos la intensidad esta dada por

$$I = \cos^2 \left(\frac{\phi}{2} \right) \quad (2.13)$$

En el caso de una lamina isotropica, los diferentes colores son obtenidos si la diferencia de fase, ϕ , no es muy grande.

Las mediciones interferométricas empleando elementos birefringentes como Beam-splitters son referidos también como interferómetros de polarización, en estos interferómetros, los caminos seguidos por los rayos ordinarios y extraordinarios están generalmente juntos. Por ejemplo, una lamina de 1 cm de grosor de calcita, cortada a 45° con respecto al eje óptico produce un desplazamiento relativo de 1mm entre los rayos ordinario y extraordinario, mientras que una lamina de cuarzo puede producir un desplazamiento relativo de solo $60\mu m$ [3]. El hecho que los haces estén siempre muy juntos interfiriendo presenta una importante ventaja ya que las influencias mecánicas y térmicas los afectan idénticamente y entonces los efectos de interferencia son altamente estable. El pequeño desplazamiento relativo entre los dos haces se convierte en una desventaja para la observación de objetos grandes, ya que el rayo de referencia como el medido son deformados por el objeto.

2.5 METROLOGÍA EN MICROSCÓPICA INTERFERENCIAL

La interferencia de dos rayos en microscopios es ampliamente usada para estudiar la transparencia de los objetos, también como para estudiar la estructura de las superficies.

Los primeros instrumentos usados para cada estudio se basaron en los interferómetros de Michelson y Mach-Zehnder. Para grandes ampliaciones, una configuración apropiada esta descrita por Linnik[11] en el cual un divisor de rayos dirige la luz dentro de dos objetivos idénticos, uno viendo la superficie del objeto estudiado, y el otro un espejo de referencia. Sin embargo, la designación mas comúnmente usada es el interferómetro de Mirau

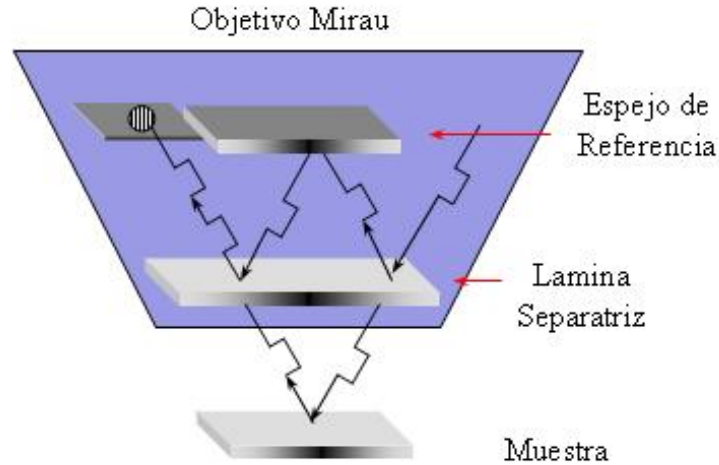
2.5.1. INTERFERÓMETRO DE MIRAU

El interferómetro de Mirau usa un sistema óptico muy compactado el cual puede ser incorporado en un objetivo de microscopio. Como el mostrado en la figura 2.3, la luz de un iluminador está incidiendo a través del objetivo de microscopio en un divisor de haz. El haz transmitido va a la superficie del objeto, mientras el rayo reflejado esta dirigido a un espejo en la parte frontal del objetivo del microscopio. El segundo rayo reflejado es recombinado con el rayo transmitido para formar el patrón de interferencia; este es formado en los contornos del plano imagen de las desviaciones de llanura de la superficie del objeto.[2]

2.5.2. APLICACIONES

La detección de máximos es una técnica que utiliza el interferograma creado por la fuente policromática. En la cual la se presenta un máximo de intensidad en los puntos donde la diferencia de camino óptico es cero. La idea de la técnica consiste en localizar la posición de máxima intensidad del interferograma para todos los puntos de la muestra, desplazando en dirección vertical uno de los brazos del interferómetro. El método utilizado trata de desplazar la muestra verticalmente, movimiento que esta dirigido por

Figura 2.3: objetivo de microscopio interferométrico tipo Mirau



un piezo-eléctrico, cuya finalidad será la de desplazar la franja de intensidad máxima del interferograma por el área de estudio, cuyos pasos del piezo eléctrico sean guardados para formar una imagen que llegue a contener los 256 niveles pedidos para el tratamiento de dicha imagen, asociando a cada nivel una altura respectiva; si Δz es el paso dado por el piezo-eléctrico, la resolución axial del sistema es[15]

$$R = \left[\frac{z}{256} + 1 \right] \Delta z \quad (2.14)$$

Buscando aprovechar el comportamiento del interferograma con luz blanca, se introduce una variación la cual se puede observar como dos sistemas de franjas producidos por la interfase de dos materiales de la muestra estudiada; los cuales dan a conocer la absorción de la parte de la reflectividad de un material comparado con el otro. De la misma manera el interferograma de toda la pieza muestra el estado de superficie de los materiales dando las cualidades ópticas necesarias y validas para el estudio; siendo así que la uniformidad de las franjas en cada material entre mas se comporten de esta manera, se muestra la planicidad de la superficie. Para obtener el interferograma de los objetos, se llega a que la variación de la posición de la altura dado por el piezo-eléctrico

esta íntimamente ligada con el corrimiento de las franjas.

Accionando el piezo eléctrico y tomado como referencia una línea de la imagen de la muestra se graba la intensidad que pasa por esta durante todo el barrido del piezo, obteniendo dos tipos de imagen una en donde están las posiciones en donde se encontró el máximo de intensidad y la otra del valor del máximo, por lo tanto obtendremos una imagen de rango y otra de intensidades.

TRANSFORMACIONES DE FASE EN MATERIALES METÁLICOS

3.1 INTRODUCCIÓN

los metales y las aleaciones son opacos, lustrosos y relativamente pesados, fabricados fácilmente y moldeados, tienen buena resistencia mecánica y conductividad eléctrica. todas esas propiedades son una consecuencia de los enlaces metálicos en los cuales todos los átomos comparten sus electrones de la capa más externa formando una nube electrónica y enlazados por una atracción Columbiana. Cambios en la fuerza de estos enlaces metálicos causan diferencias en las propiedades ópticas, eléctricas, mecánicas y térmicas de varios metales y aleaciones. La simple estructura cristalina regular de metales y aleaciones resulta de los enlaces metálicos, los cuales retienen átomos en arreglos de paquetes cerrados, de manera que los metales puros en general, tienen unas estructuras cristalinas cúbica centrada en las caras (fcc), cúbica centrada en el cuerpo (bcc) o una estructura de paquete hexagonal cerrado (hcp). Con estas estructuras cristalinas, metales y aleaciones tienen relativamente alta ductilidad entonces ellos son

resistentes a la tracción y menos resistentes a las fuerzas de cizallamiento. Sin embargo, todas las propiedades mecánicas de los metales y las aleaciones son controladas por los defectos de los retículos de la red cristalina, como de las dislocaciones y las vacantes de ésta. Las propiedades mecánicas y químicas pueden ser modificadas por la adición de elementos mezclados en diferentes proporciones, las cuales son utilizadas para favorecer en un rango las aleaciones comerciales. En muchas mezclas, los sistemas de composición y tratamientos de calor son seleccionadas distribuciones complejas de fases ya que dan las propiedades requeridas.

Cuando se varía la temperatura a ciertas aleaciones sufren unas determinadas reestructuraciones. En concreto cambian la fase de cristalización, sin abandonar su estado sólido.

No obstante no todos los aceros y las aleaciones son iguales, dependen de la cantidad de carbono que tengan y de la temperatura a que se sometan. Cuando la temperatura es baja, el carbono se sitúa entre los átomos de Hierro y se obtiene la austenita. Si la austenita se enfría lentamente, el carbono es expulsado del cristal y se obtiene la ferrita, pero si se enfría bruscamente se obtiene martensita, en la que el carbono queda atrapado en una red no cúbica sino de cristales tetragonales. La diferencia entre ferrita y martensita es que la segunda tiene una dureza mayor.

3.2 TRANSFORMACIONES DE FASE MARTENSÍTICAS

En la actualidad existen diferentes tipos de aleaciones con características muy diferentes y para los diferentes trabajos e innovaciones que se van presentando. Una de estas aleaciones son las de memoria de forma SMA (*Shape Memory Alloy*), las cuales son aleaciones metálicas que después de una deformación aparentemente plástica, vuelven a su

forma original tras un calentamiento. Los mismos materiales, dentro de un determinado rango de temperaturas, pueden ser deformados hasta casi un 10 % volviendo a recuperar su forma original al ser descargados. Estos inusuales efectos son llamados memoria de forma térmica (o *Efecto memoria de forma*) y memoria de forma elástica (o *Superelasticidad*). Ambos efectos son debidos a un cambio de fase llamada **transformación martensítica termoelástica**. Dado que la SMA responden de una forma peculiar a los cambios de temperatura y a la tensión, han sido clasificados como "materiales inteligentes".

