

EL MÉTODO FOTOELÁSTICO PARA DETERMINAR LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS ENTORNO A EXCAVACIONES BIDIMENSIONALES



Autor: Rubén Néstor Zambrana Martínez M. Sc.

Email: rubennzm@gmail.com

Carrera: Ingeniería de Minas-Topografía

Área tecnología

Universidad Nacional "Siglo XX"

Llallagua – Potosí – Bolivia

RESUMEN

En el diseño estructural de excavaciones en un macizo rocoso, tales como: galerías, túneles y otras aberturas subterráneas; es necesario determinar los esfuerzos inducidos en la excavación.

Una alternativa para calcular estos esfuerzos, es el Método Experimental denominado: **Método Fotoelástico**, que consiste en construir y ensayar "modelos físicos" a escala de forma semejante al "prototipo". El ensayo de los modelos se realiza en el equipo llamado **Polariscopio**.

Los materiales del modelo (resina sintética de poliéster) y del prototipo (roca), se suponen parecidos en cuanto a sus propiedades elásticas y mecánicas.

El método fotoelástico, permite cuantificar las concentraciones de esfuerzos en varias formas y tipos de excavaciones subterráneas; sin que se presenten problemas significativos por la condición de borde.

Para validar el método, se ha ensayado una maqueta de geometría sencilla, de la cual se conoce la distribución de esfuerzos teóricos.

Los resultados obtenidos son: Modelo N° 1 Excavación en herradura; Concentración de esfuerzos a compresión ($CEC = 5.53$) y Concentración de esfuerzos a tracción ($CET = -0.98$)

Modelo N° 2 Excavaciones múltiples; $CEC = 6.80$ y $CET = -0.86$

Modelo N° 3 Excavación en herradura con falla; $CEC = 8.18$ y $CET = 0$

Modelo N° 4 Excavación en herradura sometida a un campo de esfuerzos bidimensional; CEC = 6.51 y CET = -0.11

MÉTODO EXPERIMENTAL

Comprende: Materiales utilizados, Construcción de los modelos, Equipo experimental, Determinación del valor de franja, Validación del método y Estudio de modelos fotoelásticos.

(a) Materiales utilizados

Es la resina sintética poliéster, de alta sensibilidad óptica, que después de un adecuado tratamiento térmico adquiere propiedades elásticas y mecánicas óptimas.

(b) Construcción de los modelos

En la construcción debe tomarse en cuenta que el "modelo" y el "prototipo" sean semejantes. Las etapas de construcción son: preparación de la resina, vaciado en los moldes, solidificación de la resina, desarme de los moldes y obtención de las dimensiones, calado de las secciones y pulido de las superficies.



