



## EVALUACIÓN DE TENSIONES RESIDUALES EN DISCOS COMPACTOS MEDIANTE EL MÉTODO FOTOELÁSTICO

M. Llosa D.<sup>a\*</sup>, J. Gómez B.<sup>a,b</sup>, M. Zapata B.<sup>b</sup>, C. Aparicio O.<sup>c,b</sup>, D. Guillen<sup>a</sup>, L. Zapata A.<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Nacional Mayor de San Marcos Ap. Postal 14-0149, Lima 14, Perú.

<sup>b</sup>Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima 25, Perú.

<sup>c</sup>Facultad de Ciencias Naturales y Matemática, Universidad Nacional Federico Villareal, Lima 21, Perú.

---

### Resumen

La tensión residual y la orientación molecular en un material proporcionan información importante de su comportamiento. La presencia o ausencia de tensión residual determina la calidad de los plásticos usados para el almacenamiento de información y otros.

En el presente trabajo, se implementó un método de ensayo no destructivo para la evaluación de los discos compactos, así como el almacenamiento de información en los mismos mediante el análisis óptico de tensión residual. Además se hizo un análisis cuantitativo del estado de tensión de diferentes marcas de CD.

PACS: 61.48.+c; 65.40.Gr

**Palabras claves:** Foto elasticidad, análisis de tensiones, birrefringencia.

---

### Abstract

The residual tension and the molecular orientation in a material provide important information about its behavior. The presence or absence of residual tension determines the quality of the plastics used for the storage of information and others.

In this work, a non destructive method was implemented for the evaluation of compact disks, as well as the storage of information in the same ones by means optic analysis of residual tension. A quantitative analysis of the tension state in different marks of CD was also made.

**Keywords:** Photo elasticity, tension analysis, birefringence.

---

### 1. Introducción

Las tensiones residuales tienen un efecto substancial en la utilidad a largo plazo de los discos compactos (CDs). A veces, la redistribución de tensiones residuales es responsable de la iniciación de la grieta en discos en una de las etapas de la producción o por una redistribución que los incrementos de tensiones a un valor crítico para el cual una carga externa insignificante causa la fractura de CDs. Las tensiones residuales son introducidas por casi todas las técnicas usadas para la fabricación de polímeros. Se producen como resultado de protuberancias, de estirar, de moldear o de otros procesos que inducen una tensión. Las tensiones se pueden introducir por la diferencia de contracción, o

flujo no uniforme. La relajación es una de las principales razones de la redistribución de la tensión residual, y este proceso puede ocurrir sin una carga o calentamiento externo.

En la fase de producción, los procesos pueden cambiar por una variedad de razones. Pequeños incrementos en los patrones de la producción, temperatura del ambiente, o la composición del material pueden causar nuevos problemas. Durante el control de calidad se puede encontrar, por ejemplo, que los productos moldeados en poliestireno se deforman dentro de un tiempo corto después de emerger de la prensa, las superficies de acrílico trabajadas a máquina se agrietan, la película orientada no puede ser dibujada sin agrietarse, o los productos se decoloran.

---

\* Corresponding author. e-mail: [mllosad@unmsm.edu.pe](mailto:mllosad@unmsm.edu.pe)

Este tipo de problemas se inician, a menudo, debido a las tensiones o relajaciones residuales de la tensión. Las tensiones residuales se deben evaluar en cada etapa del ciclo del producto, desde el diseño a la producción completa. El supervisar el proceso ayuda a mantener la calidad del producto, al efectuar medidas directas para determinar la conveniencia de varios acercamientos y eliminar tensiones indeseables. La uniformidad y la distribución de tensiones en un producto deben también ser evaluadas cuidadosamente.

Los CDs modernos se hacen de policarbonato, que es un material birrefringente. Esto permite que las tensiones en CDs sean estimadas por el método fotoelástico. Una capa metalizada aplicada a una de las superficies del CD asegura las condiciones ideales para registrar un patrón de interferencia de la luz reflejada. Para el estudio de las tensiones en CDs usamos un arreglo óptico. En el presente artículo se discute los resultados de la observación de tensiones residuales en CDs manufacturados por diversos fabricantes.

## 2. Parte Teórica

La fotoelasticidad es un método experimental para el análisis de la tensión y especialmente útil en estudios de objetos con geometría compleja bajo condiciones de carga variable. En algunos casos donde los métodos teóricos son laboriosos o inaplicables, un análisis experimental es preferido para estudios de problemas dimensionales, problemas de carga dinámica, tensiones residuales, y comportamiento inelástico de materiales [1].