3.2.1. PERSPECTIVA MICROSCÓPICA

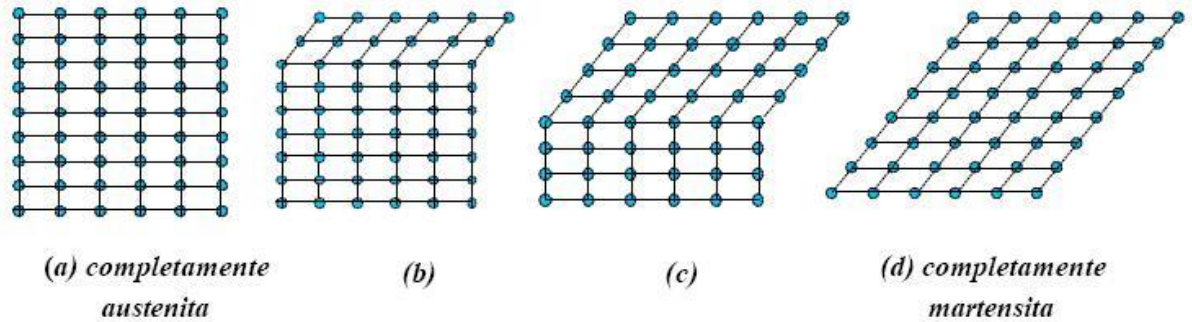
Las transformaciones de estado de los sólidos son de dos tipos: *de difusión y de desplazamiento*. **Las transformaciones por difusión** son aquellas en las que sólo se puede formar una nueva fase moviendo átomos aleatoriamente a distancias relativamente grandes. Se requiere un amplio rango de difusión porque la nueva fase es de diferente composición química que la matriz que la forma. Dado que se requiere una migración atómica, la evolución de este tipo de transformación depende del tiempo y la temperatura. Sin embargo, las *transformaciones por desplazamiento* no requieren un amplio rango de movimientos y en este caso los átomos se reordenan para llegar a una nueva estructura cristalina más estable pero sin cambiar la naturaleza química de la matriz. Dado que no es necesario una migración atómica, estas transformaciones por desplazamiento generalmente son independientes del tiempo y el movimiento de de la interfase entre las dos fases es extremadamente rápido, estando limitado sólo por la velocidad del sonido. Se suelen llamar transformaciones atéricas, dado que la cantidad de nueva fase depende sólo de la temperatura y no de la cantidad de tiempo a la que es expuesta. las *transformaciones martensíticas* son generalmente de este tipo, y se forman enfriando desde una fase a alta temperatura llamada **fase madre o austeni-**

ta. Son, además, transformaciones independientes de la difusión, que se produce de modo instantáneo y manteniendo una relación de orientación entre la fase madre y la martensítica. Los términos de martensita y austenita originalmente se referían sólo a fase de aceros, sin embargo se han extendido el término refiriéndose no sólo al material sino al tipo de transformación. Estas transformaciones son de primer orden en el sentido que se libera calor en su formación, hay una histéresis asociada a esa transformación y hay un rango en el coexisten tanto la austenita como la martensita. Resumiendo las características de la martensita, tenemos que esta se forma enfriando, en una fracción de volumen de martensita aumentando a medida que la temperatura se va reduciendo pero con una fracción de volumen independiente del tiempo y heredando la composición y la ordenación atómica de la fase madre [4].

La transformación de austenita a martensita puede explicarse separadamente en dos partes: ***deformación de la red cristalina y cizalladura invariante de la red***, aunque este proceso es un poco complicado podemos hacer una aproximación en dos dimensiones: la primera parte de este proceso, ***deformación de la red cristalina***, consiste en todos los movimientos atómicos necesarios para producir la nueva estructura como se observa en la figura 3.1. Donde se muestra la estructura austenita en el diagrama (a), y la progresión hacia una estructura totalmente ,martensita se produce de (b) a (d). observando que a medida que la interfase avanza, cada capa de átomos es desplazada solamente una pequeña distancia, dando como resultado final la nueva estructura Martensítica.

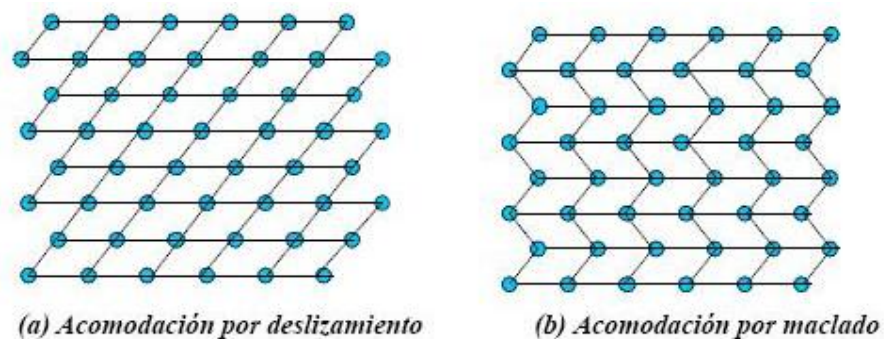
La segunda parte de la transformación martensítica, ***cizalladura invarinate de la red***, es un paso de acomodación, ya que la estructura martensítica producida por el paso anterior es de diferente forma, y frecuentemente volumen, que la austenita circundante. Entonces estas deben ser alteradas para acomodarse a una nueva estructura. Hay dos mecanismos generales por los cuales esto puede pasar: por ***deslizamiento*** o por

Figura 3.1: transformacion autenita a martensita [4]



maclado. En ambos casos (figura 3.2), cada celda individual, o paralelogramo, tiene la nueva estructura martensítica pero la forma en conjunto es la de la austenita original. El deslizamiento es un proceso permanente y es un mecanismo común en la mayoría de las martensitas. El maclado es incapaz de acomodar cambios de volumen, pero puede acomodar cambios de formas es un modo reversible. Para la aleaciones con memoria de forma (SMA) el proceso de acomodación es predominante por maclado.

Figura 3.2: Procesos de acomodamiento por deslizamiento y por maclado [4]



Aunque existe un desplazamiento de la red a lo largo de las placas de martensita, éste se produce sin discontinuidad en la intercara que separa las dos estructuras. Esto significa

que la superficie de separación entre la martensita y la fase inicial es coherente, siendo el plano de acomodación un plano invariante, es decir, con distorsión y rotación nula, no produce pérdida de coherencia ni distorsión elástica. Por lo tanto es una transformación homogénea en donde las líneas rectas siguen siendo rectas y los planos siguen siendo planos. La transformación se puede describir como una cizalladura homogénea paralela al plano de acomodo, existiendo diversas posibilidades de orientación de la martensita que corresponden a las diferentes orientaciones de los planos de acomodo de las direcciones de cizalladura [4].

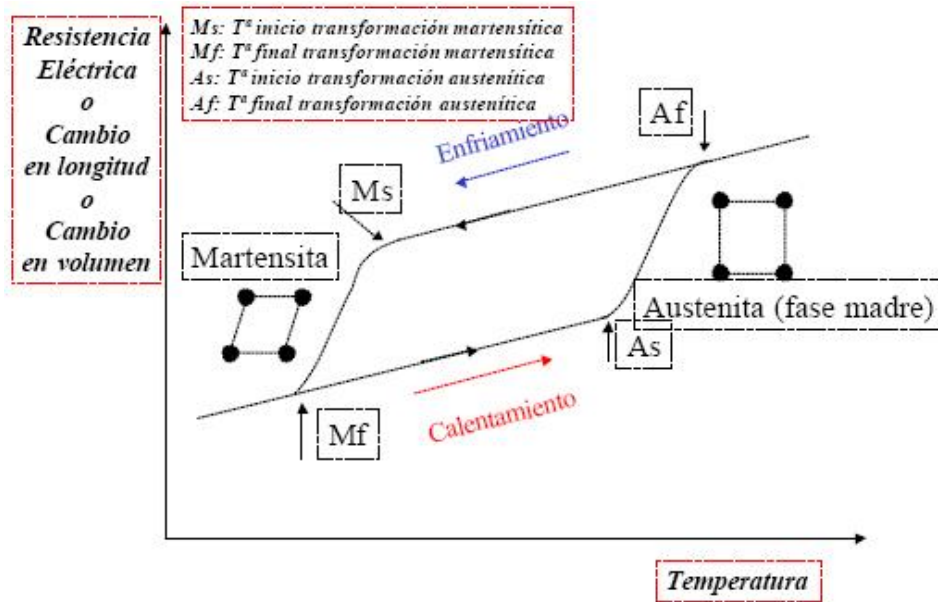
En las aleaciones se presentan varias especies de átomos y se debe considerar cómo se distribuyen esos átomos en la red cristalina. En el acero los átomos están desordenados, esto es, los diferentes elementos se distribuyen en los espacios de la red. En una aleación de Ni-Ti (*niquel titanio*) los átomos están ordenados, significando que los átomos de Ni y Ti se hallan en sitios muy específicos.

3.2.2. PERSPECTIVA MACROSCÓPICA

Desde el punto de vista macroscópico prácticamente todas las propiedades físicas de la austenita y la martensita son diferentes, por lo tanto a medida que se hace la transformación mediante una variación en la temperatura, aparecen una gran variedad de cambios en las propiedades significativas. Cualquiera de ellos puede usarse para seguir el progreso de la transformación, como se ve en la figura 3.3. Las temperaturas M_s , M_f , A_s y A_f que se indican en la figura se refieren a las temperaturas a las cuales la transformación martensítica comienza y acaba, y la temperatura a la cual la transformación austenítica empieza y termina. No existe pues, una determinada temperatura, sino un rango de temperaturas en las que se produce la transformación, las cuales son denominadas *temperaturas características o temperaturas de transformación*, las

cuales son fundamentales en la caracterización de las aleaciones [4].

Figura 3.3: Representación de los cambios de las propiedades Vs temperatura en una transformación martensítica [4]



En el proceso de enfriamiento, la primera de esas temperaturas es la **temperatura de inicio de la transformación martensítica** (M_s), a partir de la cual se empieza a formar martensita por temperatura. Esta transformación termina a medida que decrece la temperatura a una temperatura cercana a M_f o **temperatura final de la transformación martensítica**. El siguiente conjunto de temperaturas características de la transformación es **la temperatura de inicio de la transformación austenítica** (A_s) y **la final de austenita** (A_f). La formación de la fase austenítica comienza a medida que la aleación, en el proceso de calentamiento, alcanza la temperatura A_s . Se comienza a formar entonces una estructura cristalina cúbica centrada en las caras, rígida y dura, que se termina de formar alrededor de A_f . Cuando el elemento se calienta más allá de A_f , la deformación se recupera completamente obteniendo el efecto de memoria de forma. En la figura 3.3, también se puede observar que los procesos de

transformación de austenita a martensita y viceversa, siguen diferentes caminos como consecuencia de la *histéresis de la transformación*. La magnitud de la histéresis depende de la aleación, pero normalmente son típicos los rangos de valores entre $20 - 40^{\circ}\text{C}$ para los materiales con memoria de forma [4].