Figura 1 Modelos de resina fabricados y utilizados en la Investigación

(c) Equipo Experimental

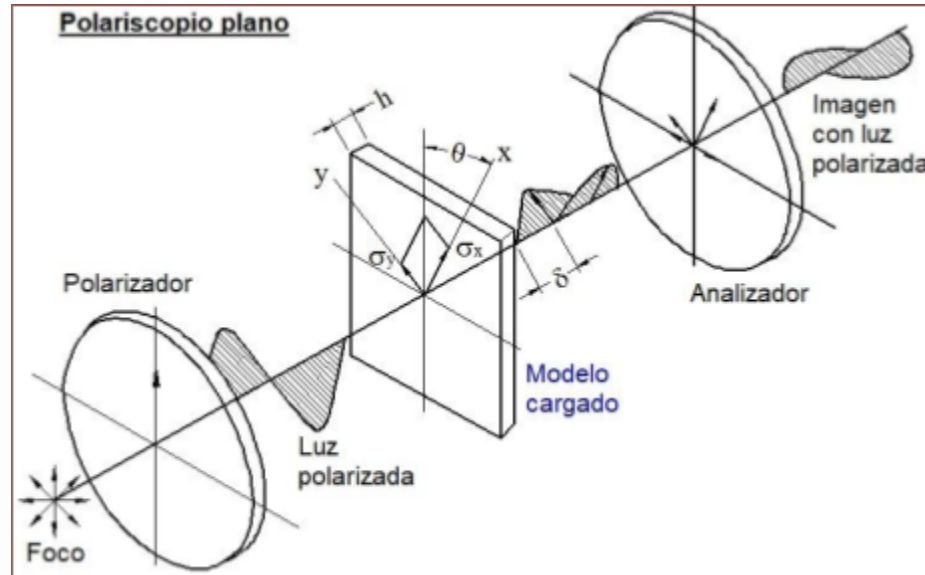


Figura 2 Esquema del Polariscopio Plano

La Figura 2 muestra un esquema del Polariscopio Plano; y con el mismo se obtienen las curvas isoclinas. Pero si se incorporan dos láminas $\lambda/4$ en el Polariscopio Plano; se tiene el Polariscopio Circular, el cual sirve para obtener las isocromáticas.

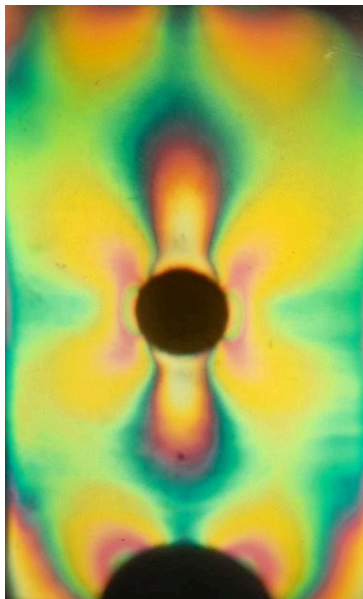


Figura 3 Isocromáticas en una chapa con orificio circular

Bastidor de carga; Una parte importante del equipo experimental es el bastidor de carga.

Medios para fotografías; Cámara fotográfica.

(d) Determinación del Valor de Franja

Los valores de "F" y "f" se determinaron con luz blanca en el Polariscopio Circular.

(e) Validación del Método

Para validar el "método" se utiliza una pieza (chapa) con orificio circular. La Figura 3 muestra las franjas isocromáticas. Se somete a compresión uniaxial. Los valores obtenidos de las concentraciones de esfuerzos, coinciden con los valores teóricos.

(f) Estudio de Modelos Fotoelásticos

En esta oportunidad se tienen cuatro modelos en estudio. La Figura 1 muestra los mismos.

Modelo N° 1; excavación en herradura en campo de esfuerzos uniaxial.

Modelo N° 2; excavaciones múltiples en herradura en campo de esfuerzos uniaxial.

Modelo N° 3; excavación en herradura afectada por una falla sin cohesión, en campo de esfuerzos uniaxial.

Modelo N° 4; excavación en herradura en campo de esfuerzos biaxial.