Algunos materiales, especialmente plásticos, son isotrópicos en ausencia de carga pero llegan a ser anisotrópicos bajo carga. La birrefringencia, o anisotropía óptica, se relaciona con las tensiones elásticas y las tensiones de orientación que prevalecen en los polímeros orientados

Cuando un rayo de luz polarizado con una amplitud  $a$  se propaga a través de un CD hecho de policarbonato con grosor  $t$ , éste es separado en dos rayos polarizados que propagan en los planos  $X$  y  $Y$  coincidiendo con las dirección de la tensión principal en el punto considerado (Fig. 1). Si las tensiones son a lo largo de los ejes  $X$  y  $Y$  son iguales a  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  y la velocidad de la luz en estas direcciones son  $V_x$  y  $V_y$ , respectivamente, el relativo desfase  $\delta$  entre estos dos rayos es dado por:

$$\delta = C \cdot \left( \frac{t}{V_x} - \frac{t}{V_y} \right) = t(n_x - n_y) \tag{1}$$

donde  $n$  es el índice de refracción

De acuerdo con la ley de Brewster:

$$n_x - n_y = K(\sigma_1 - \sigma_2) \tag{2}$$

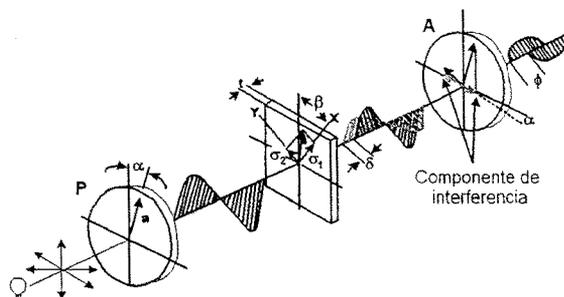


Fig. 1. Plano del arreglo. Polarizador (P), analizador (A), capa (x) desplazamiento de fase (y).

La constante  $K$  es llamada coeficiente de actividad óptica y es una propiedad física del material. Esta constante es usualmente determinada por calibración [2].

Para las ecuaciones (1) y (2), tenemos  $\delta = t \cdot K(\sigma_1 - \sigma_2)$  por transmisión y  $\delta = 2t \cdot K(\sigma_1 - \sigma_2)$  por reflexión (la luz pasa dos veces a través de la muestra)

En el método fotoelástico, la principal relación para la tensión esta dada por:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{\delta}{2 \cdot t \cdot K} = \frac{N \cdot \lambda}{2 \cdot t \cdot K} \tag{3}$$

Debido al desfase relativo  $\delta$  (retardo), estas dos ondas luminosas no están en fase cuando pasan a través de una muestra plana. El analizador  $A$  permite pasar solamente una componente (paralela al eje del analizador) de estas dos ondas, según lo mostrado en la Fig. 1. Estas ondas interfieren, y la intensidad resultante esta en función del desfase  $\delta$  y del ángulo entre el eje del analizador y la dirección de la tensión principal  $\beta - \alpha$  [3].

El análisis del retardo permite medir la birrefringencia en cualquier localización deseada, de este modo se obtiene la tensión residual. La evaluación cualitativa de la tensión se hizo con ayuda de la Tabla 1 [4].

## 3. Parte Experimental

La manera más sencilla de observar tensiones de plásticos transparentes es colocar una muestra del material entre dos hojas polarizadas iluminadas. Cuando estos elementos se alinean correctamente, el patrón de la tensión llega a ser visible. En algunos

casos, las franjas de color se pueden utilizar para evaluar birrefringencia, puesto que cada banda de color correlaciona el grado de tensión en la muestra examinada. (Véase la Tabla 1).

En la mayoría de las veces, el patrón de color es difícil de interpretar y puede ser engañoso, puesto que una franja "roja" o "verde" se podría observar en los múltiples niveles de tensión. Sin embargo, este método puede ser muy útil para una identificación simple de las áreas máximas de tensión.

Tabla 1. Color observado de acuerdo al retardo.

COLOR	RETARDO (nm)
Negro	-
Gris	150
Blanco-amarillo	250
Amarillo	300
Naranja (Amarillo oscuro)	450
Rojo	500
Índigo-violeta (Franja de 1er orden)	570
Azul	600
Azul-verde	650
Verde-amarillo	750
Amarillo	850
Naranja (amarillo oscuro)	950
Rojo	1050
Índigo-violeta (Franja de 2do orden)	1140
Verde	1300
Verde-amarillo	1400
Rosado	1500
Violeta (Franja de 3er orden)	1700

#### 4. Resultados y Discusiones

Se ha estudiado diferentes tipos de CDs, de música y datos. La información sobre como el CDs fue grabado, sea por un método industrial o usando grabadora de CD fue el parámetro de esta investigación. Durante la examinación de los CDs, las isocromas aparecieron como franjas de color secuencial, en el cual cada punto correspondió a los diferentes grados de birrefringencia y, por lo tanto, a las diferentes tensiones del segmento estudiado. Puesto que las franjas de color aparecen de modo periódico, el patrón fotoelástico de la franja se puede leer como un mapa topográfico, que permite visualizar la distribución superficial de la tensión en el CD examinado.