Tabla 3.1: Composición química y algunas propiedades de las SMA [4]

<i>Aleación</i>	<i>composición</i>	<i>Rango de temperaturas</i>	<i>Histéresis</i>
Ag-Cd	44/49 al %Cd	-190 a -50	15
Au-Cd	46,5/50 al %Cd	30 a 100	15
Cu-Al-Ni	14/14,5 al Al; 3/4 wt % Ni	-140 a 100	35
Cu-Sn	15 at %Sn	-120 a 30	
Cu-Zn	38,5/41,5 wt %Zn	-180 a -10	10
In-Ti	18/23 at %Ti	60 a 100	4
Ni-Al	36/38 at %Ti	-180 a 100	10
Ni-Ti	49/50 at %Ni	-50 a 110	30
Fe-Pt	25 at %Pt	-130	4
Mn-Cu	5/35 at %Cu	-250 a 180	24

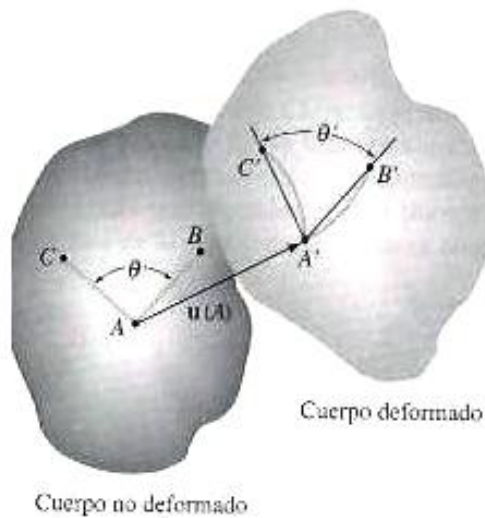
DEFORMACIONES EN MATERIALES

Cuando tenemos un conjunto infinito de partículas (que forman parte, por ejemplo, de un sólido, de un fluido o de un gas) que va a ser estudiado macroscópicamente, decimos que es un *medio continuo*, es decir no consideraremos las discontinuidades microscópicas que pueden existir. En consecuencia se admite que no hay discontinuidades entre las partículas y que la descripción matemática de este medio y de sus propiedades se puede realizar mediante funciones continuas.

Si se le aplica una fuerza a un cuerpo, este tiende a cambiar la forma y el tamaño del cuerpo. A esos cambios se les llama *deformación* y esta puede ser visible o prácticamente inadvertida si no se emplean equipos apropiados para hacer mediciones precisas. Por ejemplo una banda de hule presentará una deformación muy grande cuando se estira. En cambio, en un edificio sólo ocurrirán deformaciones ligeras en sus miembros estructurales debido a la carga de sus ocupantes. Un cuerpo también puede deformarse cuando la temperatura del cuerpo cambia. Un ejemplo común es la expansión o contracción térmica de un techo causada por el clima.

El **desplazamiento** es una magnitud vectorial que se usa para medir el movimiento de una partícula o punto de una posición a otra. Por lo tanto, si un cuerpo se clasifica como deformable, sus partículas adyacentes pueden desplazarse entre sí cuando se aplican fuerzas al cuerpo. Por otra parte, si el cuerpo es rígido no ocurrirá ningún desplazamiento relativo entre las partículas.

Figura 4.1: deformación



Consideremos el cuerpo mostrado en la figura 4.1, que está formado por un material continuo y cohesivo y se muestra en su estado inicial no deformado. Las tres partículas A, B y C están localizadas en el cuerpo como puntos medidos desde un sistema de coordenadas fijo. Cuando una carga ocasiona que el cuerpo se deforme y se mueva entonces a su posición final, las partículas se desplazarán a los puntos A', B' y C' .

Por ejemplo el desplazamiento del punto A está indicado por el vector unitario $\hat{u}(A)$. A causa de la deformación. Las líneas AB y AC , inicialmente rectas, se convierten en curvas $A'B'$ y $A'C'$; en consecuencia, la longitud de AB y AC así como el ángulo θ , serán diferentes de las longitudes curvas $A'B'$ y $A'C'$ y del ángulo θ' . En otras palabras,

la diferencia entre las longitudes y las orientaciones relativas de las dos líneas en el cuerpo son la consecuencia de los desplazamientos causados por la *deformación*. Las mediciones de la deformación deben entonces explicar los cambios en la longitud de los segmentos de línea inscritos en el cuerpo y también los cambios en el ángulo entre tales segmentos.

En sentido general, la deformación de un cuerpo no será uniforme a través de su volumen, por lo que el cambio en la geometría de un segmento de línea dentro del cuerpo puede variar a lo largo de su longitud. Por ejemplo, una porción de línea puede alargarse, mientras que otra porción puede contraerse. Sin embargo, según se consideran segmentos de línea más cortos, estos permanecerán también cada vez más rectos después de la deformación, y así, para estudiar los cambios por deformación más ordenada, consideraremos que las líneas son muy cortas y están localizadas en la vecindad de un punto. Al hacerlo así, cualquier segmento de línea localizado en un punto del cuerpo cambiará en una cantidad diferente respecto a otro localizado en algún otro punto. Además, estos cambios dependerán también de la orientación del segmento de línea en el punto. Por ejemplo, un segmento de línea puede alargarse si está orientado en una dirección, mientras que puede contraerse si está orientado en otra dirección.

4.1 DEFORMACIÓN UNITARIA

Con objeto de describir la deformación por cambios en la longitud de segmentos de líneas y los cambios en los ángulos entre ellos, desarrollaremos el concepto de deformación unitaria. Las mediciones de deformación unitaria se hacen en realidad por medios experimentales, y una vez obtenidas las deformaciones unitarias, se mostrara como pueden relacionarse con las cargas aplicadas, o esfuerzos, que actúan dentro del cuerpo.

4.1.1. DEFORMACIÓN UNITARIA NORMAL

El alargamiento o contracción de un segmento de línea por unidad de longitud se llama ***deformación unitaria normal***. Para desarrollar una definición formal de la deformación unitaria normal, consideraremos una línea AB que está contenida dentro del cuerpo no deformado mostrado en la figura 4.2(a). Esta línea está situada a lo largo del eje n y tiene una longitud original Δs . Durante la deformación, los puntos A y B se desplazan a los puntos A' y B' y la línea recta se convierte en una curva con longitud $\Delta s'$, figura 4.2(b). El cambio en longitud de la recta es entonces $\Delta s' - \Delta s$. Si definimos la *deformación unitaria normal promedio* usando el símbolo ϵ_{prom} entonces

$$\epsilon_{prom} = \frac{\Delta s' - \Delta s}{\Delta s} \quad (4.1)$$

A medida que el punto B se escoge cada vez más cercano al punto A , la longitud de la línea se vuelve cada vez más corta, de tal modo que $\Delta s \rightarrow 0$. igualmente, esto causa que B' se aproxime a A' , de modo que $\Delta s' \rightarrow 0$. Por consiguiente, la deformación unitaria normal en el punto A y en la dirección de n en el límite es

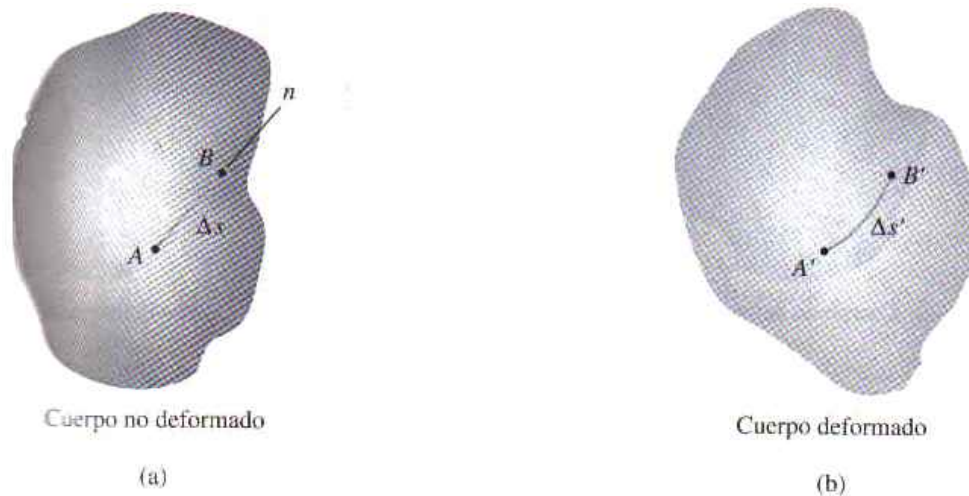
$$\epsilon = \lim_{B \rightarrow A} \frac{\Delta s' - \Delta s}{\Delta s} \quad (4.2)$$

Si se conoce la deformación unitaria normal, podemos usar esta ecuación para obtener la longitud final aproximada de un segmento *corto* de línea en la dirección de n , después de que ha sido deformado. Tenemos

$$\Delta s' \approx (1 + \epsilon)\Delta s \quad (4.3)$$

Por tanto, cuando ϵ es positiva, la línea inicial Δs se alargará, mientras que si ϵ es negativa, la línea se contraerá.

Figura 4.2: Deformación unitaria



Debemos notar que la deformación unitaria normal es una cantidad adimensional, ya que es una relación entre dos longitudes. Aunque éste, es una practica común establecerla en términos de una relación de unidades de longitud. Si se usa el sistema internacional, entonces las unidades básicas serán metro/metro (m/m). Ordinariamente, en la mayoría de los casos de las aplicaciones, ϵ será muy pequeña, así que las mediciones del alargamiento son micrometros por metro ($\mu m/m$). En trabajos experimentales, a veces se expresa el alargamiento como un porcentaje, es decir, $0,001m/m = 0,1\%$.

4.1.2. DEFORMACIÓN UNITARIA CORTANTE

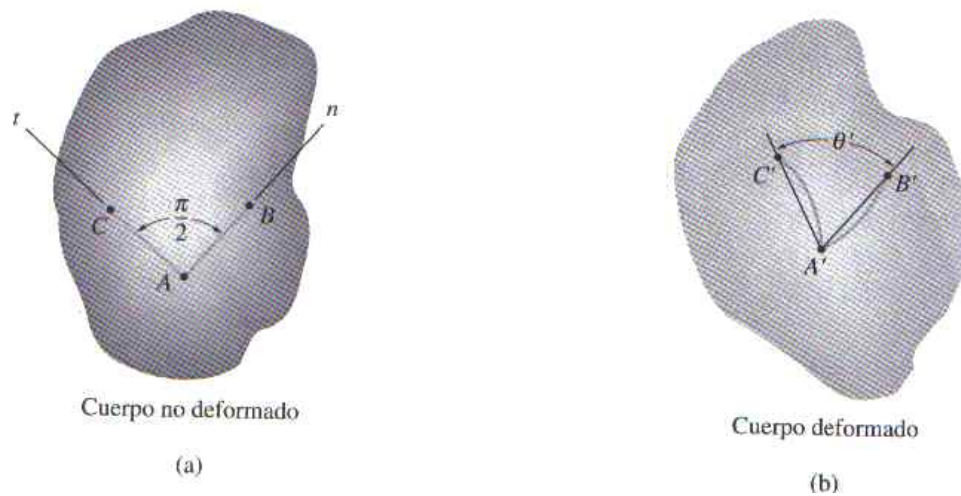
El cambio en el ángulo que ocurre entre dos segmentos de línea que originalmente eran perpendiculares entre sí se llama *deformación unitaria cortante*. Este ángulo se denota por γ y se mide en radianes. Para mostrar cómo se desarrolla, consideremos

los segmentos de línea AB y AC partiendo desde el mismo punto A en un cuerpo, y dirigidos a lo largo de los ejes perpendiculares n y t , figura 4.3(a). Después de la deformación los extremos de las líneas se desplazan, y las líneas mismas se vuelven curvas, de modo que el ángulo entre ellas en A es θ' , figura 4.3(b). De aquí definimos la deformación unitaria cortante en el punto A que esta asociada con los ejes n y t como:

$$\gamma_{nt} = \frac{\pi}{2} - \lim_{B \rightarrow A, C \rightarrow A} \theta' \quad (4.4)$$

Advierta que si θ' es menor que $\pi/2$, la deformación unitaria cortante es positiva, mientras que si θ' es mayor que $\pi/2$, la deformación cortante es negativa.

