

Capítulo 4

Medida óptica de desplazamientos y deformaciones.

Con la Interferometría holográfica digital vamos a determinar los desplazamientos que sufre la superficie de un objeto opaco. Comparando dos estados, uno indeformado y otro deformado tras la aplicación de las cargas, podemos determinar la diferencia de camino óptico recorrido entre ambos estados por el haz de iluminación en su camino hacia el punto de observación, y a partir de esta diferencia de camino óptico calcular los desplazamientos de cada punto de la superficie. El campo de desplazamientos calculado tendrá precisión de fracciones de longitud de onda del láser, debido a que las medidas del campo de desplazamientos se deducen a partir de la diferencia de fase de los campos electromagnéticos reconstruidos digitalmente de los dos hologramas realizados (uno para la situación indeformada y otro para la deformada) al objeto.

De esta forma, la interferometría holográfica se presenta como una potente herramienta dentro del campo de la metrología, ya que es una técnica rápida, de alta precisión y no presenta limitación en cuanto al tamaño del objeto. El poder aplicar esta técnica para el cálculo de desplazamientos trae consigo la posibilidad de determinar propiedades mecánicas derivadas del campo de desplazamientos. Como hemos dicho, esta técnica no tiene limitaciones en cuanto al tamaño del objeto bajo estudio. Sin embargo, si el objeto es muy grande no tiene mucho sentido que apliquemos esta técnica ya que normalmente para ese tipo de objetos no necesitamos precisión de longitud de onda en el cálculo de los desplazamientos. Es cuando el objeto bajo estudio es de reducidas dimensiones donde esta técnica muestra su mayor potencial, pudiendo determinar propiedades mecánicas de piezas por pequeñas que sean.

En este capítulo expondremos la teoría en la que se basa el cálculo del campo de desplazamientos de los puntos de la superficie de un objeto opaco utilizando técnicas de interferometría holográfica y cómo podemos determinar propiedades mecánicas derivadas de este campo de desplazamientos calculado.

4.1. Variación del camino óptico recorrido.

Con la interferometría holográfica lo que medimos es la diferencia, entre dos estados de deformación del objeto distintos, del camino óptico recorrido por el haz de iluminación en su camino hacia el punto de observación. Esta diferencia de camino óptico recorrido entre los diferentes estados puede ser provocada por una variación en el índice de refracción de los fluidos que atraviesa el haz de iluminación o por los cambios en la geometría de la superficie de un objeto opaco debido a la aplicación de unas cargas.

En interferometría holográfica, las medidas de las deformaciones de las superficies de objetos opacos las calculamos a través de la diferencia de camino óptico recorrido $\delta(P)$ por cada uno de los puntos P de la superficie. Esta, es la diferencia de camino óptico recorrido por el frente de onda, desde el punto de iluminación S hacia el punto P hasta llegar al punto de observación B, entre los dos estados, antes y después de la aplicación de las cargas. La diferencia de camino óptico recorrido por los dos frentes de onda en su camino hasta llegar a B, lleva asociada una diferencia de fase entre las dos ondas incidentes sobre B (ver figura 4.1.). Esta diferencia de fase se puede escribir en la forma:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \delta(P) \quad [88]$$

Esta interferencia de fase es la que podemos observar en el patrón de interferencia que registrábamos, por ejemplo, en la interferometría holográfica de doble exposición:

$$I(P) = 2 I_1(P) \{1 + \cos[\Delta\phi(P)]\} \quad [89]$$

En la Figura 4.1. vemos un montaje holográfico para la medir desplazamientos, en donde la dirección de iluminación es divergente y la dirección de observación convergente, y donde la posición del punto de iluminación es $S = (x_S, y_S, z_S)$ y la posición del punto de observación es $B = (x_B, y_B, z_B)$, en el sistema de coordenadas cartesianas del plano objeto (Figura 3.2.).

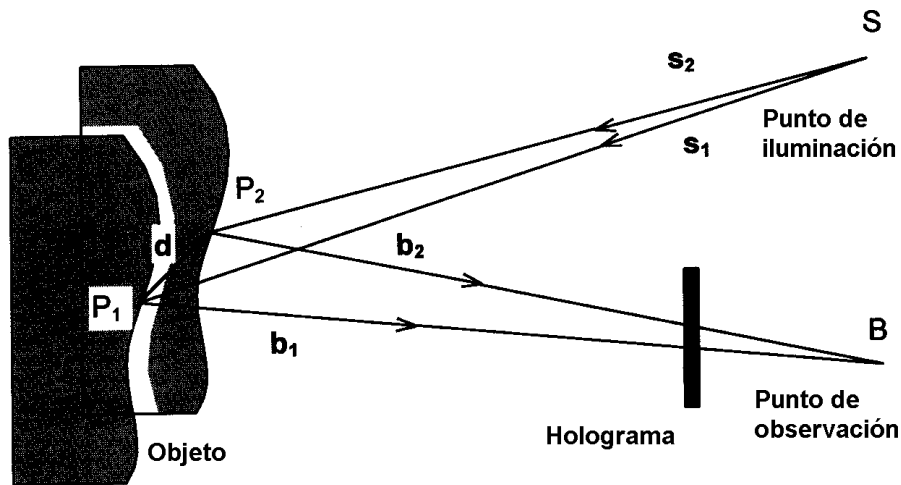


Figura 4. 1 Montaje para la obtención de los desplazamientos de un objeto [4]

Si el objeto se deforma, el punto de la superficie P se mueve desde $P_1 = (x_{P_1}, y_{P_1}, z_{P_1})$ hasta la nueva posición $P_2 = (x_{P_2}, y_{P_2}, z_{P_2})$, de tal forma que podemos definir el vector $\vec{d}(P_1)$ de desplazamiento:

$$\vec{d}(P_1) = (d_x(P_1), d_y(P_1), d_z(P_1)) = P_2 - P_1 \quad [90]$$

Con estas consideraciones el camino óptico recorrido $\delta(P)$ se puede escribir ahora en la forma:

$$\delta(P_1) = \vec{SP}_1 + \vec{P}_1B - (\vec{SP}_2 + \vec{P}_2B) = \vec{s}_1 \cdot \vec{SP}_1 + \vec{b}_1 \cdot \vec{P}_1B - \vec{s}_2 \cdot \vec{SP}_2 - \vec{b}_2 \cdot \vec{P}_2B \quad [91]$$

donde \vec{s}_1 y \vec{s}_2 son los vectores unitarios de iluminación, \vec{b}_1 y \vec{b}_2 son los vectores unitarios de la dirección de observación, y \vec{SP}_i y \vec{P}_iB son los vectores desde S hasta P_i y desde P_i hasta B, respectivamente.

Como hicimos anteriormente para la analizar la forma de interferencia de dos ondas, podemos realizar la misma descomposición para los dos vectores de iluminación, \vec{s}_1 y \vec{s}_2 , y para los dos vectores de observación, \vec{b}_1 y \vec{b}_2 . La descomposición vectorial queda:

$$\vec{s}(P_1, P_2) = \frac{1}{2} [\vec{s}_1(P_1) + \vec{s}_2(P_2)] \quad [92]$$

$$\vec{\Delta s}(P_1, P_2) = \frac{1}{2} [\vec{s}_1(P_1) - \vec{s}_2(P_2)] \quad [93]$$

$$\vec{b}(P_1, P_2) = \frac{1}{2} [\vec{b}_1(P_1) + \vec{b}_2(P_2)] \quad [94]$$

$$\vec{\Delta b}(P_1, P_2) = \frac{1}{2} [\vec{b}_1(P_1) - \vec{b}_2(P_2)] \quad [95]$$

donde $\vec{s}(P_1, P_2)$ es el bisector de los vectores unitarios de iluminación \vec{s}_1 y \vec{s}_2 , $\vec{b}(P_1, P_2)$ es el bisector de los vectores unitarios de observación \vec{b}_1 y \vec{b}_2 , $\vec{\Delta s}(P_1, P_2)$ es la diferencia media de los vectores unitarios de iluminación \vec{s}_1 y \vec{s}_2 , y $\vec{\Delta b}(P_1, P_2)$ es la diferencia media de los vectores unitarios de observación \vec{b}_1 y \vec{b}_2 .

Por definición del vector desplazamiento $\vec{d}(P_1)$ sabemos que:

$$\vec{P_1B} - \vec{P_2B} = \vec{d}(P_1) \quad [96]$$

$$\vec{SP_2} - \vec{SP_1} = \vec{d}(P_1) \quad [97]$$

Sustituyendo estas expresiones en la ecuación de la variación del camino óptico recorrido obtenemos:

$$\begin{aligned} \delta &= (\vec{s} + \overline{\Delta s}) \cdot \overline{SP_1} + (\vec{b} + \overline{\Delta b}) \cdot \overline{P_1B} - (\vec{s} - \overline{\Delta s}) \cdot \overline{SP_2} - (\vec{b} - \overline{\Delta b}) \cdot \overline{P_2B} = \\ &= \vec{b} \cdot \vec{d} - \vec{s} \cdot \vec{d} + \overline{\Delta b} \cdot (\overline{P_1B} + \overline{P_2B}) + \overline{\Delta s} \cdot (\overline{SP_1} + \overline{SP_2}) \end{aligned} \quad [98]$$

Suponemos que estamos bajo la condición de pequeños desplazamientos, ya que el orden de magnitud del desplazamiento del punto P, $|\vec{d}(P)|$, es del orden de un micrometro, mientras que el orden de magnitud de las distancias que separan el punto P del punto de iluminación S y del punto de observación B, $\overline{SP_i}$ y $\overline{P_iB}$, son de un orden de magnitud de metro. Del mismo modo la misma diferencia de ordenes de magnitud existe de comparar el modulo de $\overline{\Delta s}$ y $\overline{\Delta b}$ con el modulo de los vectores \vec{s}_i y \vec{b}_i (son vectores unitarios). Además, el vector $\overline{\Delta s}$ tiene una dirección prácticamente ortogonal al vector $\overline{SP_1} + \overline{SP_2}$ y el vector $\overline{\Delta b}$ es prácticamente ortogonal a $\overline{P_1B} + \overline{P_2B}$, por lo que sus productos escalares son prácticamente cero. Estos productos escalares pueden ser eliminados de la expresión anterior por ser, como acabamos de demostrar, de varios orden de magnitud inferior al resto de los términos. Si los eliminamos, suprimimos la distinción entre los puntos P_1 y P_2 . Combinando todas estas consideraciones la expresión anterior queda como:

$$\delta(P) = \vec{d}(P) \cdot [\vec{b}(P) - \vec{s}(P)] \quad [99]$$

Para el caso de haces de iluminación y observación divergentes, los vectores unitarios $\vec{s}(P)$ y $\vec{b}(P)$ para cada punto P de la superficie, se pueden escribir como:

$$\vec{s}(P) = \begin{pmatrix} s_x(P) \\ s_y(P) \\ s_z(P) \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{(x_P - x_S)^2 + (y_P - y_S)^2 + (z_P - z_S)^2}} \begin{pmatrix} x_P - x_S \\ y_P - y_S \\ z_P - z_S \end{pmatrix} \quad [100]$$

$$\vec{b}(P) = \begin{pmatrix} b_x(P) \\ b_y(P) \\ b_z(P) \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{(x_B - x_P)^2 + (y_B - y_P)^2 + (z_B - z_P)^2}} \begin{pmatrix} x_B - x_P \\ y_B - y_P \\ z_B - z_P \end{pmatrix} \quad [101]$$

Utilizando estos dos vectores junto con el factor $2\pi/\lambda$ podemos definir un vector que llamaremos vector de sensibilidad $\vec{e}(P)$ y se escribe en la forma:

$$\vec{e}(P) = \frac{2\pi}{\lambda} [\vec{b}(P) - \vec{s}(P)] \quad [102]$$

Combinando este vector, con la expresión que relaciona el camino óptico recorrido con la interferencia de fase que escribimos al principio del capítulo, obtenemos la siguiente expresión:

$$\Delta\phi(P) = \vec{d}(P) \cdot \vec{e}(P) \quad [103]$$

Esto significa que la interferencia de fase en cada punto está dada por el producto escalar del vector desplazamiento y el vector de sensibilidad. El vector de sensibilidad viene definido solo por la geometría del montaje holográfico. $\vec{e}(P)$ indica las direcciones de los desplazamientos en las que el montaje tiene máxima sensibilidad. En cada punto medimos la proyección del vector desplazamiento sobre el vector de sensibilidad. Para desplazamientos ortogonales al vector de sensibilidad la interferencia de fase resultante es siempre cero, independientemente de la magnitud del desplazamiento.