La Fig. 2 muestra los patrones de franja típicos de discos compactos de música producidos Sony Music Entertainment Argentina. La información en los CDs es almacenada a una muy alta densidad. El tamaño de cada pit (célula de la unidad) es pequeño - cerca de  $0.6 \mu\text{m}$ , y el ancho del espiral de la pista en la superficie de disco es de solo  $1,6 \mu\text{m}$  [5]. En la

fabricación industrial de CDs, el policarbonato fundido se aplica a la matriz bajo alta presión. La presión es necesaria para formar pits de alta calidad. El tiempo de la fabricación de un disco es aproximadamente 4 segundos, que conduce inevitable a la ocurrencia de un campo de tensión no homogéneo y de su patrón correspondiente.

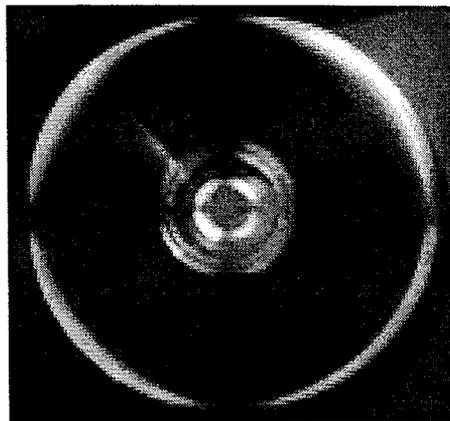


Fig. 2. Patrón de franja de disco compacto de música producido por Sony Entertainment Argentina.

El mismo método fue utilizado para obtener patrones foto elásticos en los análisis de las tensiones de CDs de datos. Los patrones de franja obtenidos se presentan en las Fig. 3 y Fig. 4. Es fácil observar que el patrón de franja en la Fig.3 no es similar a la mostrada en la Fig. 4. La carencia de un patrón de franja sensible en la Fig. 4 sugiere la alta calidad de este CD.

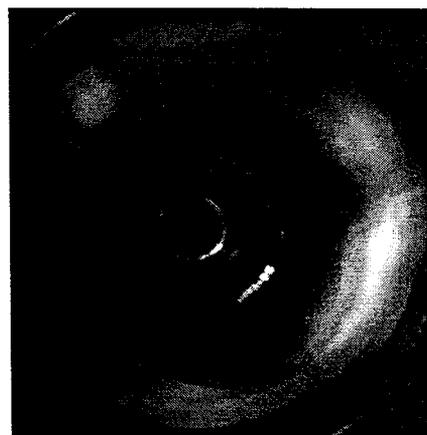


Fig. 3. Patrón de franja de CD digital Princo.

Las tensiones residuales en discos compactos se pueden estimar usando un método óptico simple. Una distribución no uniforme de las tensiones residuales en discos y de su relajación con el tiempo puede

causar una pérdida de información almacenada en el disco.

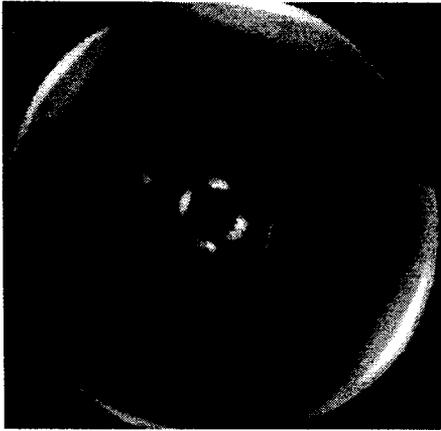


Fig. 4. Patrón de franja de CD digital Sony.

Los resultados del estudio muestran que los CDs de los diferentes marcas se diferencian por la naturaleza de los patrones de franja. Los resultados de los experimentos pueden ser útiles para el control efectivo de daño óptico en los procesos de producción en plantas manufactureras de CDs. Para

obtener un método automatizado de este procedimiento se sugiere hacer un análisis digital de imágenes obtenidas por este método, es decir hacer un "scanner" de tensión conectado a la PC para un estudio más detallado y este puede ser comparado con imágenes de CDs saliendo de una línea de producción, como un método de hacer un control de calidad antes de su comercialización.

#### Referencias

- [1] Vishay Measurements Group, Inc. Raleigh, North Carolina, "Introduction To Stress Analysis By The Photostrain Method". Tech. Note N° 702. 1989.
- [2] H. Zajac, "Óptica", 1986..
- [3] S. I. Gerasimov, *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, 45(3), (2004).
- [4] A. Redner, B. Hoffman, "Measuring Residual Stress In Transpaent Plastics". Medical Plastics and Biomaterials Magazine, (1997).
- [5] N. C. Braga, "A Nova Era Do Compac Disk". Saber Electrónica N° 261, (1996).