Figura 4.3: Deformación unitaria cortante



En resumen podemos decir que las **deformaciones unitarias normales causan un cambio en el volumen** del cuerpo, mientras que las **deformaciones unitarias cortantes causan un cambio en su forma**. El estado de deformación unitaria en un punto requiere que se especifiquen tres deformaciones unitarias normales, ϵ_x , ϵ_y y ϵ_z , y tres deformaciones unitarias cortantes, γ_{xy} , γ_{yz} y γ_{xz} . Estas deformaciones unitarias

describen completamente las deformaciones de un elemento rectangular de volumen del material ubicado en el punto y orientado de manera que sus lados sean originalmente paralelos a los ejes x, y y z . Una vez que se hayan definido estos alargamientos en todos los puntos del cuerpo, podrá entonces describirse la forma deformada del cuerpo. Debería también añadirse que al conocer el estado de deformación unitaria en un punto, definido por sus seis componentes, será posible determinar las componentes de la deformación unitaria en un elemento situado y orientado en cualquier otra dirección [17].

4.2 DESPLAZAMIENTOS

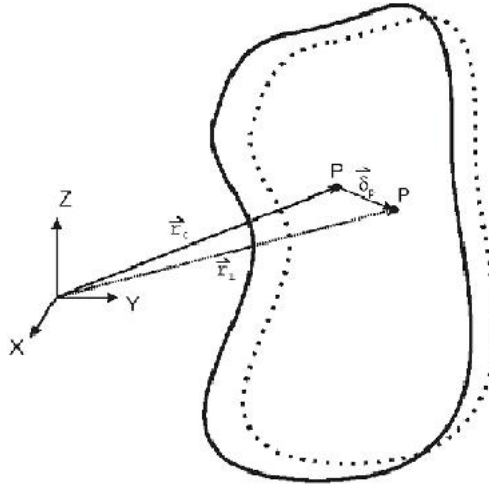
Sea un punto P dentro de un sólido elástico. Sea $\vec{r}_0 \equiv (x_0, y_0, z_0)$ el vector posición del punto P antes de aplicar ninguna acción sobre el sólido (figura 4.4). Al aplicar al ‘sólido un sistema de fuerzas \vec{f}_v, \vec{f}_s , el punto P sufre un desplazamiento, de forma que su vector posición es el $\vec{r}_1 \equiv (x_1, y_1, z_1)$. Se define como **vector desplazamiento** del punto P , $\vec{\delta}_p$, la diferencia:

$$\vec{\delta}_p = \vec{r}_1 - \vec{r}_0 = \begin{pmatrix} x_1 - x_0 \\ y_1 - y_0 \\ z_1 - z_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} \quad (4.5)$$

Dentro del sólido elástico, el vector desplazamiento $\vec{\delta}_p$ es una función de punto. Se trata por tanto de un campo vectorial, el campo de desplazamientos, definido dentro del sólido elástico y asociado a cada sistema de fuerzas que actúe sobre el mismo.

Cabe señalar que aunque la definición del vector desplazamiento tiene mucha más generalidad, nosotros estamos únicamente interesados en el desplazamiento de los puntos

Figura 4.4: Desplazamientos



del sólido elástico en los casos en que los vínculos exteriores del sólido son suficientes para impedir su movimiento de sólido rígido. Supondremos que no hay desgarros en el material durante la aplicación del sistema de fuerzas exteriores, por lo tanto las componentes $u \equiv u(x, y, z)$, $v \equiv v(x, y, z)$, $w \equiv w(x, y, z)$ del vector desplazamiento $\vec{\delta}_p$, por el fenómeno físico que representan, deben ser funciones continuas, ya que un mismo punto del sólido no puede desplazarse a dos puntos diferentes.

4.3 MATRICES DE GIRO Y DEFORMACIÓN

Sea Q otro punto del sólido elástico infinitamente próximo a P . Si se analiza el desplazamiento de estos dos puntos al aplicar un sistema de fuerzas exteriores se tiene (figura 4.5)

$$\vec{PQ}' = d\vec{r}_0 + \vec{\delta}_p + d\vec{\delta}_p \quad (4.6)$$

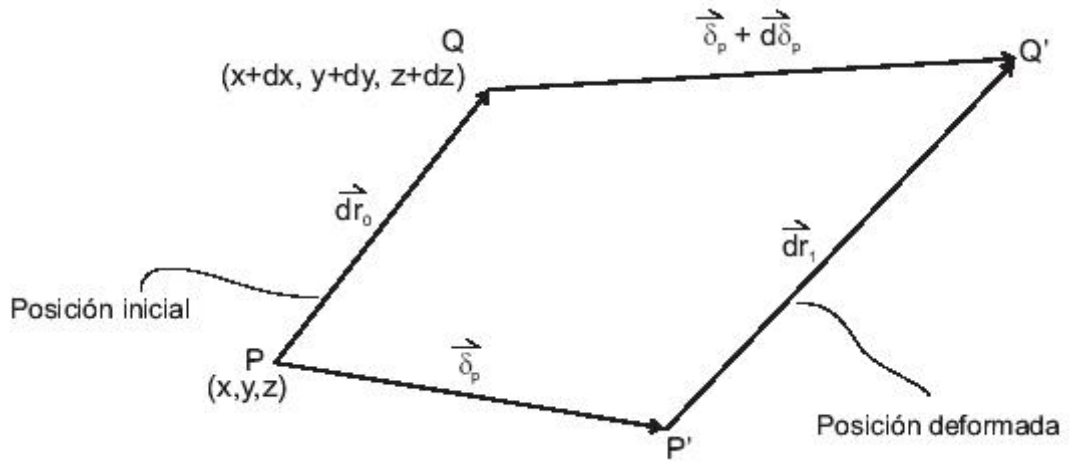
y también

$$\overrightarrow{PQ'} = \overrightarrow{\delta_p} + d\overrightarrow{r_1} \quad (4.7)$$

luego:

$$\overrightarrow{r_1} = d\overrightarrow{r_0} + \overrightarrow{\delta_p} \quad (4.8)$$

Figura 4.5: Desplazamientos entorno del punto P



y además:

$$\overrightarrow{\delta_p} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} & \frac{\partial u}{\partial z} \\ \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{\partial v}{\partial z} \\ \frac{\partial w}{\partial x} & \frac{\partial w}{\partial y} & \frac{\partial w}{\partial z} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} dx \\ dy \\ dz \end{pmatrix} = [M]d\overrightarrow{r_0} \quad (4.9)$$

entonces tenemos que:

$$\overrightarrow{r_1} = d\overrightarrow{r_0} + [M]\overrightarrow{r_0} \quad (4.10)$$

es decir, la separación $\overrightarrow{r_1}$ entre los puntos P y Q en el estado que resulta tras aplicar el sistema de fuerzas es igual a la separación inicial $\overrightarrow{r_0}$ más la transformación lineal de la separación inicial dada por la matriz [M].

la matriz $[M]$ puede descomponerse en suma de una matriz simétrica y otra matriz antisimétrica:

$$[M] = \frac{1}{2}[M] + [M^t] + \frac{1}{2}[M] - [M]^t = [D] + [H] \quad (4.11)$$

donde la Matriz simétrica $[D]$, se conoce con el nombre de **matriz de deformación** y la otra matriz antisimétrica $[H]$ se llama **matriz de giro**. Entonces podemos escribir que la posición relativa de los puntos P y Q durante la aplicación de las fuerzas exteriores cambia del modo siguiente:

$$\vec{r}_1 = d\vec{r}_0 + [D]\vec{r}_0 + [H]\vec{r}_0 \quad (4.12)$$

Se debe recordar que la transformación lineal de un vector dada por una matriz antisimétrica es equivalente a un producto vectorial de un vector \vec{w} formado a partir de las componentes de la matriz por el vector sobre el que se aplica la transformación. Si las componentes de la matriz son infinitesimales, la transformación puede interpretarse como un giro infinitesimal de sólido rígido alrededor del eje definido por el vector $d\vec{w}$ (figura 4.6).

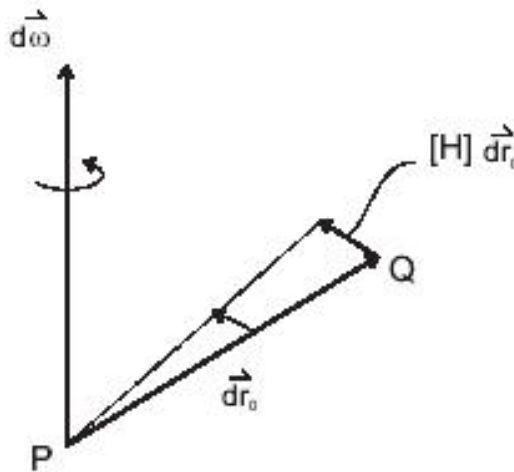
$$d\vec{w} \times d\vec{r} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ dw_x & dw_y & dw_z \\ dx & dy & dz \end{vmatrix} = \begin{pmatrix} dw_y dz - dw_z dy \\ dw_z dx - dw_x dz \\ dw_x dy - dw_y dx \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -dw_z & dw_y \\ dw_z & 0 & -dw_x \\ -dw_y & dw_x & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} dx \\ dy \\ dz \end{pmatrix}$$

Es decir, durante la aplicación de un sistema de fuerzas, dos puntos próximo P y Q del sólido elástico se mueve uno con respecto al otro:

- Girando uno con respecto al otro: giro de sólido rígido dado por la matriz $[H]$. Esta transformación no produce tensiones (fuerzas internas) en el material, ya que la distancia entre los dos puntos no cambia.

- Distorsionando o estirando el material: el movimiento relativo distinto del giro, dado por la matriz de deformación $[D]$. Esta transformación produce tensiones (fuerzas internas) en el material.