La expresión [103] es la base del cálculo de medidas cuantitativas de la deformación de cuerpos opacos utilizando técnicas de interferometría holográfica. A partir de ella iniciaremos un estudio para optimizar el montaje y los cálculos a realizar y así obtener el campo de desplazamientos de todos los puntos de un objeto dado.

4.2. Vector de sensibilidad.

Hemos explicado la forma en la que un campo de desplazamientos produce una distribución de interferencia de fase, en función de un vector llamado vector de sensibilidad:

$$\Delta\phi(P) = \vec{d}(P) \cdot \vec{e}(P) \quad [104]$$

ahora vamos a realizar un estudio pormenorizado de la naturaleza del vector de sensibilidad.

Como anteriormente habíamos formulado, el vector de sensibilidad se define como:

$$\vec{e}(P) = \frac{2\pi}{\lambda} [\vec{b}(P) - \vec{s}(P)] \quad [105]$$

donde $\vec{b}(P)$ es el vector unitario dirección de observación, $\vec{s}(P)$ es el vector unitario dirección de iluminación y λ es la longitud de onda del láser con el que se ha hecho el experimento.

Como hemos visto, para desplazamientos de igual módulo, aquellos desplazamientos que tienen su dirección según la dirección del vector de sensibilidad producen una interferencia de fase mayor. El vector de sensibilidad tiene por tanto, la dirección de los desplazamientos que provocarían una mayor interferencia de fase, es decir, el vector de sensibilidad tiene la dirección en la que el montaje muestra una mayor sensibilidad a la hora de registrar franjas de interferencia provocadas por los desplazamientos de los puntos del objeto.

El vector de sensibilidad solo depende de la geometría del montaje óptico con el que se han hecho los hologramas y de la geometría del objeto. El vector de iluminación y el vector de observación vienen definidos por la posición relativa de los puntos P del

objeto con respecto al punto de iluminación S y al punto de observación B, respectivamente.

Para entender mejor la naturaleza del vector de sensibilidad, supongamos una configuración como la de la Figura 4.2., en la que tenemos un punto S desde donde se emite un frente de onda de longitud de onda λ que se refleja en un objeto, que es observado desde el punto B. Si nos fijamos en un punto P del objeto vemos que su vector de sensibilidad es $\vec{e}(P)$.

Dados el punto de iluminación S y el punto de observación B, tenemos que el lugar geométrico de los puntos del espacio que cumplen que el camino óptico recorrido desde S hasta B es $\delta_i = \text{const}$ es un elipsoide cuyos focos son los puntos S y B.

De esta forma, en la Figura 4.2. tenemos dibujados una serie de elipsoides de la misma familia, es decir, cuyos focos son S y B, y cada una de las elipsoides corresponde a un camino óptico recorrido distinto. Se podrían haber representado tantos elipsoides como caminos ópticos recorridos distintos, sin embargo, se han mostrado sólo unos pocos que cumplen que, de un elipsoide i al adyacente $i+1$ hay una diferencia de camino óptico recorrido de una longitud de onda $\delta_{i+1} = \delta_i + \lambda$.

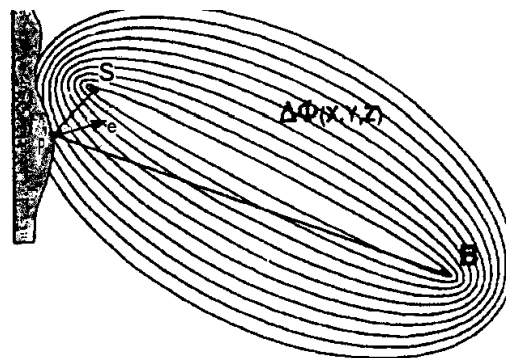


Figura 4. 2 *Elipsoides cuyos puntos son de igual camino óptico recorrido de S a B [8]*

Ahora, ya estamos en disposición de explicar el sentido físico del vector de sensibilidad. El vector de sensibilidad es un vector normal a la superficie de los

elipsoides, de tal forma que un desplazamiento según la dirección del vector de sensibilidad provocaría una mayor variación del camino óptico recorrido, es decir, provocaría un mayor número de franjas de interferencia, debido a que el punto en su desplazamiento atravesaría un mayor número de elipsoides. Si el desplazamiento del punto P lo lleva hasta el elipsoide adyacente el desplazamiento se traduce en una variación del camino óptico recorrido de una longitud de onda y llevará consigo la aparición de una franja en el interferencia. Por el contrario, si el desplazamiento es normal al vector de sensibilidad, se corresponde con un desplazamiento del punto P sobre el elipsoide al que pertenece, y no produciría interferencia de fase ya que no varía el camino óptico recorrido por el haz, desde S hasta B.

Vemos que en la Figura 4.2. hemos representado el vector de sensibilidad de un punto P del objeto arbitrario. Este vector es perpendicular a la superficie del elipsoide al que pertenece, es decir, en el punto P de la superficie del elipsoide que intersecciona con el objeto, el vector de sensibilidad sigue la dirección de la normal a la superficie del elipsoide en ese punto. Para cada punto del objeto, podemos determinar su intersección con el elipsoide al que pertenece, y determinar la dirección de la normal. Así obtendríamos el conjunto de todos los vectores de sensibilidad del objeto $\vec{e}(P)$.

Para poder realizar las operaciones anteriormente explicadas, necesitamos conocer la geometría del montaje y, también, la geometría del objeto. Como necesitamos conocer las posiciones de los puntos P del objeto para calcular los vectores $\vec{s}(P)$ y $\vec{b}(P)$, el cálculo de los vectores de sensibilidad se complica, ya que es fuertemente dependiente de la geometría del objeto que, en principio, es desconocida para nosotros.

La determinación de los vectores de sensibilidad se puede afrontar de distintas formas. A continuación vamos a realizar un estudio de las distintas posibilidades de que disponemos a la hora de realizar el montaje óptico del experimento.

Como indicamos anteriormente, el vector de sensibilidad depende de los vectores unitarios de iluminación $\vec{s}(P)$ y de observación $\vec{b}(P)$ del punto P . Si el haz de iluminación y el haz de observación son colimados, es decir, asumimos que los puntos de iluminación S y de observación B están situados en punto focal de lentes colimadas (Figura 4.3.), entonces los vectores unitarios $\vec{s}(P)$ y $\vec{b}(P)$ son constantes para todo punto P del objeto, y por tanto los vectores de sensibilidad de todos los puntos del objeto son idénticos o lo que es lo mismo, el vector de sensibilidad es constante a lo largo de toda la superficie del objeto $\vec{e} = const.$

Si por el contrario, al menos uno de los haces, el de iluminación o el de observación, no es colimado, es decir, es divergente (ver Figura 4.4.), entonces los vectores de sensibilidad varían a lo largo de la superficie del objeto. Solo si ambos haces son colimados obtenemos vectores de sensibilidad constantes a lo largo de la superficie del objeto.

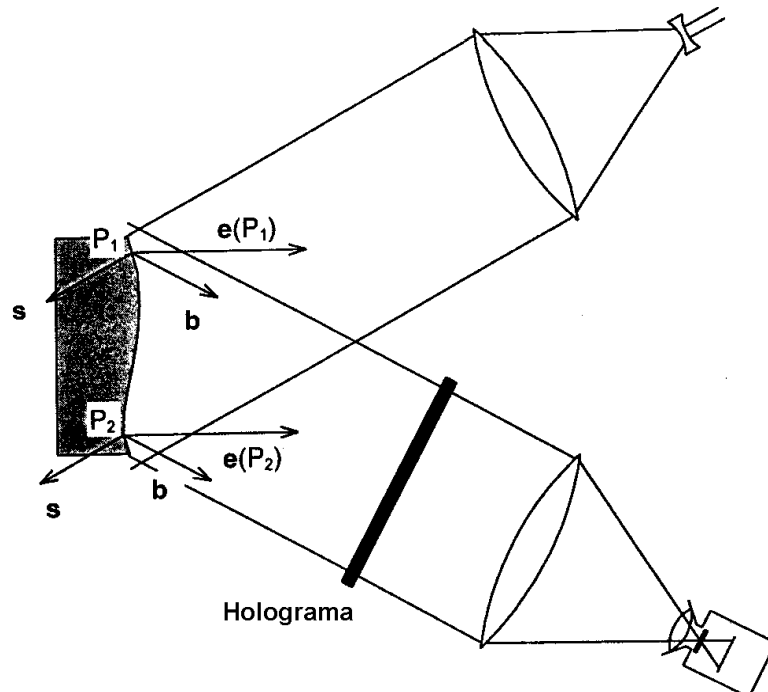


Figura 4. 3 Montaje con vector de sensibilidad constante [4]

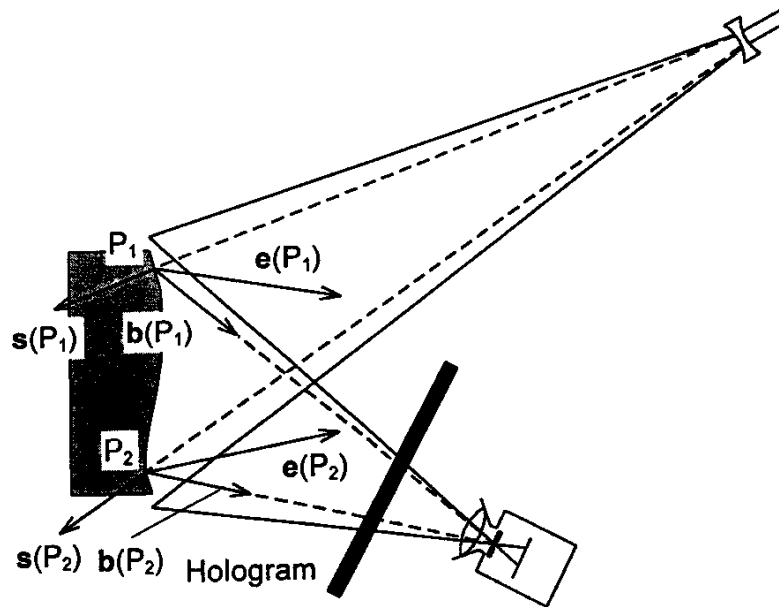


Figura 4. 4 Montaje con vector de sensibilidad variable [4]

Como se puede ver, en la Figura 4.3. tanto el haz de iluminación como el de observación son colimados, por lo que el vector de sensibilidad es constante para todos los puntos de la superficie del objeto $\vec{e}(P_1) = \vec{e}(P_2)$. En la Figura 4.4. el haz de iluminación y el haz de observación son divergentes por lo que el vector de sensibilidad varía a lo largo de la superficie del objeto. Hubiese bastado con que uno de los dos haces fuese divergente para que el vector de sensibilidad no fuese constante para todo punto del objeto.