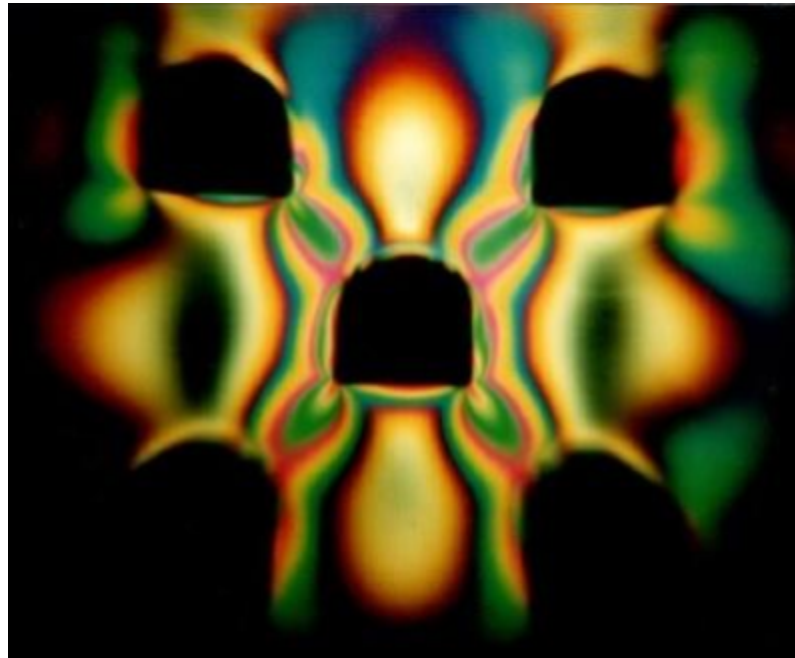


Figura 4 Isocromáticas para el Modelo N° 2

En este caso la excavación del centro cuya forma es idéntica a la del Modelo N° 1, y bajo el mismo campo de esfuerzos presenta concentraciones críticas de 6.80 y de 0.86. Se ve que existe una variación con respecto al Modelo N° 1; lo que implica que las excavaciones vecinas han incrementado el valor de la compresión, de 5.53 a 6.80, y con relación al esfuerzo de tracción, este a disminuido de -0.98 a -0.86 (en valor absoluto)

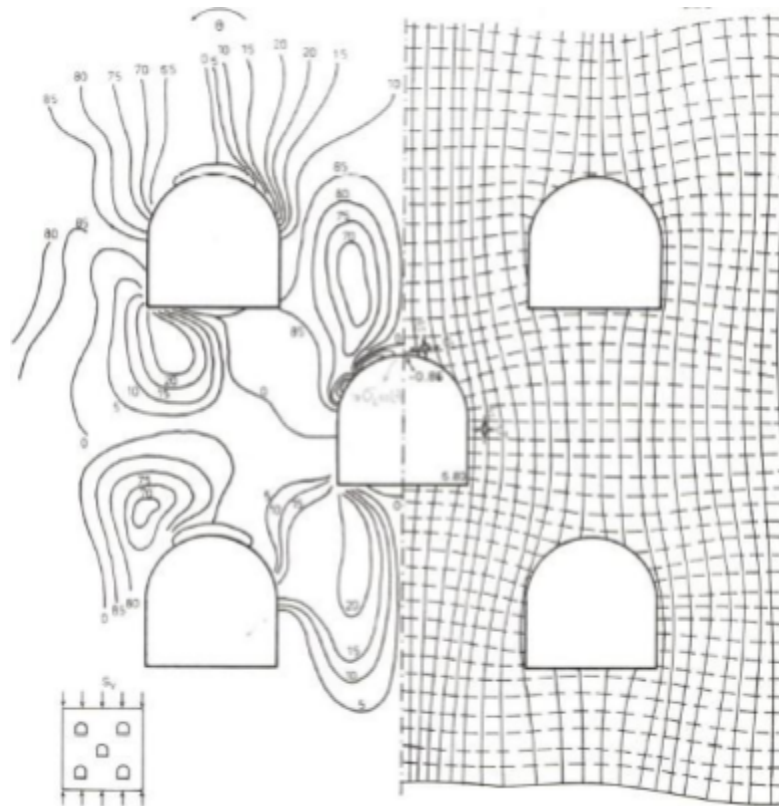


Figura 5 Isoclinas e isostáticas para el Modelo N° 2

RESULTADOS

Tabla 1 Resultados: Concentraciones de Esfuerzos para los cuatro modelos

MODELO	CEC	CET	ESFUERZO APLICADO
1	5.53	-0.98	Compresión uniaxial
2	6.80	-0.86	Compresión uniaxial
3	8.18	-----	Compresión uniaxial
4	6.51	-0.11	Compresión biaxial

CEC = Concentración de Esfuerzos a compresión y CET = Concentración de Esfuerzos a tracción.