Figura 4.6: Interpretación Geométrica de la matriz de giro



La Matriz $[H]$ representa un giro *puro*, esto es, sin deformación, únicamente cuando el entorno del punto P sufre un giro pequeño o infinitesimal. Esto es, cuando las componentes de $[H]$ son *pequeñas*, tal como estamos suponiendo. En este caso se cumple lo anterior y la matriz $[D]$ reúne toda la deformación del entorno del punto.

Si los giros no son pequeños, entonces la matriz $[H]$ construida según se indica más arriba, no presenta una transformación de giro *puro*, sino que incorpora parte de la deformación del entorno del punto P . En estos casos la deformación se define mediante otras matrices más complicadas que la matriz $[D]$.

Como hemos señalado más arriba, nosotros asumimos que para pequeños desplazamientos de la elasticidad es lineal, que implica que tanto los giros como las deformaciones

son pequeños. A partir de las componentes del campo de desplazamientos, la matriz de giro es:

$$[H] = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{2}(\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x}) & \frac{1}{2}(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x}) \\ -\frac{1}{2}(\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x}) & 0 & \frac{1}{2}(\frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial y}) \\ -\frac{1}{2}(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x}) & -\frac{1}{2}(\frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial y}) & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -a_z & a_y \\ a_z & 0 & -a_x \\ -a_y & a_x & 0 \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

y la matriz de deformación :

$$[D] = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{1}{2}(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}) & \frac{1}{2}(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}) \\ \frac{1}{2}(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}) & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{1}{2}(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}) \\ \frac{1}{2}(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}) & \frac{1}{2}(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}) & \frac{\partial w}{\partial z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x & \frac{1}{2}\gamma_{xy} & \frac{1}{2}\gamma_{xz} \\ \frac{1}{2}\gamma_{xy} & \varepsilon_y & \frac{1}{2}\gamma_{yz} \\ \frac{1}{2}\gamma_{xz} & \frac{1}{2}\gamma_{yz} & \varepsilon_z \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

La matriz de deformación representa una magnitud tensorial de orden 2 que en la literatura se conoce con el nombre de **tensor de pequeñas deformaciones**. Dentro del sólido elástico, la matriz de deformación $[D]$ es una función de punto, se trata por lo tanto de un campo tensorial de orden 2.

DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

Debido a que las deformaciones en las SMA (shape memory alloy) son muy pequeñas y que las transformaciones que estas presentan están en un rango de temperatura que abarca la temperatura ambiente, ver tabla 3.1. En la realización de este trabajo se utilizó un microscopio interferométrico (Nikon Eclipse ME600 figura 5.1), el cual utiliza una fuente de luz blanca y dos objetivos tipo Mirau de aumentos de $50X$ y $10X$, este también posee una cámara CCD marca SONY de $640 * 480$ píxeles. Con la cual se obtuvieron las imágenes apropiadas para el estudio, se analizaron diferentes regiones de la muestra para así poder obtener una descripción más general de las deformaciones. La reconstrucción 3D del estado inicial y final de la superficie se realizó con ayuda de un piezo-eléctrico cuyo desplazamiento es controlado por un programa en visual C++ para una tarjeta Matrox. La librería MIL, permite hacer adquisiciones dinámicas y obtener la información deseada. El microscopio tiene integrado un sistema de movimiento XY con el cual se barrieron varias zonas de las muestras. La tarjeta Matrox hace adquisición en escala de grises por lo tanto la cámara CCD es monocromática.

Para la toma de los datos fue necesario la construcción de un dispositivo el cual permitiera colocar la muestra en el microscopio para obtener las deformaciones, tanto

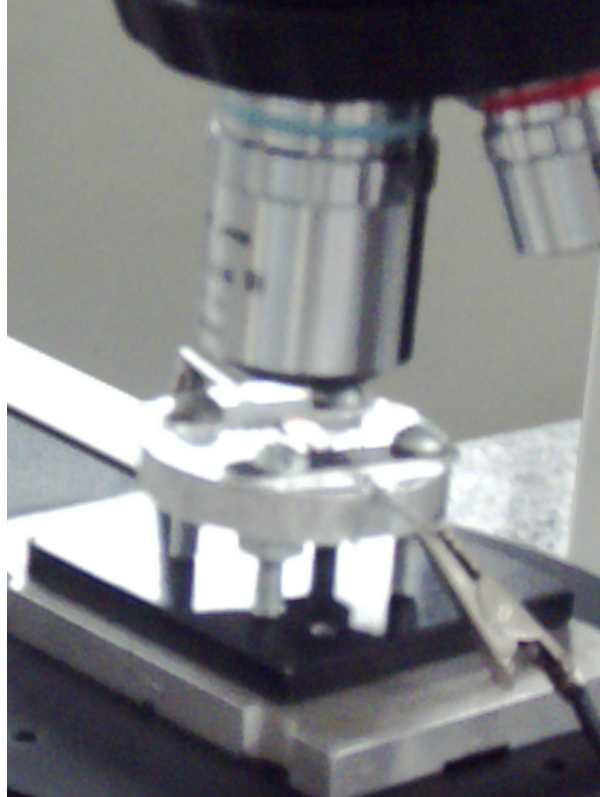
Figura 5.1: Microscopio Nikon Eclipse ME600



longitudinales como transversales que se producían en las muestras de Ni-Ti como de acero 316, figura 5.2, este soporte sujeta a la resistencia de Fe-Ni. Dicho soporte se construyó de Aluminio, con los respectivos agarres; el diseño de este soporte permite que el material se dilate tanto transversalmente como longitudinalmente debido a que no presenta ningún obstáculo en estas direcciones. También nos permitió darle una mayor estabilidad a el montaje, ya que si se ubicaba la resistencia en el aire la repetibilidad del experimento no se podría garantizar; esto es debido a que no se tiene control de la inclinación de la resistencia y la muestra respectivamente. Otra ayuda que se proporciono con el soporte fue que se nos permitió colocar la muestra sobre el piezo-eléctrico sin dañarlo.

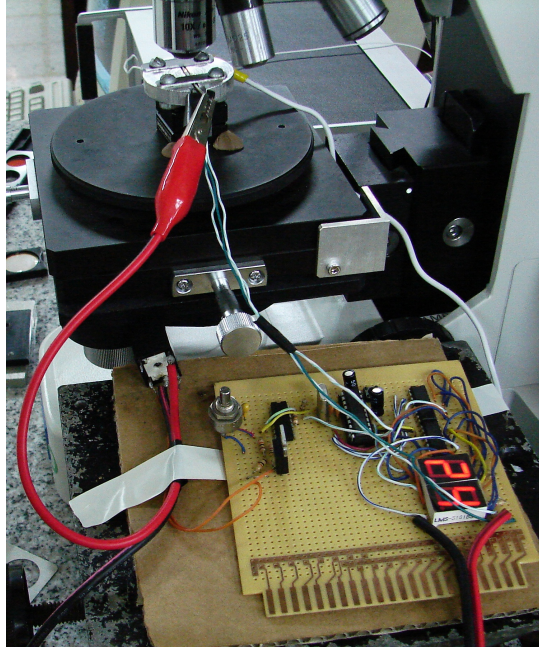
La clave de este trabajo son los cambios que se producen en los materiales metálicos cuando son expuestos a la temperatura, por lo que se tubo que adquirir un controlador de temperatura, figura 5.3; este posee un sensor de de temperatura tipo *LM35*, que

Figura 5.2: Soporte para las diferentes muestras



proporciona $10mA$ por grado de temperatura con una incertidumbre en la medida de $\pm 1^{\circ}C$. Este controlador posee un relevo de $120V$ a $5A$, el cual permite cortar el paso de corriente que esta alimentando la resistencia. La resistencia que posee el circuito en un alambre de Fe-Ni de dos Calibres diferentes uno de $1,45mm$ y otro de $1,10mm$ de diámetro, ya que se manejaron dos tipos de diámetros en las muestras. La corriente que pasa por la resistencia hace que esta se caliente, por lo tanto al controlar la corriente que esta pasando por la resistencia controlamos la temperatura. Este controlador posee un display de dos dígitos en el que podemos visualizar la temperatura que esta dando el sensor. El controlador posee un potenciómetro lineal con el que podemos aumentar o disminuir la temperatura. El controlador Tiene un fuente de alimentación de $5V$ a $1,5A$ ref *sp2718*.

Figura 5.3: Controlador de temperatura



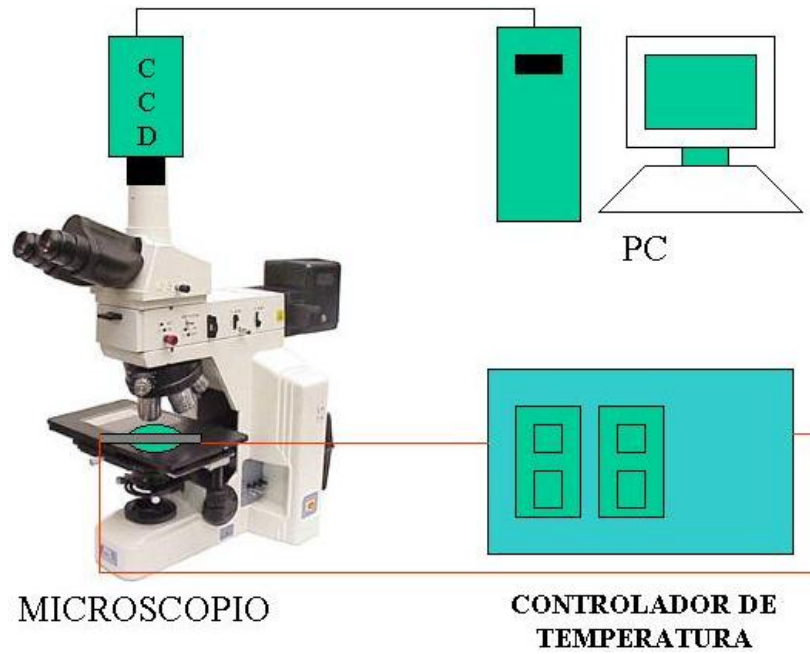
Este Controlador esta conectado esta conectado a $120V$ de corriente alterna. El sistema implementado posee una resistencia variable o reostato de 10Ω , el cual permite cerrar el circuito sin que este haga corto circuito. Al colocar este controlador entre la resistencia y el reostato podemos regular la corriente y por lo tanto la temperatura.

Para lograr el rango de temperaturas propuesto para este trabajo de grado se utilizo el ambiente controlado con el que cuenta la sede de Guatiguara, la temperatura ambiental se coloco a $16^{\circ}C$ con la cual logramos que la muestra empezara en la temperatura requerida de $20^{\circ}C$, el otro limite de temperatura se alcanzo disminuyendo la resistencia del reostato, lo cual permitía un mayor paso de corriente y por lo tanto una mayor temperatura en la resistencia de Fe-Ni.