Si estudiamos la interferencia de fase a lo largo de, por ejemplo, la dirección del eje x del interferograma, obtenemos:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \Delta\phi &= \frac{\partial}{\partial x} [d_x \cdot e_x + d_y \cdot e_y + d_z \cdot e_z] = \\ &= \frac{\partial d_x}{\partial x} e_x + d_x \frac{\partial e_x}{\partial x} + \frac{\partial d_y}{\partial x} e_y + d_y \frac{\partial e_y}{\partial x} + \frac{\partial d_z}{\partial x} e_z + d_z \frac{\partial e_z}{\partial x} \end{aligned} \quad [106]$$

Podemos ver como el cambio en la interferencia de fase puede ser provocado tanto por una variación en el vector de desplazamientos como por una variación del

vector de sensibilidad. Para el caso de vector de sensibilidad constante la interferencia de fase solo depende de la variación del vector de desplazamiento.

Desde un punto de vista teórico, el empleo de un montaje con vector de sensibilidad variable solo está justificado en el caso de querer estudiar desplazamientos del objeto como sólido rígido, para así obtener franjas de interferencia. En todos los casos restantes, tanto deformaciones como giros, es más fácil evaluarlos empleando un montaje que tenga vectores de sensibilidad constantes.

El empleo de vectores de sensibilidad constantes no siempre es posible, ya que el área abarcada por el haz de iluminación está limitada por las dimensiones de la lente que colima el haz de iluminación, por lo que, en muchas ocasiones, para poder emplear vectores de sensibilidad constantes, nos tenemos que conformar con estudiar objetos de reducido tamaño o zonas concretas de un objeto mayor. Sin embargo, si los puntos de iluminación y de observación están lo suficientemente alejados del objeto, comparado con las dimensiones de la superficie bajo estudio, podemos asumir que estamos en el caso de vectores de sensibilidad constantes.

Mediante la optimización del montaje óptico podemos reducir la complejidad del problema del cálculo de los desplazamientos. En muchos problemas, dentro del campo de la metrología, tenemos a nuestra disposición información previa de las magnitudes a medir, como por ejemplo, las direcciones de las deformaciones esperadas en un objeto bajo unas cargas determinadas. Es conveniente configurar el montaje holográfico para obtener máxima sensibilidad en las direcciones esperadas del campo de desplazamientos y si es posible, mínima sensibilidad en las posibles direcciones de las distorsiones. Así, en el caso de conocer anticipadamente la dirección de los desplazamientos podemos realizar el montaje holográfico de tal forma que dichos desplazamientos esperados sean perpendiculares a los elipsoides generados con focos en S y B, es decir, que coincida con la dirección de los vectores de sensibilidad.

En ningún caso, el montaje final puede realizarse de tal forma que zonas del objeto bajo estudio queden en sombra ni desde el punto de vista de la iluminación ni desde el punto de vista de la observación.

Cuando los haces de iluminación y de observación son colimados los que ocurre es que los puntos S y B (Figura 4.3.) se comportan como si estuviesen en el infinito, por lo que los elipsoides que generan desde el infinito llegan al objeto como planos paralelos, con el mismo vector normal, por lo que el vector de sensibilidad es constante para todos los puntos del objeto.

Hasta ahora hemos hecho un análisis de la conveniencia o no del empleo de un montaje con vector de sensibilidad constante. Una cuestión determinante a la hora de elegir vectores de sensibilidad variables o constantes es el conocimiento de la geometría del objeto. Si estamos en el caso de un montaje holográfico con vector de sensibilidad variable y la geometría del objeto es conocida, podemos realizar cálculos para obtener los vectores de sensibilidad en función de la posición relativa de los puntos P del objeto y la posición de los puntos de iluminación S y de observación B. Si por el contrario, desconocemos la geometría del objeto, no podemos determinar de forma directa los vectores $\vec{s}(P)$ y $\vec{b}(P)$, y por tanto, tampoco tenemos acceso a los vectores de sensibilidad.

Ahora, tenemos el problema de la determinación de los vectores de sensibilidad cuando la geometría es desconocida y los vectores son variables. Se pueden hacer operaciones para calcularlos, como por ejemplo, provocar en el objeto una combinación de desplazamientos como sólido rígido conocidos y a partir de los interferogramas generados determinar el conjunto de los vectores de sensibilidad. Esto, aunque es una solución válida, complica las operaciones a realizar y obliga a realizar una serie de hologramas previos a los hologramas necesarios para el cálculo de los desplazamientos, por lo que aumentamos el consumo de tiempo y recursos.

Si por el contrario, empleamos un montaje con vectores de sensibilidad constantes, estos vectores son independientes de la geometría del objeto ya que solo dependen de la dirección de los haces colimados de iluminación y observación, obteniendo de forma directa y con un solo cálculo el vector de sensibilidad de todos los puntos del objeto, sin necesidad de realizar ningún holograma ni operación previa. En el caso de emplear vectores de sensibilidad constantes el que la geometría del objeto sea conocida o no es un dato irrelevante.

En resumen, siempre que sea posible, utilizaremos un montaje con vectores de sensibilidad constante, ya que proporciona la misma precisión y facilita considerablemente las operaciones a realizar.

4.3. Cálculo de desplazamientos.

El cálculo de la distribución de interferencia de fase mediante las técnicas convencionales o mediante el empleo de la holografía digital no es normalmente el objetivo final de nuestros estudios, sino sólo un paso intermedio en la determinación de medidas cuantitativas de parámetros físicos de interés: componentes del campo de vectores desplazamiento, deformaciones, tensiones, amplitud de vibraciones, contornos, índices de refracción, etc... Nos concentraremos en el tratamiento teórico de la distribución de interferencia de fase para el cálculo de los desplazamientos de los puntos de un objeto sometido a un determinado conjunto de solicitaciones.

El problema consiste en determinar el campo de desplazamientos de los puntos de la superficie a partir de la geometría del montaje y de la distribución de fase obtenida de aplicar técnicas de Interferometría holográfica.

Para poder determinar las componentes del campo de desplazamientos a partir de una distribución de interferencia de fase debemos hacer previamente una serie de

suposiciones para la correcta evaluación de los cálculos. En primer lugar debemos asumir que el campo de desplazamientos que queremos calcular sigue una variación continua, al menos en la zona en las que calculamos su interferograma, y en segundo lugar, que podemos solventar los problemas de la ambigüedad de signo de los desplazamientos. Haciendo estas suposiciones, de lo que nos aseguramos es de que podemos realizar el recuento de franjas en el interferograma de forma continua a lo largo de un camino continuo trazado sobre el interferograma. En la mayor parte de las ocasiones, estas consideraciones son tenidas en cuenta previamente durante el procesado del interferograma para la obtención de la distribución de fase, afrontando el problema de la ambigüedad del signo y el problema de la fase absoluta. Si el procesado del interferograma se ha realizado correctamente, el problema de la ambigüedad en el signo supondremos que ha sido solventado correctamente. Si el experimento se ha realizado utilizando técnicas de interferometría holográfica digital tenemos la certeza de haber solventado el problema de la ambigüedad en el signo en el cálculo de la distribución de interferencia de fase. Sin embargo el problema de la fase absoluta queda pendiente de ser resuelto si queremos calcular el campo de desplazamientos correctamente.

Hay multitud de aplicaciones en las que conocemos el desplazamiento de un punto de referencia en el interferograma, por lo que en ese punto podemos calcular la fase absoluta. Por esta razón vamos a hacer diferentes tratamientos teóricos según dispongamos o no de un punto de referencia. Otros aspectos determinantes a la hora de realizar el cálculo de los desplazamientos es si el campo de desplazamientos a calcular es monodimensional o tridimensional, o si el montaje es con vector de sensibilidad constante o variable. Todos estos aspectos serán analizados detalladamente a continuación.

Si disponemos del desplazamiento de un punto de referencia podemos emplearlo para eliminar el problema de fase absoluta. Así, si por ejemplo estamos interesados en las tres componentes del campo vectorial de desplazamientos tenemos que resolver un sistema de ecuaciones completo. Para poder calcular este campo de desplazamientos

tenemos la necesidad de obtener tres interferogramas de tres conjuntos de vectores de sensibilidad distintos.

I) Cálculo del campo de desplazamientos absolutos.

Entendemos como campo de desplazamientos absoluto como aquel que nos proporciona el desplazamiento real de punto del objeto. Es decir, que el campo de desplazamientos $\vec{d}(P)$ calculado representa físicamente el desplazamiento que sufre desde la posición en la situación inicial hasta su posicionamiento final tras la aplicación de las cargas.

Si estamos interesados en el campo de desplazamientos absoluto necesitamos tener un punto de referencia de desplazamiento conocido. Si suponemos que a partir del interferograma hemos resuelto correctamente el cálculo de la distribución de interferencia de fase $\Delta\phi(P)$ sin ambigüedad en el signo podemos asegurar que la diferencia de fase entre dos puntos del interferograma se puede calcular como sustracción de las fases calculadas $\Delta\phi(P_2) - \Delta\phi(P_1)$. Sin embargo, aunque la diferencia de fase entre ambos puntos es correcta, la fase de cada punto no tiene porque ser la fase absoluta provocada por la diferencia de camino óptico inducida por el desplazamiento. En definitiva, la interferencia de fase calculada no es mas que la diferencia de fase relativa entre puntos del interferograma, y no la fase absoluta de cada punto. El punto de referencia lo emplearemos para calcular la fase absoluta de cada punto. Si conocemos los vectores de sensibilidad y el desplazamiento del punto de referencia podemos hacer algún tipo de inversión (más tarde se explicará detalladamente la forma de inversión) de la ecuación $\Delta\phi_{abs}(P_0) = \vec{d}(P_0) \cdot \vec{e}(P_0)$ y así obtener la fase absoluta del punto de referencia. Una vez obtenida la fase absoluta en ese punto podemos trazar caminos continuos de punto a punto del interferograma para así calcular la fase absoluta en cada uno de los puntos del interferograma, esta operación se formula así:

$$\Delta\phi_{abs}(P) = \Delta\phi_{abs}(P_0) + \Delta\phi(P) - \Delta\phi(P_0) = \Delta\phi_{abs}(P_0) + \Delta\phi_{rel}(P_0 \rightarrow P) \quad [107]$$

Una vez que tenemos calculado la fase absoluta en cada punto del interferograma estamos en disposición de calcular el campo de desplazamiento total de los puntos de la superficie del objeto.