Todos las concentraciones de esfuerzos **máximas** mostradas en la Tabla 1, se han determinado en el borde de las excavaciones, aspecto a tomar en cuenta para diseños.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- (a) El método ofrece muchas ventajas frente a otros, para determinar la concentración de esfuerzos; principalmente si tienen formas variadas.
- (b) La concentración crítica de esfuerzos en la "validación" del método, en el punto de intersección entre la pared de la excavación y el eje horizontal reportó un valor de 3.3, y el valor teórico para el mismo modelo en un medio elástico infinito es 3.0; aceptable.
- (c) En el análisis de los modelos, se identificaron zonas de esfuerzos críticos que pueden ser cuantificados, y no se presentaron problemas de borde.
- (d) Si se tiene un campo de esfuerzos no coincidente con los ejes de la excavación; el método podrá aplicarse sin dificultad.
- (e) Actualmente se tienen varios programas o softwares, como son: **FreeCAD**, realiza el modelado 3D es de código abierto y gratuito, que permite crear y modificar objetos tridimensionales de forma fácil e intuitiva; **ReCap Pro**, es un software desarrollado por Autodesk, que permite convertir fotografías en un modelo 3D o dibujo 2D.

Perfil Profesional. –

Título de Ingeniero de Minas de la Facultad Nacional de Ingeniería UTO, 1994. RNI 7534.

Cursos de Posgrado: (a) Especialista en Desarrollo Curricular en la Enseñanza Superior UNED-CEUB, 2005; (b) Maestría en Ingeniería Ambiental Minera UASB-UTO, 2011; (c) Maestría en Recursos Naturales y Medio Ambiente UPC, 2012; (d) Diplomado en Diálogo de Saberes e Investigación Aplicada al Cambio Climático FCAPF-UMSS, 2018.

Actividad docente en pregrado: (a) Carrera Ingeniería de Minas UTO, 1990-1994; (b) Carrera Ingeniería de Minas-Topografía UNSXX, 1994-2023 y en el Área de Tecnología UNSXX con Álgebra Superior y Lineal, 2008-2023.

Actividad docente en posgrado: (a) Programa Diplomado en Gestión Ambiental UTO, Módulo: Estudio de Evaluación de Impactos Ambientales, 2014-2019 (10 versiones); (b) Programa Diplomado en Gestión Ambiental UNSXX, Módulo: Gestión de Residuos Sólidos, 2018.

Entre las publicaciones: se tiene como autor dos artículos publicados en revistas indexadas como SciELO y Geominas; esta última de la Universidad del Oriente de Venezuela. Como coautor en la revista Elsevier (Amsterdam). También se han publicado artículos en las revistas de la UNSXX y del CEUB.

Se cuenta con varias participaciones en Conferencias, Ponencias, etc.



BIBLIOGRAFÍA

1. Billings M.P., 1996. *Structural Geology*. Prentice-Hall, New York. Trad. Castellano 4ta. Ed. Eudeba, Bs. As.
2. Halliday and Resnick, 1999. *Física V.2*. Cia. Editorial Continental, S.A. DE C.V. México.
3. Jemio O., 1987. *Determinación de tensiones en elementos de máquinas, mediante el método fotoelástico*. Tesis de grado. Ingeniería Mecánica FNI-UTO.
4. Moore M., 1974. *Principles of experimental stress analysis*. (HASA) S.A.
5. Morales J.C. *Guía de ensayos fotoelásticos*.
6. Obert y Duvall, 1966. *Rock Mechanics and the design of structures in rock*.
7. Puña J., 1982. *Distribución de tensiones en elementos estructurales y su determinación mediante el método fotoelástico*. Tesis de grado. Ingeniería Civil FNI-UTO.
8. Rodríguez y Llardent, 1982. *Análisis experimental de tensiones por el método fotoelástico*. Universidad Politécnica de Madrid.
9. Rueda A. et al, 2016. *Diseño e implementación de un equipo experimental para análisis de esfuerzos mecánicos, con la máquina de ensayos MTS en materiales isótropos mediante el análisis de imágenes fotoelásticas*. Tesis de Grado Universidad DFA.
10. Timoshenko y Goodier, 1975. *Teoría de la elasticidad*. URMO, S.A. de Ediciones. Traducido el año 1975.

<https://www.researchgate.net/publication/273642261/figure/fig1/AS:654757098180619@1533117665767/Poliariscopio-circular-modificadoMeasurements-Group-1981.png>