El esquema general del montaje realizado en este trabajo es presentado el la figura

5.4, con el cual podemos tener una idea de los instrumentos utilizados y su respectiva ubicación.

Figura 5.4: Esquema del montaje experimental



RESULTADOS EXPERIMENTALES

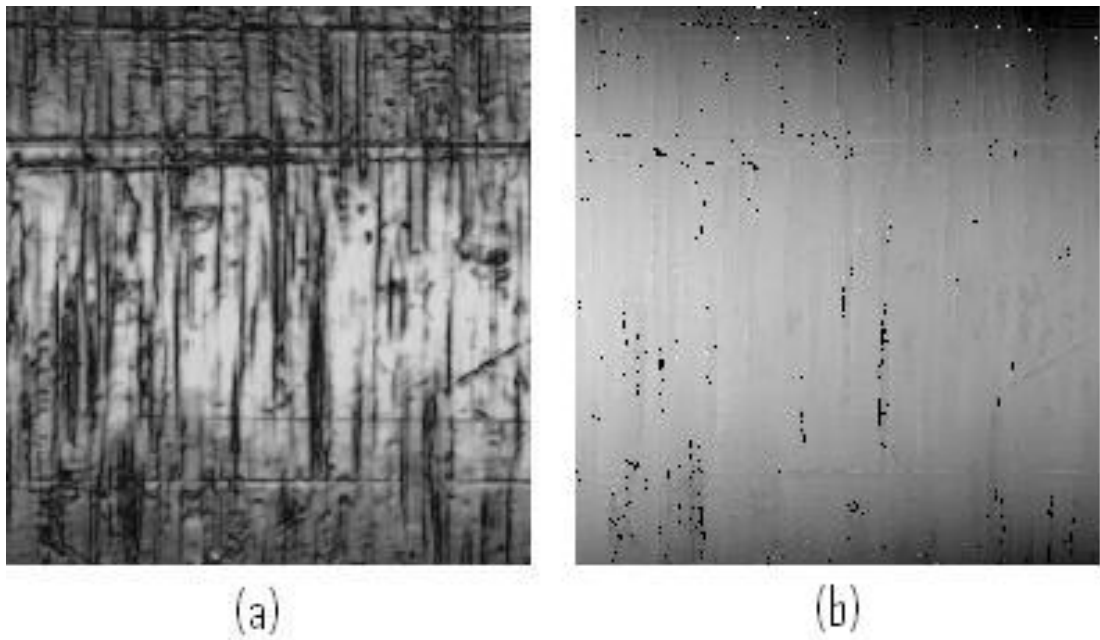
En este trabajo de grado se trabajaron tres tipos de muestras una de Ni-Ti tipo M, Ni-Ti tipo N y un muestra de acero 316. Estas muestras tienen diferentes características; las dos primeras son muestras No Ferrosas y se diferencian en el tiempo en el que se presenta la transformación martensítica, la otra muestra es un acero inoxidable 316. Como el trabajo es caracterizar las deformaciones metálicas, se trabajó otra muestra con unas características un poco diferentes a las de las dos primeras la cual es un alambre de Fe-Ni, el cual es material Ferroso.

Basandonos en una de las propiedades de los materiales con memoria de forma, la cual nos dice que estos no se deforman por el tiempo de exposición a una temperatura, sino al los cambios en el valor de esta. Nos propusimos determinar las deformaciones que sufren los materiales metálicos cuando son expuestos a cambios de temperatura entre los $20^{\circ}C$ y los $32^{\circ}C$.

6.1 DETECCIÓN DE MÁXIMOS

El programa MATVIS hecho por el Dr. Arturo Plata, utiliza la técnica de detección de máximos descrita en el capítulo 2 (Capítulo 2, sección 2.5, subsección 2.5.2.), para obtener imágenes de intensidad [figura 6.1(a)] y de rango [figura 6.1(b)]. En estas podemos encontrar codificada la información de cada uno de los puntos en la muestra a las diferentes temperaturas.

Figura 6.1: (a) imagen de máximos, (b) imagen de rango



Un factor que debemos tener en cuenta, es la resolución de nuestro sistema como de la técnica que se está utilizando, el paso del piezo-eléctrico es de $\pm 3nm$, la separación entre píxeles de la cámara CCD es aproximadamente de $13\mu m$. Entonces si aplicamos la ecuación 2.14 y teniendo en cuenta que estamos utilizando luz blanca, podemos obtener una resolución de $\pm 10nm$ en la dirección de z ; mientras que la resolución en x y y esta en el orden de las micras, lo cual es debido a las características de la cámara CCD.

6.2 RECONSTRUCCIÓN 3D

Una vez obtenidas las imágenes de rango y de intensidad se realiza la reconstrucción 3-D (figura 6.2) mediante el uso de MATLAB, del material a una determinada temperatura, esto con el fin de visualizar los detalles que presenta la superficie de las diferentes muestras.

Para realizar la reconstrucción tridimensional de la superficie de un material, es necesario dos tipos de información, la primera es la información de las posiciones en donde se encuentran los máximos de intensidad del interferograma; la cual se encuentra presente en las imágenes de rango. La información de las alturas en estas imágenes es para cada $3nm$ esto es debido a que el piezo eléctrico tiene este paso. La segunda información necesaria para realizar la reconstrucción tridimensional es la que se encuentra en la imagen de máximos de intensidad; la textura [16]. Esta nos proporciona la información del estado de la superficie. La combinación de las dos imágenes nos proporciona toda la información necesaria para realizar un correcto tratamiento de imágenes.

Se debe realizar un filtrado para un ruido del tipo "sal y pimienta." a las imágenes de rango, esto es debido a que las imágenes obtenidas presentan puntos negros y puntos blancos los cuales al ser graficados representan picos y huecos en la reconstrucción tridimensional.

6.3 CORRELACIÓN

Se realizo una correlación cruzada buscando puntos que contengan la misma cantidad de información, puntos iguales. Esto sirve para determinar cuando un punto en una

Figura 6.2: Reconstrucción 3D

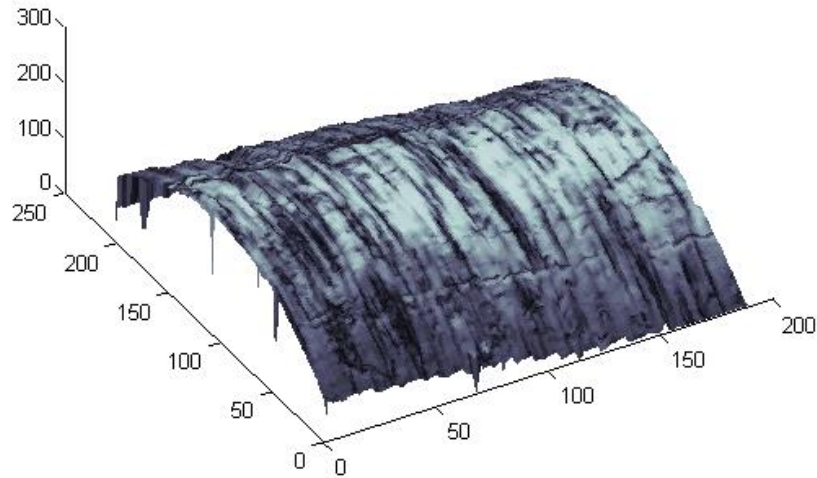
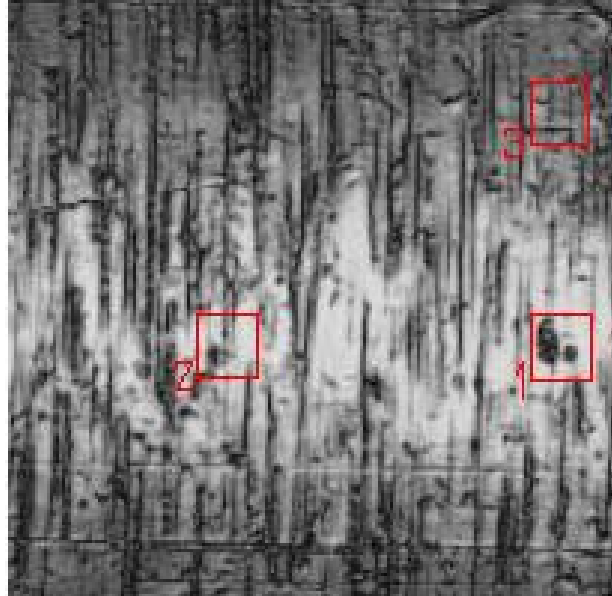


imagen se mueve. Para poder realizar este tipo de tratamiento se debe escoger una region característica del material, con una mancha, una topografía que no se repita en la muestra, esto con el fin de que la correlación sea mas eficaz en determinar la posición de la zona que estamos trabajando.

En nuestro caso se escogen tres regiones diferentes (ver figura 6.3), las cuales nos proporcionan picos de correlación bien definidos (figura 6.4). Estas regiones se encuentran distribuidas en la muestra de tal forma que nos brindaran información en las direcciones x , y y z de las deformaciones y rotaciones que sufre en material.

Los picos de correlación obtenidos para cada region nos brindan la información de la posición (x, y, z) de un punto en la imagen antes y después de aplicada una temperatura.

Figura 6.3: Puntos para correlacionar

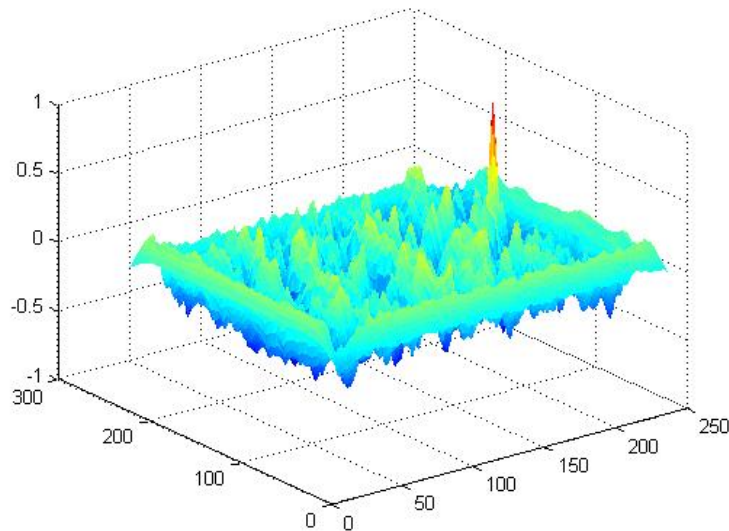


6.4 EXTRACCIÓN DE LAS DEFORMACIONES Y ROTACIONES

Una vez obtenida la posición (x, y, z) de los puntos de correlación del material se procedió a quitar las traslaciones masivas que sufre el material, para lo cual se toma un punto, en este caso de los que se utilizaron para hacer la correlación y lo sustraemos de los demás puntos obtenidos en cada temperatura; por lo tanto, solo vamos a obtener los desplazamientos locales del material. Una vez determinados los desplazamientos procedemos a mirar la variación de estos en las direcciones de x , y y z , la cual realizando un análisis mediante MATLAB, para así obtener las deformaciones que estos presentan.