A continuación haremos dos tratamientos distintos, dependiendo de si estamos interesados en el cálculo de las tres componentes de los vectores del campo de desplazamientos de cada punto del objeto, en cuyo caso diremos que el campo a calcular es tridimensional, o si sólo estamos interesados en una componente del campo vectorial de desplazamientos, en cuyo caso diremos que el cálculo es monodimensional.

Consideremos el caso más sencillo de cálculo monodimensional, consistente en el cálculo de la componente z del campo de desplazamiento. Si empleamos un montaje que tenga vector de sensibilidad constante y cuya única componente no nula sea la normal ($e_x = 0, e_y = 0$) entonces la componente normal del campo de desplazamientos $\vec{d}_z(P)$ se calcula como:

$$d_z(P) = \frac{\Delta\phi_{abs}(P)}{e_z(P)} \quad [108]$$

Si el montaje empleado tiene vector de sensibilidad variable, esta ecuación sólo es válida si tenemos la certeza de que $\vec{d}_x(P) = 0, \vec{d}_y(P) = 0$ para todos los puntos P, para que así el producto escalar pueda ser escrito sólo en función de la componente normal. Por esta razón consideramos conveniente el empleo de un montaje con vector de sensibilidad constante y con solo la componente normal no nula.

Si estamos interesados en todo el campo vectorial de desplazamientos de los puntos de la superficie necesitamos resolver el sistema de ecuaciones tridimensional completo definido en la ecuación $\Delta\phi(P) = \vec{d}(P) \cdot \vec{e}(P)$. Necesitamos obtener tres interferogramas según tres direcciones de iluminación distintas y con la misma dirección de observación. Los interferogramas se obtienen sobre los mismos puntos P del objeto y bajo el mismo campo de desplazamiento, solo que se realizan con distintos

vectores de sensibilidad. Así, para cada punto P obtenemos las distribuciones de fase $\Delta\phi_1(P)$, $\Delta\phi_2(P)$ y $\Delta\phi_3(P)$ según los vectores de sensibilidad $\vec{e}^1(P)$, $\vec{e}^2(P)$ y $\vec{e}^3(P)$ respectivamente, como consecuencia del mismo campo de desplazamientos. Como mencionamos anteriormente, el realizar los interferogramas con la misma dirección de observación permite una fácil identificación de los píxeles en cada patrón, pero requiere que el estado de carga bajo el que se encuentra el objeto sea estable, para poder realizar múltiples registros sobre el mismo estado de deformación.

La estabilidad del estado de carga no siempre es posible, como es el caso de cargas térmicas. En estos casos necesitamos recurrir al empleo de diferentes direcciones de observación para la obtención de los interferogramas. Estos interferogramas deberán ser procesados posteriormente para eliminar las distorsiones producidas por las diferentes perspectivas.

Es importante resaltar que la terna de vectores formada por $\vec{e}^1(P)$, $\vec{e}^2(P)$ y $\vec{e}^3(P)$ debe formar base en cada punto P. Si no forma base no podremos calcular el campo de desplazamientos ya que perderemos el carácter tridimensional de los cálculos.

De esta forma, siendo $\vec{e}^1(P)$, $\vec{e}^2(P)$ y $\vec{e}^3(P)$ los vectores de sensibilidad que forman base en el punto P, podemos resolver para cada punto P el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{pmatrix} \Delta\phi^1(P) \\ \Delta\phi^2(P) \\ \Delta\phi^3(P) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e_x^1(P) & e_y^1(P) & e_z^1(P) \\ e_x^2(P) & e_y^2(P) & e_z^2(P) \\ e_x^3(P) & e_y^3(P) & e_z^3(P) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} d_x(P) \\ d_y(P) \\ d_z(P) \end{pmatrix} \quad [109]$$

y así obtenemos el vector de desplazamientos $\vec{d}(P)$. Esta ecuación puede ser escrita también en forma vectorial, de tal forma que:

$$\Delta\vec{\phi}(P) = G(P) \cdot \vec{d}(P) \quad [110]$$

donde $G(P)$ es la matriz de sensibilidad:

$$G(P) = \begin{pmatrix} e_x^1(P) & e_y^1(P) & e_z^1(P) \\ e_x^2(P) & e_y^2(P) & e_z^2(P) \\ e_x^3(P) & e_y^2(P) & e_z^3(P) \end{pmatrix} \quad [111]$$

Si disponemos del desplazamiento del punto de referencia $\vec{d}(P_0)$ es el momento de utilizarlo para obtener la fase absoluta de todos los puntos del interferograma. En primer lugar obtenemos la fase absoluta del punto de referencia mediante:

$$\begin{pmatrix} \Delta\phi_{abs}^1(P_0) \\ \Delta\phi_{abs}^2(P_0) \\ \Delta\phi_{abs}^3(P_0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e_x^1(P_0) & e_y^1(P_0) & e_z^1(P_0) \\ e_x^2(P_0) & e_y^2(P_0) & e_z^2(P_0) \\ e_x^3(P_0) & e_y^2(P_0) & e_z^3(P_0) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} d_x(P_0) \\ d_y(P_0) \\ d_z(P_0) \end{pmatrix} \quad [112]$$

Una vez que tenemos la fase absoluta en el punto de referencia, podemos trazar caminos continuos entre puntos del interferograma para obtener la fase absoluta de todos los puntos:

$$\Delta\phi_{abs}^1(P) = \Delta\phi_{abs}^1(P_0) + \Delta\phi^1(P) - \Delta\phi^1(P_0) = \Delta\phi_{abs}^1(P_0) + \Delta\phi_{rel}^1(P \rightarrow P_0) \quad [113]$$

$$\Delta\phi_{abs}^2(P) = \Delta\phi_{abs}^2(P_0) + \Delta\phi^2(P) - \Delta\phi^2(P_0) = \Delta\phi_{abs}^2(P_0) + \Delta\phi_{rel}^2(P \rightarrow P_0) \quad [114]$$

$$\Delta\phi_{abs}^3(P) = \Delta\phi_{abs}^3(P_0) + \Delta\phi^3(P) - \Delta\phi^3(P_0) = \Delta\phi_{abs}^3(P_0) + \Delta\phi_{rel}^3(P \rightarrow P_0) \quad [115]$$

Con la fase absoluta calculada en cada uno de los puntos P del interferograma para cada una de las tres direcciones de iluminación ya podemos calcular el campo de desplazamientos de los puntos P del objeto mediante:

$$\vec{d}(P) = G^{-1}(P) \cdot \Delta\vec{\phi}_{abs}(P) \quad [116]$$

Aquí vemos que si los vectores $\vec{e}^1(P)$, $\vec{e}^2(P)$ y $\vec{e}^3(P)$ no forman base la inversa de la matriz G no existe, imposibilitando el cálculo de los desplazamientos.

También podemos realizar estos cálculos si realizamos más de tres registros holográficos, empleando más de tres vectores de sensibilidad. Entonces obtendríamos los correspondientes distribuciones de interferencia de fase $\Delta\phi^1(P), \dots, \Delta\phi^n(P)$ y la solución la obtendríamos de:

$$\vec{d}(P) = (G^T(P) \cdot G(P))^{-1} \cdot (G^T(P) \cdot \Delta\vec{\phi}(P)) \quad [117]$$

Por último, solo nos queda comentar la conveniencia o no de emplear vectores de sensibilidad constantes. Desde un punto de vista teórico no hay ningún inconveniente en que los vectores de sensibilidad sean variables. Sin embargo, haciendo que los vectores de sensibilidad sean constantes nos ahorramos mucho tiempo de cálculo, ya que la matriz de sensibilidad es constante para todos los puntos del objeto, por lo que solo hay que calcularla una vez. Además, haciendo los vectores de sensibilidad constantes podemos asegurarnos de que forman base, o lo que es lo mismo, la matriz de sensibilidad es no singular. Si por el contrario son variables, podría suceder que, por un descuido o error de previsión, en un punto determinado del objeto los vectores de sensibilidad no formaran base, y entonces el desplazamiento en ese punto provocaría un error en el proceso de cálculo. Por todo esto, siempre que sea posible, es conveniente el empleo de vectores de sensibilidad constantes.

II) Cálculo del campo de desplazamientos relativo.

Entendemos por campo de desplazamientos relativo como aquel que una vez calculado sólo nos proporciona información del desplazamiento relativo entre dos puntos del interferograma, pero nada acerca de la cuantía total del desplazamiento en cada punto, sólo la diferencia entre puntos.

Este campo de desplazamiento relativo solo se calcula en el caso de no disponer de un punto de referencia de desplazamiento conocido. Si dispusiésemos de un punto de referencia no supondría ningún esfuerzo adicional calcular el campo de desplazamientos absoluto, del que se puede calcular el relativo. Nos tendremos que referir a este tratamiento teórico cuando no dispongamos del desplazamiento de un punto de referencia.

Al no disponer de un punto de referencia no podemos obtener la distribución de interferencia de fase absoluta y el problema de fase absoluta no podrá ser resuelto. Tendremos que trabajar con la distribución de interferencia de fase $\Delta\phi(P)$ que supondremos ha solventado correctamente el problema del signo de la interferencia.

Ahora el empleo o no de vectores de sensibilidad constantes cobra una importancia determinante. La variación de la interferencia de fase entre puntos del interferograma, en el caso de vector de sensibilidad variable, no solo depende de la variación de los vectores desplazamientos sino también de la propia variación de los vectores de sensibilidad. Por eso debemos siempre emplear vectores de sensibilidad constantes, ya que sino la interferencia de fase calculada no está solo inducida por el campo de desplazamientos que queremos calcular.

Así, para el cálculo de los desplazamientos sin ningún punto de referencia de desplazamiento conocido debemos asumir que los haremos con vector de sensibilidad constante a lo largo de toda la superficie del objeto. La distribución de fase calculada será igual a:

$$\Delta\phi(P) = d(P) \cdot e(P) + \phi_0(P) \quad [118]$$

donde $\phi_0(P)$ es una constante desconocida. Si tomamos un punto del objeto como punto de referencia P_0 , podemos evaluar la fase desde ese punto hasta otro punto P_1 mediante:

$$\Delta'\phi(P) = \Delta\phi(P_1) - \Delta\phi(P_0) = [d(P_1) - d(P_0)] \cdot e(P_1) = \Delta d(P_1) \cdot e(P_1) \quad [119]$$

Ahora podemos proceder de la misma forma que lo hicimos en el caso anterior, evaluando el campo de desplazamientos a partir de la distribución de interferencia de fase y el vector de sensibilidad, solo que en este caso el campo de desplazamientos que calculamos no es absoluto, sino solo el relativo con referencia al desplazamiento del punto P_0 .