Después de haber determinado las deformaciones se procedió a obtener las rotaciones microscópicas que sufren los materiales, las cuales se obtienen de la diferencia de los

Figura 6.4: Pico de correlación



ángulos inicial y final, en nuestro caso el ángulo inicial es de 90° y los ángulos finales están dados por el cerramiento o apertura que sufren los puntos de correlación en la muestra.

Las deformaciones se encuentran dadas en micras (μm) y las rotaciones que sufren los materiales se encuentran dadas en grados ($^{\circ}$). Cuando enfrentamos cambios de signos en las muestras nos son evidentes cambios en la dirección de la deformación, es decir la dirección derecha o izquierda de la deformación en y y las deformaciones en x están dadas por el cambio de signo en arriba o abajo de la imagen. Una característica que también se mide son las deformaciones que sufren los materiales en dirección radial, la cual esta determinada en las deformaciones del eje z .

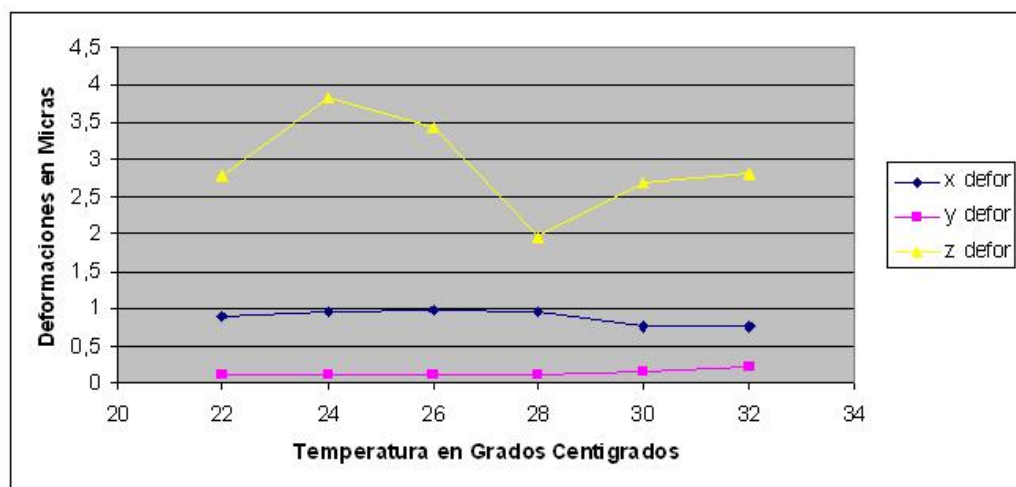
Para la extracción de las deformaciones que sufren los materiales se comparan los datos obtenidos de la primera imagen que serían los puntos de entrada y los puntos obtenidos

de las correlaciones de las posteriores imágenes, comparando las con las primeras en todas las ocasiones. Esto nos producirá los vectores de desplazamientos del material, luego se determinan las deformaciones las cuales se obtienen mediante la determinación de pequeñas variaciones de los vectores en las direcciones de x , y y z . Se debe tener en cuenta que esta información (variación de los desplazamientos), se encuentra no solo las deformaciones sino también las rotaciones que presentan localmente los materiales.

Tabla 6.1: Deformaciones del material Nitinol N

<i>Temperatura</i>	<i>rotación</i>	<i>deformación x</i>	<i>deformación y</i>	<i>deformación z</i>
22	0.7073	0.8818	-0.1195	2.7935
24	0.7162	0.9544	-0.1210	3.8387
26	0.7162	0.9786	-0.1210	3.4322
28	0	0.9680	-0.1210	1.9529
30	4.5655e-15	0.7623	-0.1452	2.7025
32	0.7073	0.7596	-0.2151	2.7961

Figura 6.5: Gráfica de Deformación Vs Temperatura de la muestra de Nitinol N



En la tabla 6.1, observamos que este material sufre deformaciones en sus tres direcciones,

como también sufre rotaciones. Las rotaciones presentes en el Nitinol N son producto de las transformaciones de fase ya que estas cuando cambian su fase producen una rotación en sus celdas. Cuando obtenemos datos como $4,5655e - 15$, lo tomaremos como cero esto es debido a que en la actualidad no existe un instrumento que tenga tal precisión en su medida. Se puede observar que las deformaciones de mayor tamaño se presentan en el eje Z, las cuales presentan deformaciones de $\pm 1,0\mu m$ las cuales comparadas con las deformaciones sufridas en los otros ejes son las de mayor tamaño. Para tener una mejor idea de las deformaciones y las rotaciones que sufre este material se realizó una gráfica de deformación Vs Temperatura (figura 6.5). Si observamos la figura 6.9, podemos decir que este material sufre un cambio de fase entre los $28^{\circ}C$ y los $30^{\circ}C$, y si analizamos la gráfica de deformaciones; vemos que el material sufre un cambio en las deformaciones en el momento de la rotación de las celdas.

Tabla 6.2: Deformaciones del material Nitinol M

<i>Temperatura</i>	<i>rotación</i>	<i>deformación x</i>	<i>deformación y</i>	<i>deformación z</i>
22	-1.5944	-5.2957	0.2381	-0.1320
24	0	-7.8573	0.4762	-0.8568
26	1.3861	-12.7156	1.0487	-0.6245
28	1.4205	-18.7163	1.4286	-3.9040
30	0.1790	-23.5553	2.1923	-3.0294
32	4.3934	-0.4516	4.3606	-0.6864

La tabla 6.2, presenta un cambio en las rotaciones a los $24^{\circ}C$, por lo que se puede atribuir que en esta sucede los cambios de fase; observamos que en esta rango suceden deformaciones en el material en todas las direcciones (figura 6.6).

La muestra de Acero 316, es de gran importancia debido a que este no presenta cambio de fase en el rango de temperaturas que se está trabajando, el cual se presenta después

Figura 6.6: Gráfica de Deformación Vs Temperatura de la muestra de Nitinol M

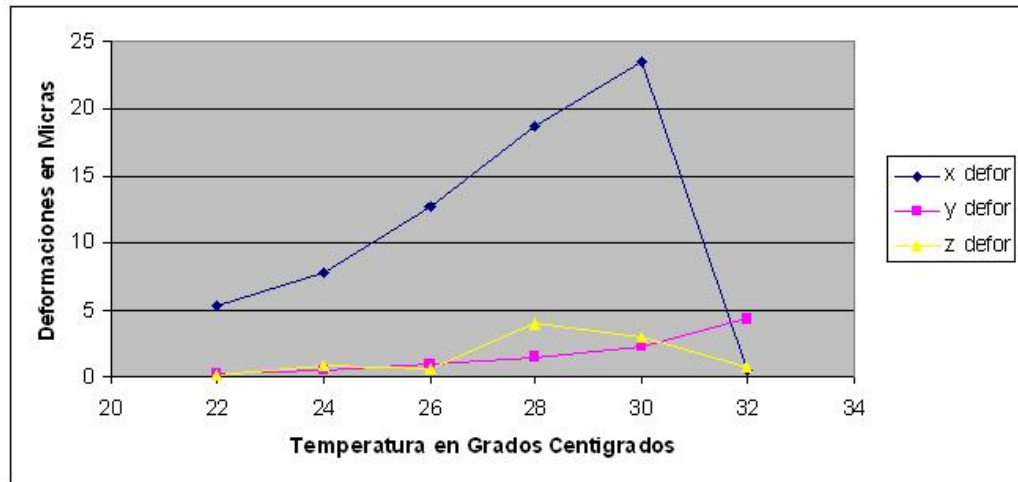


Tabla 6.3: Deformaciones del material Acero 316

<i>Temperatura</i>	<i>rotación</i>	<i>deformación x</i>	<i>deformación y</i>	<i>deformación z</i>
22	0	0	0	1.9625
24	7.6375e-15	0.3680	0.0920	1.9647
26	-1.5307e-15	0.2760	6.5865e-18	1.8321
28	-1.5307e-15	0.2760	6.5865e-18	2.0450
30	-1.5307e-15	0.2760	6.5865e-18	1.7648
32	7.5922	0.3680	0	2.7840

de los $900^{\circ}C$. Es observable que el material no presenta rotaciones, sin embargo si presenta deformaciones en los ejes x y y las cuales son pequeñas comparadas con los valores de deformación se encuentra en el eje z que son mayores de $1\mu m$ (figura 6.7).

En la tabla 6.4, se presenta los valores de rotación y deformación que se presentan en el material Fe-Ni, el el cual las mayores deformaciones se presentan a lo largo del eje z . En este material se puede observar que las rotaciones se presentan después de los $26^{\circ}C$

Figura 6.7: Gráfica de Deformación Vs Temperatura de la muestra de Acero 316

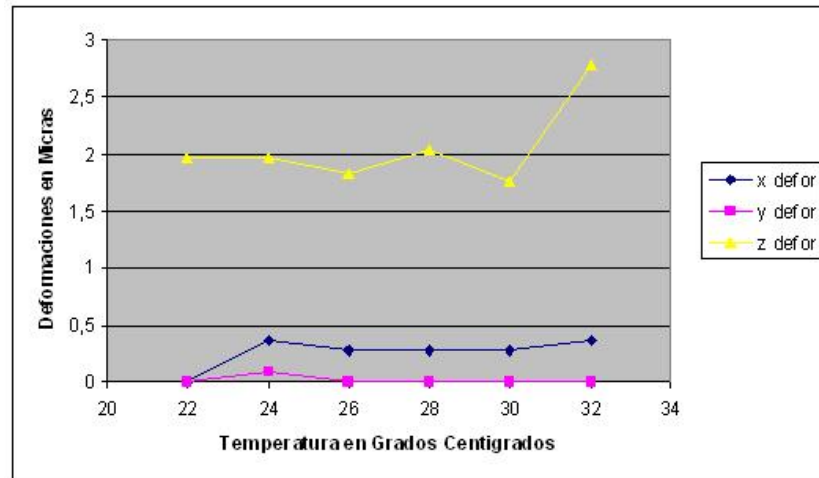


Tabla 6.4: Deformaciones del material Fe-Ni

<i>Temperatura</i>	<i>rotación</i>	<i>deformación x</i>	<i>deformación y</i>	<i>deformación z</i>
22	4.7855e-16	-3.7656	0.6276	1.2197
24	0.6253	-5.7129	-2.615e-16	-2.9306
26	0	-7.2174	0.3138	1.6162
28	0.5471	-10.5514	-4.8309e-16	-0.8925
30	0.5471	-16.7052	-1.2552	-3.7050
32	1.1063	-19.3152	-1.5877	-1.3113

(figura 6.8). Las deformaciones que se presentan en los ejes x y y se presentan debido a un posible cambio de fase después de ese rango.

En la gráfica 6.9, se muestran las rotaciones locales que se presentan en los materiales metálicos al ser expuestos a cambios de temperatura. Por ultimo hay que decir que los datos de las tablas como de las gráficas son un promedio de tres datos obtenidos para cada material y para cada temperatura.

Figura 6.8: Gráfica de Deformación Vs Temperatura de la muestra de Fe-Ni

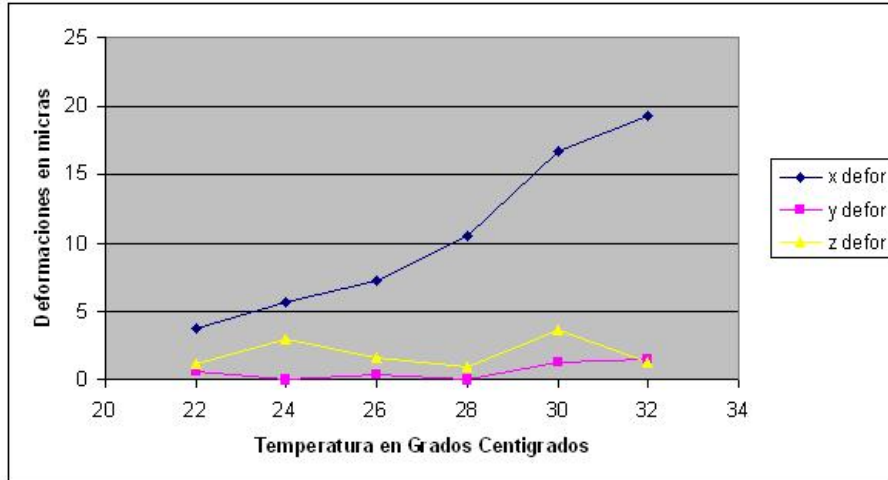
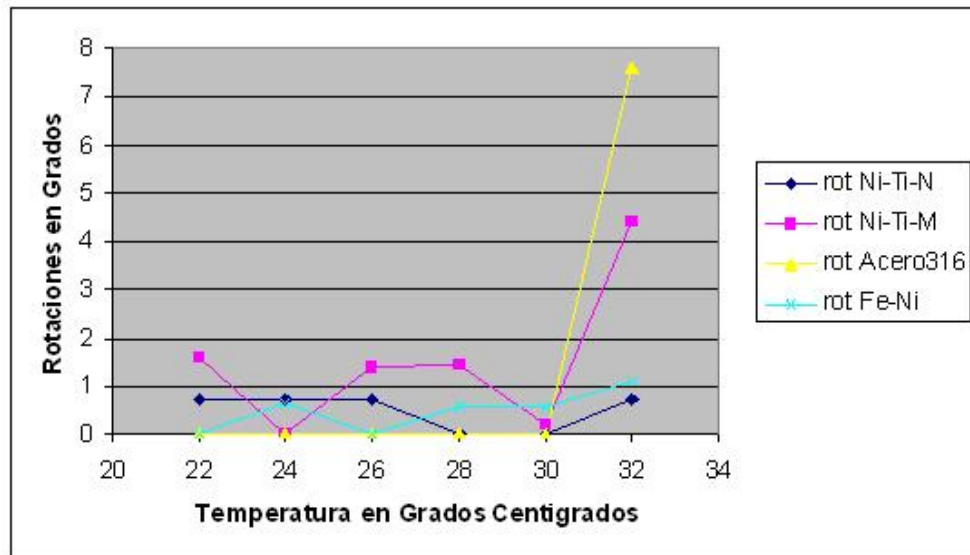


Figura 6.9: Gráfica de Rotaciones Vs Temperatura de las diferentes muestras



CONCLUSIONES

En este trabajo se analizaron las diferentes técnicas como *phase-shifting*, *proyección de Franjas* entre otras, para la reconstrucción tridimensional, dando como resultado que la técnica de detección de máximos es la más idónea. Uno de los inconvenientes en la utilización de la técnica de *phase-shifting* son las discontinuidades que se presentan en el material.

Si se quisiera hacer con iluminación coherente (Laser), debido a la focalización del haz, el objetivo se vería afectado al focalizarse el haz en el espejo de referencia, esto puede producir su deterioro.

Se pudo determinar que los materiales con memoria de forma como el *Ni – Ti*, sufren una deformación en su volumen al ser expuestos a variaciones de temperatura, la cual presenta un comportamiento lineal en función de la temperatura. Es de destacar las variaciones cuando este material fue expuesto a temperaturas entre los $24^{\circ}C$ para el *Nitinol n* y los $28^{\circ}C$ para el *Nitinol m*, no solo presentan deformaciones en las diferentes direcciones, sino el material presenta pequeñas rotaciones, las cuales son debidas a las transformaciones de fase de estos materiales.

En contraste se analizaron materiales como el acero y Fe-Ni, los cuales no presen-

tan rotaciones en su estructura, lo cual era de esperarse ya que estos materiales poseen una temperatura de cambio de fase muy alta. Una evidencia de los cambios producidos por la temperatura es la variación de las deformaciones en la dirección radial, en otras palabras en material se estaba expandiendo. Este efecto también se presenta en el Fe-Ni pero con una pequeña diferencia, este si presentaba deformaciones en las otras direcciones, aunque no presentaba rotaciones.

Se aplico una técnica de *detección de máximos* para obtener la información necesaria y poder determinar las deformaciones en las direcciones x , y y z de las diferentes muestras, dando como resultado las determinación que los cambios de fase Austenita-Martensita de las aleaciones metálicas como el Nitinol; estos si presentan variaciones en el volumen, lo cual es debido al desplazamiento de los átomos en la red cristalina que conforma el material. También es de destacar las variaciones de las temperaturas de cambio de fase de acuerdo al material: En el *Nitinol n* se presentó alrededor de los $24^{\circ}C$, mientras que para la muestra de *Nitinol m* se presentó alrededor de los $28^{\circ}C$.

Una de las herramientas que nos ayudo en la determinación de las deformaciones fue la utilización de la textura que presentan los materiales ya que con su ayuda se pudo determinar las zonas que se escogieron para seguir mientras se les aplicaba temperatura al material. Esto es debido a que esta selección se realizó visualmente, dandonos una idea de la apariencia que presentaba el material al ser observado bajo el microscopio interferométrico.

Este trabajo nos permite aplicar una técnica no invasiva para la caracterización de los materiales metálicos con una alta precisión. Aunque el objetivo principal de este trabajo es hallar las deformaciones que sufren los materiales metálicos, se pudo determinar las rotaciones masivas que se presentan en los materiales al cambiar su fase.

Esto hace que los métodos interferométricos utilizados sean de una gran ayuda para la caracterización de las propiedades físicas de los materiales.

REFERENCIAS

- [1] Eugene Hecht, *OPTICA*, Addison Wesley. 1998, p. 293, p.451
- [2] P. Hariharan, *OPTICAL INTERFEROMETRY*, Second Edicion, Academic Press. 2003, p. 151, p.101, p.143
- [3] M. FRANÇON and S. MALLICK *Polarization interferometers, applications in microscopy and macroscopy*, Wiley-Interscience. 1971, p. 16, p.69
- [4] de la Flor López, Sílvia *Simulación numérica y correlación experimental de las propiedades mecánicas en las aleaciones con memoria de forma.*, Universitat Politècnica de Catalunya. 1971, p. 15, p.21, p.23
- [5] Bruning, J.M., Herriott, D.R., Gallagher, J.W., Rosenfeld, D.P., White, A.D., and Brangaccio, D.J, *Appl. Phys.* **13** 2693 (1974)
- [6] J. C. Wyant, *Appl. Opt* **14** 2622 (1975)
- [7] M. Schaham, *Proc. SPIE* **306** 183 (1982)
- [8] K. D. Stumpf, *Opt. Eng* **18** 648 (1979)
- [9] H. Kubota, *J. Opt Soc Am* **40** 146 (1950)
- [10] H. Kubota, In "Progress in Optic" (E. Wolf, ed), North-Holland, Amsterdam **Vol I** 213 (1961)

-
- [11] V.P. Linnik, C.R. Acad Sci URSS 1 18 (1933)
- [12] Dafne Robayo, Zulma Valderrama. Reconstrucción 3D de objetos discontinuos usando el método de código de gris. Universidad Industrial de Santander. (2003)
- [13] Carlos Ricardo Contreras. DISPOSITIVO ÓPTICO DE MEDIDA 3D CON SIMETRÍA CILINDRICA: APLICACIONES EN BALÍSTICA. Universidad Industrial de Santander.(2007)
- [14] Zayra Perez, Lenny Romero. Sistema óptico de reconstrucción 3D para la detección de ampollas en recubrimientos. Universidad Industrial de Santander.(2004)
- [15] Arturo Plata Gomez. ALGORITHMES DE DÉTECTION DE PHASE DÉDIÉS A L'INTERFÉROMÉTRIE EN LUMIÈRE POLYCHROMATIQUE. UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMTÉ.(1997)
- [16] Carlos Javier Perucho. CARACTERIZACION DE MATERIALES POR REFLECTIVIDAD EN AMPLITUD Y FASE CON MICROSCOPIA INTERFERENCIAL. Universidad Industrial de Santander.(2007)
- [17] R.C. Hibbeler, *MECANICA DE MATERIALES*, Tercera Edición, Editorial Pearson Educación. 1997 p.71
- [18] X.O. Olivella, C.A de Saracíbar Bosch *MECÁNICA DE MEDIOS CONTINUOS PARA INGENIEROS*, Edicions Universitat Politecnica de Catalunya. Alfaomega (2002) p.25