Si ahora relajamos la condición de vector de sensibilidad constante contemplando una variación de este entre punto y punto del objeto podemos escribir entonces que el vector de sensibilidad en el punto P_1 es $\vec{e}(P_1) = \vec{e}(P_0) + \overline{\Delta e}(P_1)$. Entonces la distribución de interferencia de fase relativa entre los puntos P_0 y P_1 equivale a:

$$\begin{aligned} \Delta' \phi(P_1) &= \vec{d}(P_1) \cdot \vec{e}(P_1) - \vec{d}(P_0) \cdot \vec{e}(P_0) = \\ &= \vec{d}(P_1) \cdot [\vec{e}(P_0) + \overline{\Delta e}(P_1)] - \vec{d}(P_0) \cdot [\vec{e}(P_0) + \overline{\Delta e}(P_1)] + \vec{d}(P_0) \cdot \overline{\Delta e}(P_1) = \\ &= \overline{\Delta d}(P_1) \cdot \vec{e}(P_1) - \vec{d}(P_0) \cdot \overline{\Delta e}(P_1) \end{aligned} \quad [120]$$

Ahora vemos que en la expresión aparece el desplazamiento total $\vec{d}(P_0)$ del punto de referencia adoptado P_0 , que es desconocido. Al aparecer este término $\vec{d}(P_0)$ tenemos más incógnitas que ecuaciones, por lo que el cálculo de los desplazamientos relativos está fuera de nuestro alcance. Como vimos anteriormente, si el vector de sensibilidad es constante para todos los puntos del objeto, entonces $\overline{\Delta e}(P_1) = 0$, y el término $\vec{d}(P_0) \cdot \overline{\Delta e}(P_1)$ no aparece en la expresión de la interferencia de fase relativa, lo que permite el cálculo de los desplazamientos relativos.

Así, en el cálculo de los desplazamientos relativos, es decir, cuando no tenemos a nuestra disposición el desplazamiento de un punto de referencia, es imprescindible el uso de un montaje con vector de sensibilidad constante

Para visualizar de una forma mas clara la importancia que tiene el empleo de vectores de sensibilidad constante, cuando desconocemos la fase absoluta de la interferencia de fase, vamos a analizar una viga de 100 mm de largo en voladizo, empotrada en su extremo izquierdo, y con el extremo opuesto sometida a una carga que le provoca una deflexión.

En la Figura 4.5.a. vemos, en la curva 1, como varía el desplazamiento z a lo largo del eje x de la viga, $d_z(x)$. Según el montaje del experimento, con el punto de iluminación en $S=(-200,0,250)$ mm y el punto de observación en $B=(50,0,250)$ mm, la componente z del vector de sensibilidad varía a lo largo de la viga. Esta variación esta representada en la Figura 4.5.b. Las coordenadas de un punto P genérico de la viga son $P=(x,0,0)$, con x variando entre $x=0$ mm y $x=100$ mm. La longitud de onda empleada es de 514.5 nm. El interferograma que obtenemos como resultado del experimento lo podemos observar en la Figura 4.5.d.

La distribución de interferencia de fase a lo largo de la viga la tenemos representada en la curva 1 de la Figura 4.5.c. Esta distribución de interferencia de fase ha sido calculada sabiendo que la viga en el extremo izquierdo esta empotrada, es decir, en ese extremo el desplazamiento es nulo y por tanto la franja en el extremo izquierdo es de orden cero. Los desplazamientos que obtenemos $d_z(x)$ con esta distribución de interferencia de fase podemos verlos en la curva 1 de la Figura 4.5.a.

Si no utilizamos un punto de referencia para actualizar los cálculos, la distribución de fase obtenida a partir del procesado del interferograma tendrá un error de fase absoluta. Por ejemplo, supongamos que la distribución obtenida difiere de la correcta en una diferencia de fase absoluta de 32π . Esta distribución de interferencia de fase la podemos ver representada en la curva 2 de la Figura 4.3.c. A partir de esta distribución de fase, con error en la fase absoluta, podemos calcular los desplazamientos asociados y posteriormente hacer coincidir el extremo izquierdo de la viga con la condición de desplazamiento nulo, desplazando la curva hasta que cumpla que

$d_z(x=0)=0$. Así, obtenemos el campo de desplazamiento que se representa en la curva 2 de la Figura 4.5.a.

Ahora podemos ver en la Figura 4.5.a. la diferencia entre los desplazamientos calculados a partir de una distribución de fase con y sin error en la fase absoluta cuando tenemos un montaje con vectores de sensibilidad variable. Vemos que la curva 2 (calculada con error en la fase absoluta) tras desplazarla para que cumpla $d_z(x=0)=0$, no coincide con la curva 1 (calculada con la distribución de interferencia de fase correcta), por lo que, si utilizamos un montaje con vectores de sensibilidad variable, el campo de desplazamiento relativo calculado a partir de la distribución de fase con error en la fase absoluta serán erróneos. Si el montaje hubiese sido con vectores de sensibilidad constantes, tras desplazar la curva 2, hubiese coincidido perfectamente con la curva 1.

Con esto, concluimos que para el cálculo de desplazamientos relativos se hace imprescindible el uso de vectores de sensibilidad constantes.

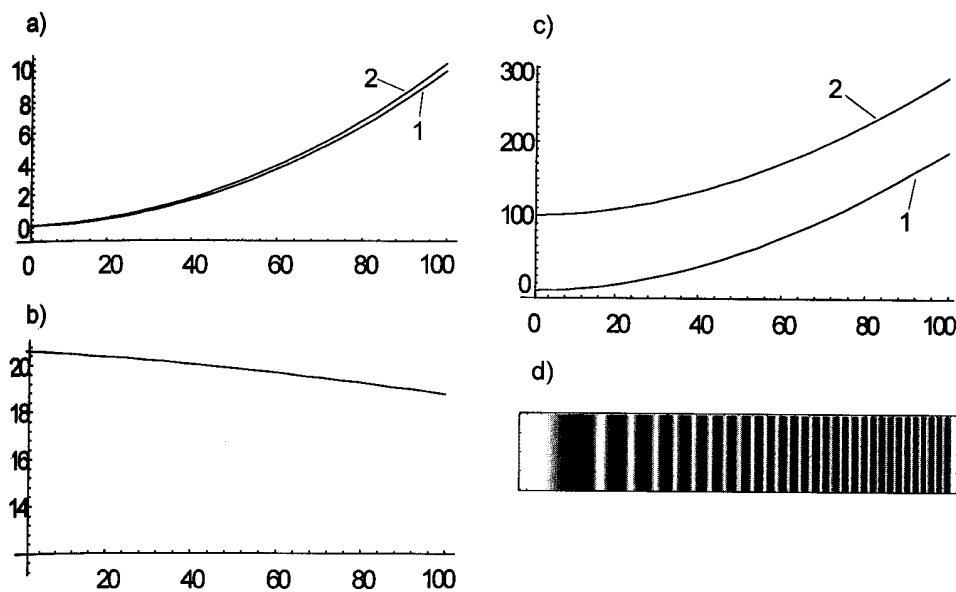


Figura 4. 5 Gráficas obtenidas en el experimento sobre la viga en voladizo [4]

4.4. Condiciones de carga.

La Interferometría holográfica produce únicamente patrones de interferencia bidimensionales, cuya forma y distribución de intensidades dependen de las cargas aplicadas, de la forma del objeto y de la geometría del montaje holográfico. Desde el momento que una carga de pequeña amplitud es capaz de provocar una deformación suficiente en el objeto para generar franjas de interferencia, la Interferometría holográfica se presenta como una extraordinaria herramienta para realizar ensayos no destructivos:

El desarrollo y utilización de esta técnica requiere el análisis de tres pasos interrelacionados:

- 1) seleccionar las carga (tipo, dirección, y amplitud) que provoca el patrón de interferencia.
- 2) elegir el montaje óptico adecuado (que los vectores de sensibilidad tengan las direcciones adecuadas).
- 3) interpretar los resultados obtenidos.

Con la técnica de Interferometría holográfica podemos visualizar la diferencia entre diferentes estados de deformación de la superficie de objetos opacos. Para provocar un cambio en el estado de deformación del objeto, y así obtener dos campos luminosos que comparar, debemos aplicar cargas o modificar unas cargas con respecto a la situación inicial. Muchos de los problemas de cálculo de medidas, a resolver mediante técnicas de holografía, se formulan siguiendo el esquema: investigar y medir como un determinado componente se deforma, como respuesta a una carga determinada. Normalmente los problemas de medición mediante técnicas de Interferometría holográfica consisten en realizar un ensayo sobre un componente para

comprobar si tiene o no, un defecto. En ese caso, tenemos que decidir el tipo de carga apropiada para el ensayo (tipo, dirección y amplitud). Disponemos de cinco tipos de sollicitaciones básicas: aplicación directa de una carga, sollicitación bajo presión, carga vibratoria, una carga impulsiva, y sollicitación térmica.

La obtención directa de tensiones mecánicas se consigue mediante la aplicación de momentos flectores, momentos torsores, tensión axial, cortante, cargas puntuales o por gravedad. Si tenemos que utilizar tensión axial, debemos examinar cuidadosamente el equipo para eliminar cualquier posible fuente de torsión, ya que, normalmente los montajes holográficos para Interferometría están optimizados para registrar los desplazamientos fuera del plano del objeto, y como estos desplazamientos son fuertemente dependientes de la torsión, las franjas causadas por la torsión dominarían sobre la generadas por tensión coplanaria. La dirección de las tensiones mecánicas deben ser ajustada según la orientación esperada del defecto o según la estructura del componente si se trata de un material compuesto. También es posible aplicar este tipo de carga mediante el uso de la fuerza centrífuga, en el caso de componentes cuyas condiciones de trabajo sean en régimen de giro. Podemos también realizar un montaje para la aplicación de carga gravitatoria mediante un giro de 180° de todo el montaje holográfico, incluido el objeto.

La aplicación de sollicitaciones bajo presión se puede conseguir introduciendo el componente en una cámara de vacío o de presión., o, en el caso de componentes huecos, sometiéndolos a sobrepresiones o depresiones internas. Recipientes a presión cilíndricos o esféricos, así como tubos se pueden probar mediante presión interna. En el caso de recipientes estancos, las sobrepresiones internas se pueden conseguir llenándolos de agua. También podemos analizar neumáticos aplicando diferencia de presiones para detectar defectos, zonas de rotura, separación de juntas o grietas.

Las cargas vibratorias pueden ser provocadas por campos acústicos generados por altavoces, o por aplicación directa sobre un punto de contacto mediante agitadores electrodinámicos. Este tipo de cargas se usan para detectar zonas de emisiones acústicas en estructuras de gran tamaño, como por ejemplo en la reducción de ruido en la

industria del automóvil, o para detectar defectos o inhomogeneidades en un componente. La aplicación de estas cargas puede hacerse con amplitud variable, o frecuencia variable o incluso, con fase variable. Por ejemplo, en la determinación de los modos de vibración utilizaremos frecuencia variable en la excitación. Podemos visualizar los modos de vibración de una estructura reconociendo sus patrones de interferencia holográfica, revelando errores en la fabricación, como pueden ser piezas incorrectas o espesores de placa desiguales o erróneos.

Las cargas impulsivas, producidas por impactos localizado, generan ondas de deflexión que viajan a través del sólido. Estas ondas pueden ser registradas utilizando un láser de impulsos. Las grietas y defectos obstruyen el paso normal de la onda de propagación, por lo que pueden ser detectados utilizando este método.

Hay muchas formas de aplicar cargas térmicas: mediante lámparas de radiación podemos calentar los componentes bajo estudio, fluidos volátiles esparcidos sobre la superficie del objeto extraen del sólido el calor necesario para su evaporación enfriando al objeto, sometiendo al objeto a corrientes de aire caliente generadas por secadores convencionales provocamos el calentamiento por convección forzada. También podemos calentar componentes mediante inducción o por microondas, especialmente si los materiales contienen agua. Debido a la expansión térmica la mayoría de los materiales se deforman cuando la temperatura cambia. El comportamiento de un determinado componente electrónico bajo distintas condiciones de trabajo se puede determinar mediante el reconocimiento de patrones característicos de interferometría holográfica. Además, la conductividad térmica varía en puntos donde hay defectos o grietas, lo que permite su localización.

Todos estas formas de aplicación de las cargas se pueden clasificar también según su forma de aplicación en el tiempo. Las cargas pueden ser estáticas o dinámicas. Son cargas estáticas, las cargas de presión o las cargas mecánicas de aplicación directa. Las cargas térmicas sólo pueden ser consideradas estáticas cuando se alcance el régimen permanente, hasta entonces debemos considerarlas como cargas dinámicas. Las cargas dinámicas podemos dividirla a su vez en cargas periódicas y cargas transitorias. Las

cargas vibratorias son cargas periódicas, mientras que las cargas impulsivas causan efectos transitorios. Las cargas térmicas son, en la mayoría de los casos, cargas dinámicas transitorias. Para el registro de hologramas, cuando aplicamos cargas estáticas o periódicas, podemos usar láseres convencionales. Sin embargo, cuando las cargas aplicadas inducen fenómenos transitorios debemos usar un láser pulsante, para registrar los hologramas.

Sobre los tipos de cargas mencionados podríamos hacer un nuevo estudio, clasificándolos según se aplican de forma localizada o distribuida.

Tras la aplicación de cualquiera de los tipos de carga analizados, el sólido responderá cambiando su estado de deformación. Este cambio lo registraremos y calcularemos el campo de desplazamientos de los puntos de la superficie.

Desde el momento que tenemos acceso al campo de desplazamientos de los puntos de la superficie del objeto podemos realizar experimentos mecánicos para determinar propiedades mecánicas deducidas a partir de dicho campo y de las cargas aplicadas. Este tipo de análisis debe hacerse con sumo cuidado, ya que la solución al campo de tensiones que provoca el campo de desplazamientos de la superficie del objeto no es única. Esto quiere decir, que solo para ciertas condiciones de carga y geometrías de sólidos muy concretas, podemos sacar la información necesaria para determinar propiedades mecánicas. Las deformaciones y tensiones no se pueden, por tanto, calcular de forma directa, sino que deben ser deducidas a partir de las condiciones de carga, la geometría del sólido y el cálculo del campo de desplazamientos. Este análisis se hará más adelante para ciertos tipos de geometrías características dentro del campo de la mecánica.

Podemos también optimizar la aplicación de las cargas para otro tipo de análisis no cuantitativos. De esta forma, una de las aplicaciones más importantes de la interferometría holográfica, dentro del campo de la mecánica, es la localización de defectos y grietas en la estructura de un determinado componente.

En un componente técnico bajo una serie de cargas determinadas, sus defectos y grietas inducen una serie de deformaciones locales características, que pueden ser detectadas mediante la Interferometría holográfica, a través del reconocimiento del patrón característico que genera..

Un defecto en la estructura de un determinado componente puede llegar a ser crítico dependiendo de la forma y dirección de las cargas a las que está sometido. Por eso, es recomendable realizar ensayos sobre el componente en cuestión, simulando la forma y dirección de las cargas aplicadas en las condiciones de trabajo, pero siendo estas cargas de baja intensidad, pero suficientes para generar franjas de interferencia que puedan ser evaluadas. Esta es la manera de validar la correcta respuesta de la estructura de un componente bajo la acción de un determinado conjunto de cargas aplicadas. Los defectos no son detectados en sí mismos, pero si su respuesta a la acción de las cargas. No solo somos capaces de detectar defectos externos, como una grieta en la superficie del objeto, sino que también podemos detectar defectos internos, como oquedades o inhomogeneidades del material, reconociendo su respuesta característica a la acción de las cargas. Todas estas posibilidades y ventajas abren el camino al campo de los ensayos no destructivos usando interferometría holográfica (HDNT, “holographic nondestructive testing”).

4.5. Tensiones y deformaciones.

Con el empleo de técnicas de interferometría holográfica digital obtenemos el campo de desplazamientos de los puntos de la superficie de un objeto opaco. Queremos hacer un desarrollo teórico que nos permita calcular el campo de deformaciones que ha sufrido el objeto, en respuesta a la acción de las cargas aplicadas, de tal forma que los puntos de la superficie del objeto sufran los desplazamientos calculados. También queremos determinar las tensiones que se producen en el interior del objeto. El problema está acoplado en tensiones y deformaciones. Para resolver este problema

tenemos como datos de partida los desplazamientos de la superficie calculados, la cargas aplicadas (si es que son conocidas) y la geometría del objeto. Con estos datos, la solución al problema no es única, es decir, hay diferentes campos de deformaciones y tensiones que dan como resultado el mismo campo de desplazamientos de la superficie. Solo para ciertas condiciones de carga y geometrías de sólidos muy concretas, podemos calcular las tensiones y las deformaciones a las que está sometida el objeto, de tal forma que tras deformarse, el campo de desplazamientos de los puntos de la superficie es el calculado. A continuación estudiaremos ciertas configuraciones de sólidos, sobre los que si podemos calcular sus tensiones y deformaciones.

Los desplazamientos que pueden ser medidos mediante interferometría digital $\vec{d}(x, y, z = 0)$, son suficientes para describir las deformaciones en el caso de tensión plana. Hablamos de estados de carga planos cuando un material plano y delgado es sometido solamente a tensiones paralelas a su superficie. Ejemplos típicos de experimentos bajo estas condiciones podrían ser el estiramiento de chapas y membranas, o también, el alargamiento de materiales extensibles, como las bandas extensométricas, usados habitualmente para medir propiedades mecánicas de los materiales. Las tensiones coplanarias, para este tipo de objetos, son calculadas a partir del calculo las componentes $\vec{d}_x(x, y)$ y $\vec{d}_y(x, y)$ del campo de desplazamientos.

Las deformaciones de otros tipos de objetos como vigas, laminas, o cubiertas son determinadas a partir de la componente $\vec{d}_z(x, y)$ del campo de desplazamientos, normal a la superficie del objeto.

Una viga es un elemento alargado de sección constante de tal forma que la longitud L de la viga es de mayor orden de magnitud que le espesor h y el ancho l , $L \gg h$, $L \gg l$. Estos elementos pueden estar sometidos a cargas cortantes (concentradas y distribuidas), a axiles y a flectores (ver Figura 4.6.). Podemos modelar como viga a un gran variedad de componentes dentro del campo de la mecánica: vigas soportes, ejes, bielas, o álabes de turbinas, por nombrar unos pocos ejemplos.

Un experimento muy difundido en interferometría es el estudio de una viga en voladizo. Provocaremos en la viga deflexiones $\vec{d}_z(x)$ en la dirección z . La razón de que este experimento esté tan difundido, es que estas deflexiones son fáciles de medir holográficamente, optimizando el montaje, de tal forma que dichas deflexiones tengan la dirección de máxima sensibilidad. Además, conocemos el desplazamiento en la base de la viga, $\vec{d}_z(x=0) = 0$, por lo que podremos eliminar el problema de la fase absoluta. El estudio de las vigas está muy desarrollado, lo que permite comparar los resultados teóricos con los experimentales.

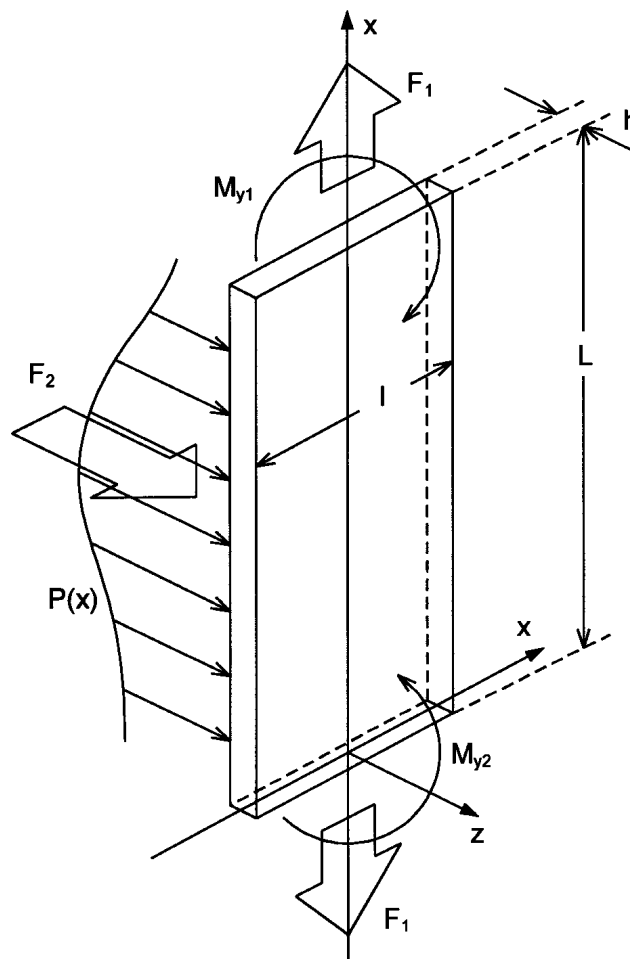


Figura 4. 6 *Geometría y cargas en una viga* [4]

Si la viga está formada por un material de comportamiento elástico bajo la acción de unas cargas, es decir, que las tensiones y deformaciones son proporcionales, tendremos, por ejemplo, en la dirección x :

$$\sigma_{xx} = E \cdot \varepsilon_{xx} \quad [121]$$

donde E es el módulo de elasticidad de Young. También las tensiones cortantes y las deformaciones cortantes siguen una ley proporcional:

$$\tau_{zx} = G \cdot \gamma_{zx} \quad [122]$$

donde G es el módulo de cizalladura. G y E están relacionados mediante:

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad [123]$$

donde ν es el módulo de Poisson, que en un componente sometido a tracción y a compresión en la dirección x describe la relación entre la deformación transversal y la longitudinal:

$$\varepsilon_z = \nu \cdot \varepsilon_x \quad [124]$$

E , G y ν son propiedades de los materiales de los que está fabricada la viga.

Si la viga de la Figura 4.6. se flecta en respuesta a la acción de un conjunto de cargas compuesto por: una carga puntual transversal F_z , una carga distribuida $P_z(x)$, fuerzas longitudinales F_x y momentos flectores M_{y1}, M_{y2} sobre ejes paralelos al eje y , entonces la deformación longitudinal que observamos en la superficie es:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial d_{x0}(x)}{\partial x} - \frac{1}{2}h \cdot \left(\frac{\partial^2 d_z(x)}{\partial x^2} \right) \quad [125]$$

Aquí $d_{x0}(x)$ es el desplazamiento en la dirección x del plano central en $z = 0$ de la viga, debido a la acción de las fuerzas longitudinales F_x y h es el espesor de la viga. La tensión longitudinal σ_{xx} en la superficie de la viga será:

$$\sigma_{xx} = E \left[\frac{\partial d_{x0}(x)}{\partial x} - \frac{1}{2}h \left(\frac{\partial^2 d_z(x)}{\partial x^2} \right) \right] \quad [126]$$

Mientras las deflexiones sean pequeñas, los momentos flectores para una x dada serán:

$$M_y = -\frac{E h^3}{12} \left(\frac{\partial^2 d_x(x)}{\partial x^2} \right) \quad [127]$$

Ahora estudiaremos el comportamiento de una lámina (ver Figura 4.7.). Una lámina es un elemento que tiene la anchura l del mismo orden que la longitud L , $l \approx L$, y cuyo espesor es constante h y de orden inferior comparado con la longitud L y la anchura l : $h \ll l$, $h \ll L$.

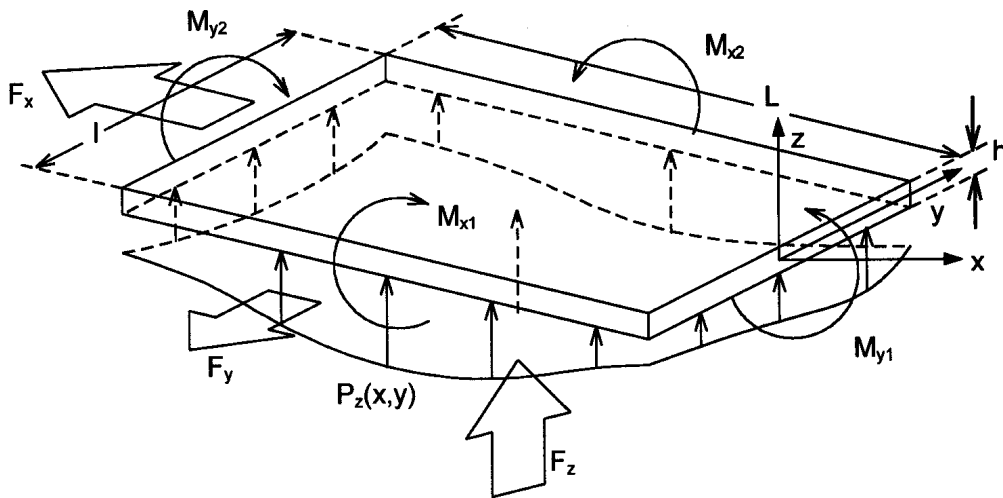


Figura 4.7 Geometría y cargas en una lámina [4]

La lámina se deforma bajo la acción de un conjunto de cargas compuesto por: una carga distribuida $P_z(x,y)$, fuerzas transversales F_z , fuerzas axiales F_x, F_y aplicadas en los ejes, momentos flectores M_x, M_y actuando sobre los ejes. Las deformaciones que observamos en la superficie son:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial d_{x0}(x,y)}{\partial x} - \frac{1}{2}h \left(\frac{\partial^2 d_z(x,y)}{\partial x^2} \right) \quad [128]$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial d_{y0}(x,y)}{\partial y} - \frac{1}{2}h \left(\frac{\partial^2 d_z(x,y)}{\partial y^2} \right) \quad [129]$$

$$\gamma_{xy} = \left(\frac{\partial d_{x0}(x,y)}{\partial x} + \frac{\partial d_{y0}(x,y)}{\partial y} \right) - h \left(\frac{\partial^2 d_z(x,y)}{\partial x \partial y} \right) \quad [130]$$

donde $d_{x0}(x,y)$ y $d_{y0}(x,y)$ son las componentes de las translaciones coplanarias de los puntos del plano central $z = 0$ de la lámina en respuesta a las cargas axiales F_x y F_y . Las correspondientes tensiones vuelven a ser $\sigma_{xx} = E \varepsilon_{xx}$, $\sigma_{yy} = E \varepsilon_{yy}$, $\tau_{xy} = G \gamma_{xy}$ y los momentos flectores por unidad de longitud son:

$$M_x = -D \left(\frac{\partial^2 d_z(x,y)}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 d_z(x,y)}{\partial y^2} \right) \quad [131]$$

$$M_y = -D \left(\frac{\partial^2 d_z(x,y)}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 d_z(x,y)}{\partial x^2} \right) \quad [132]$$

$$M_{xy} = D(1-\nu) \frac{\partial^2 d_z(x,y)}{\partial x \partial y} \quad [133]$$

donde $D = \frac{E h^2}{12(1-\nu^2)}$ es la rigidez a flexión de la lámina.

En muchas aplicaciones, las vigas y las láminas están sólo afectadas por momentos flectores, por lo que $\delta d_{x0}/\delta x$ y $\delta d_{y0}/\delta y$ pueden ser eliminados de las expresiones anteriores. Para estos casos, las tensiones y deformaciones coplanarias así como los momentos flectores a lo largo de la superficie, pueden ser calculados a partir de la distribución de desplazamientos normales a la superficie $\vec{d}_z(x, y)$, los cuales, en la mayoría de los montajes de interferometría holográfica es la componente a medir con la máxima sensibilidad.

Para el cálculo de las tensiones, deformaciones y momentos flectores necesitamos hacer diferenciación numérica a partir de los datos de los desplazamientos medidos. Debemos tener cuidado con la amplificación del ruido y las distorsiones en el proceso de cálculo de la diferenciación. Por eso necesitamos máxima precisión en los desplazamientos medidos, y además, necesitamos que el número de puntos del objeto sobre el que se calculan los desplazamientos sea muy elevado.

Una aproximación directa a la diferenciación numérica es el cálculo de diferencias finitas. El cociente de diferenciales lo aproximaremos por el cociente de diferencias:

$$\left(\frac{\partial d_z(x)}{\partial x} \right)_{x_i} \approx \frac{d_z(x_{i+1}) - d_z(x_i)}{x_{i+1} - x_i} \quad [134]$$

o por el cociente:

$$\left(\frac{\partial d_z(x)}{\partial x} \right)_{x_i} \approx \frac{d_z(x_{i-1}) - d_z(x_i)}{x_{i-1} - x_i} \quad [135]$$

o también por

$$\left(\frac{\partial d_z(x)}{\partial x} \right)_{x_i} \approx \frac{d_z(x_{i+1}) - d_z(x_{i-1})}{x_{i+1} - x_{i-1}} \quad [136]$$

Por razones de simetría, la última de las aproximaciones es la más recomendable. Sin embargo tendremos que utilizar las dos primeras en los bordes de matriz de datos de la que disponemos.

La derivada de segundo orden en x_i la obtendremos mediante las diferencias finitas de diferencias hacia delante y hacia atrás tomadas en las posiciones medias entre x_{i+1} y x_i , y entre x_i y x_{i-1} , respectivamente. La aproximación será:

$$\left(\frac{\partial^2 d_z(x)}{\partial x^2} \right)_{x_i} \approx 2 \frac{(x_i - x_{i-1}) d_z(x_{i+1}) - (x_{i+1} - x_{i-1}) d_z(x_i) + (x_{i+1} - x_i) d_z(x_{i-1})}{(x_i - x_{i-1})(x_{i+1} - x_{i-1})(x_{i+1} - x_i)} \quad [137]$$

Para puntos igualmente espaciados por la misma distancia $h = x_{i+1} - x_i$, que es el caso más usual, la expresión anterior se simplifica, quedando finalmente como:

$$\left(\frac{\partial^2 d_z(x)}{\partial x^2} \right)_{x_i} \approx \frac{d_z(x_{i+1}) - 2 d_z(x_i) + d_z(x_{i-1}))}{h^2} \quad [138]$$

Si en un experimento, los datos obtenidos están desigualmente espaciados o, aunque estuvieran igualmente espaciados, tienen ruido, una práctica muy recomendable para mejorar los resultados de la diferenciación, es asignar una curva a la distribución de desplazamientos antes de realizar la diferenciación numérica. Si tenemos una gran precisión, pero tenemos que interpolar entre puntos, “splines” cúbicos es la mejor opción. Éstos interpolan mediante polinomios de tercer orden, en intervalos adyacentes, dando como resultado derivada de segundo orden continua en aquellos puntos donde los dos intervalos se encuentran. También podemos, en el caso de ruido acusado, procesar la distribución obtenida mediante filtrados específicos para contrarrestar el efecto del ruido.

Para la descripción de las deformaciones y rotaciones bajo un punto de vista más general adoptaremos una notación en función del lugar geométrico de las franjas y los

vectores de franjas. Suponemos que el objeto bajo estudio sufre un desplazamiento como sólido rígido muy pequeño, y una deformación homogénea. La deformación es homogénea cuando cada elemento del objeto sufre la misma deformación, como por ejemplo, la deformación que sufre una esfera hasta ser un elipsoide, o un cubo deformándose hasta ser un paralelepípedo rectangular o trapezoidal. Elementos prismáticos sometidos a tracción o compresión simple, o sólidos expandiéndose bajo la acción de un calentamiento homogéneo, producen también deformaciones homogéneas. La interferencia de fase en cada punto P viene dada por:

$$\Delta\phi(P) = \vec{d}(P) \cdot \vec{e}(P) \quad [139]$$

Estas ecuaciones pueden ser interpretadas como una función de localización de franjas, ya que valores constantes de $\Delta\phi(P)$ definen la localización de franjas en la superficie del objeto. Las franjas observadas las interpretamos como la intersección de las superficies generadas en el espacio bajo la condición de $\Delta\phi(P) = const$ con la superficie del objeto. Si estudiamos sólo pequeñas zonas del objeto, en donde podemos suponer que el vector de sensibilidad es constante, las franjas serán observadas sobre la superficie del objeto como líneas rectas equidistantes, indicando que el lugar geométrico de las franjas son planos paralelos equidistantes. El vector posición \vec{r} de un punto P de la superficie del objeto, en un sistema de referencia arbitrario, será: $\vec{r} = (x_p, y_p, z_p)$, y partir de aquí podemos escribir la función de localización de las franjas como el producto escalar entre:

$$\Delta\phi(\vec{r}) = \vec{K}_f \cdot \vec{r} \quad [140]$$

El vector \vec{K}_f es el vector de franja, que es inversamente proporcional a el espacio entre las superficies de $\Delta\phi(P) = const$ y es normal a estas superficies.

Podemos hacer la hipótesis de que conocemos un valor $\Delta\phi(\vec{r})$ de la función de localización de franjas en el punto P con vector posición \vec{r} . A partir de esto, la función

de localización de franjas en los alrededores de P, en un punto Q que tiene por vector de posición $\vec{r} + \overrightarrow{\Delta r_{PQ}}$, se puede escribir en función del desarrollo en serie de Taylor en torno a P, como:

$$\Delta\phi(\vec{r} + \overrightarrow{\Delta r_{PQ}}) = \Delta\phi(\vec{r}) + \overrightarrow{\Delta r_{PQ}}^T \cdot \vec{K}_f + \frac{1}{2} \overrightarrow{\Delta r_{PQ}}^T \cdot T_f \cdot \overrightarrow{\Delta r_{PQ}} \quad [141]$$

El segundo sumando es el producto escalar del vector diferencia de posiciones con el vector de franjas \vec{K}_f , el cual, es el vector gradiente de $\Delta\phi(\vec{r})$. T_f es el tensor de franjas, que representa las variaciones lineales de \vec{K}_f , el cual solo lo consideraremos cuando las deformaciones y las tensiones no sean homogéneas.

Calculamos \vec{K}_f diferenciando la función de localización de franjas:

$$\Delta\phi = d_x e_x + d_y e_y + d_z e_z \quad [142]$$

Vemos que tenemos tres productos en dicha expresión, por lo que de la aplicación de las leyes de derivación sobre los tres ejes obtenemos dieciocho términos que podemos escribir matricialmente como:

$$\vec{K}_f = F \cdot \vec{e} + G \cdot \vec{d} \quad [143]$$

Mientras que \vec{e} y \vec{d} son los vectores de sensibilidad y de desplazamiento, la matriz G guarda información acerca de las variaciones de perspectiva debida a la variación de los vectores de observación y la matriz F es la matriz de gradientes de deformación, que contiene información acerca de las derivadas del campo de desplazamientos:

$$F = \begin{pmatrix} \frac{\partial d_x}{\partial x} & \frac{\partial d_x}{\partial y} & \frac{\partial d_x}{\partial z} \\ \frac{\partial d_y}{\partial x} & \frac{\partial d_y}{\partial y} & \frac{\partial d_y}{\partial z} \\ \frac{\partial d_z}{\partial x} & \frac{\partial d_z}{\partial y} & \frac{\partial d_z}{\partial z} \end{pmatrix} \quad [144]$$

Podemos descomponer la matriz F en:

$$F = \Sigma + \Theta \quad [145]$$

donde Σ es la matriz simétrica de deformaciones:

$$\Sigma = \begin{pmatrix} \varepsilon_x & \frac{1}{2}\gamma_{xy} & \frac{1}{2}\gamma_{zx} \\ \frac{1}{2}\gamma_{xy} & \varepsilon_y & \frac{1}{2}\gamma_{yz} \\ \frac{1}{2}\gamma_{zx} & \frac{1}{2}\gamma_{yz} & \varepsilon_z \end{pmatrix} \quad [146]$$

y Θ es la matriz antisimétrica de las rotaciones:

$$\Theta = \begin{pmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{pmatrix} \quad [147]$$

Entonces, podemos descomponer F en una parte simétrica Σ y una parte antisimétrica Θ mediante:

$$\Sigma = \frac{1}{2}[F + F^T] \quad [148]$$

$$\Theta = \frac{1}{2}[F - F^T] \quad [149]$$

Con esto, tenemos un método de obtener deformaciones y rotaciones mediante la determinación de F mediante medidas holográficas.

Si la geometría del objeto es conocida, podemos asignar coordenadas a los puntos que son intersección entre la superficie del objeto y las superficies de franjas. Podemos ver en la Figura 4.8. una serie de puntos, en donde P , P_1 y P_2 pertenecen a la misma franja, y P_3 pertenece a la franja adyacente.

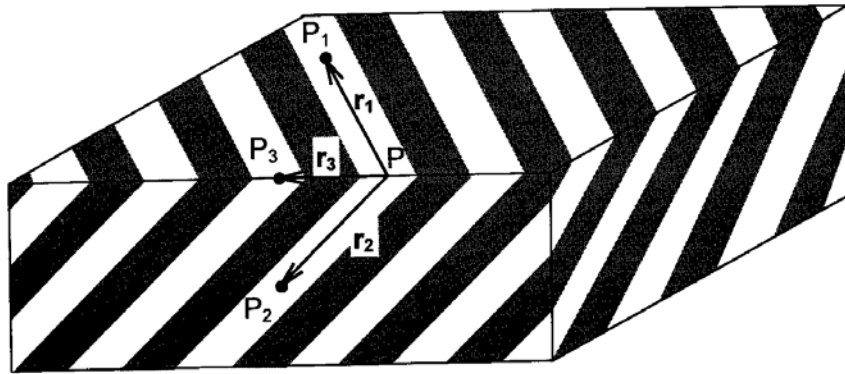


Figura 4. 8 Sistema de referencia del vector de franjas [4]

Los vectores \vec{r}_1 , \vec{r}_2 y \vec{r}_3 son los vectores desde P hasta P_1 , P_2 y P_3 , respectivamente. La dirección del vector de franjas \vec{K}_f viene dada por el vector unitario \vec{k}_f :

$$\vec{k}_f = \frac{\vec{r}_1 \times \vec{r}_2}{|\vec{r}_1 \times \vec{r}_2|} \quad [150]$$

este vector marca la dirección del vector de franjas \vec{K}_f . El módulo del vector de franjas será:

$$|\vec{K}_f| = \frac{\pi}{\vec{k}_f \cdot \vec{r}_3} \quad [151]$$

si la franja en P_3 tiene un orden superior a la de la franja en P , debemos cambiar el numerador por $-\pi$.

Para obtener la matriz de gradientes de las deformaciones F necesitamos tres registros con vector de sensibilidad distinto, no coplanarios. Para cada vector de sensibilidad tenemos que determinar el correspondiente vector de franjas. Si hacemos la hipótesis de que los vectores de sensibilidad son constantes, podemos eliminar G de la resolución del problema.

Si los vectores no son constantes, y su variación de punto a punto es considerable, tenemos que evaluar los desplazamientos y la matriz G debe ser calculada a partir del conocimiento de los vectores de sensibilidad. En este caso las operaciones a realizar serán:

$$\vec{K}_{fc} = \vec{K}_f - G \cdot \vec{d} \quad [152]$$

Y finalmente, para calcular solo queda hacer:

$$F = (\vec{e}^T \vec{e})^{-1} \cdot (\vec{e}^T \cdot \vec{K}_{fc}) \quad [153]$$

Con esto concluimos el desarrollo de la teoría de vector de franjas, empleada para el cálculo de las deformaciones.

Ahora estudiaremos como podemos combinar la interferometría holográfica con otras técnicas de calculo de tensiones y deformaciones, para que, de la unión de estas disciplinas, obtengamos herramientas de cálculo más potentes.

Gracias a la gran precisión de las medidas de los desplazamientos realizadas mediante interferometría holográfica y la evaluación de dichos desplazamientos de forma cuantitativa, utilizando una computadora, podemos procesar el campo de desplazamientos calculado para obtener información acerca del comportamiento del material bajo estudio. De esta forma, las medidas de los desplazamientos efectuadas se pueden combinar con métodos de análisis de estructuras, como por ejemplo, métodos de elementos finitos, elementos de contorno, o técnicas de análisis de fractura mecánica de materiales, para así estudiar el comportamiento de un determinado componente.

El método de elementos finitos es un método de análisis estructural, donde una estructura es dividida en un número de elementos discretos de geometría sencilla. Todos estos elementos se conectan a través de los nodos sobre los que están definidos. Gracias a que la geometría de estos elementos es sencilla podemos calcular el comportamiento mecánico de cada uno de los elementos. El programa de elementos finitos se encarga de que la solución al problema presentada sea compatible con las soluciones en todos los nodos. Estos desplazamientos, deformaciones, tensiones o el comportamiento térmico de la estructura ante sollicitaciones mecánicas o térmicas puede ser modelado mediante esta técnica, con una gran concordancia con el comportamiento real.

El análisis holográfico de las deformaciones o de las vibraciones se puede combinar con el método de elementos finitos de forma efectiva para conseguir distintos procesos de cálculo. Uno de los procesos de cálculo más importante es el empleo de la interferometría holográfica para verificar los resultados obtenidos mediante un modelo de elementos finitos. Esta técnica se emplea especialmente cuando el objeto bajo estudio tiene una forma muy compleja o el material que lo forma es de estructura compuesta, ya que en estos casos la discretización del medio se presenta muy complicada y es difícil modelar los parámetros físicos del material. Podemos comparar los desplazamientos calculados en un experimento sobre el objeto mediante interferometría holográfica con los desplazamientos resultantes del modelo de elementos finitos, para comprobar su concordancia. Si concuerdan, podemos decir que el modelo de elementos finitos es correcto, y entonces no solo los desplazamientos estarán validados, sino también las tensiones y las deformaciones. Esta estrategia de

cálculo ha sido desarrollada con éxito tanto para el cálculo de la distribución de tensiones, como para el reconocimiento de los modos de vibración.

El método de elementos de contorno puede ser combinado con los métodos experimentales de interferometría holográfica de forma muy interesante. Especialmente, si las condiciones de contorno que queremos simular son muy difíciles de describir teóricamente. En tal caso, la mejor solución es medirlas directamente. Si medimos los desplazamientos mediante interferometría holográfica, los contornos de regiones de dos o tres dimensiones podemos dividirlos en segmentos, en los que los desplazamientos y las deformaciones son aproximados por funciones de primer grado. La distribución interna de tensiones puede ser calculada posteriormente a partir de los elementos de contorno.

Como dijimos anteriormente, también podemos emplear la interferometría holográfica para el análisis de fracturas mecánicas. Estudiamos el daño que provocan en la estructura de un determinado componente las grietas, o cualquier tipo de defecto, que contenga. Este estudio lo haremos empleando gráficas del factor de concentración de tensiones K_I y calculando su valor crítico K_{Ic} , que es una propiedad del material. El valor del factor de concentración de tensiones K_I puede ser calculado holográficamente mediante, primero, calculando el campo de deformaciones de la estructura del componente localizando la grieta, y posteriormente, evaluando el contorno de la zona de plastificación que envuelve a la grieta bajo la acción de tensión a tracción.