

**Evaluación de esfuerzos tangenciales y radiales en cilindros de concreto de paredes gruesas sometidos a presión interna**

Evaluation of tangential and radial stresses on thick walled concrete cylinders under internal pressure

Andrés Palmieri Panesso\*

Andrés Fernando Guzmán Guerrero\*\*

Victor Cantillo Maza\*\*\*

*Universidad del Norte, Colombia*

---

\* Ingeniero Civil, Estudiante de Maestría en Ingeniería Civil, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Norte. *apalmieri@uninorte.edu.co*

\*\* Dr. Ing., Profesor, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Norte. *faguzman@uninorte.edu.co*

\*\*\* Dr. Ing., Profesor, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Norte. *vcantill@uninorte.edu.co*

**Correspondencia:** Andrés Fernando Guzmán Guerrero. Universidad del Norte, km 5 vía Puerto Colombia, Bloque K, Oficina 8-33K. Tel. móvil: 3004284680.

**Origen de subvenciones:** Este trabajo recibió apoyo de Colciencias y la Universidad del Norte. Proyecto "Fluid pressured test to measure tensile strength of concrete (tensilecrete)", cod. 1215-642-39811 ct. 601-2014. Fecha de inicio del proyecto: 9 de julio de 2015; finalización: 9 de septiembre de 2016.

## Resumen

El presente artículo evalúa la relación que se presenta entre el esfuerzo radial y el esfuerzo tangencial cuando un cilindro hueco normalizado se somete a una presión interna ( $p_i$ ). En investigaciones anteriores, los autores reportaron una nueva metodología para generar una falla por tracción en cilindros de concreto huecos. Al ser un método innovador, a fin de comprender la situación de los esfuerzos en la probeta es importante establecer las relaciones entre los esfuerzos y su grado de correlación. En este artículo se evidencia cómo varían los valores de los esfuerzos de acuerdo con los diferentes valores de radio interno ( $r_i$ ) para cilindros huecos. Como resultado de la investigación se encontró que el valor del esfuerzo tangencial obedece al aporte de dos tipos de esfuerzo, es decir, corresponde a la suma entre el esfuerzo tangencial mínimo (presente en la cara externa del cilindro bajo carga), y el valor del esfuerzo radial en el punto de evaluación. El esfuerzo máximo por tracción se presentará siempre en la cara interna del cilindro hueco y siempre a un valor de esfuerzo tangencial mayor al valor aplicado como  $p_i$ .

**Palabras clave:** Concreto, esfuerzo radial, esfuerzo tangencial, presión, tracción.

## Abstract

This article evaluates the relationship between the radial stress and tangential stress when a hollow cylinder is subjected to an internal pressure ( $p_i$ ). In previous research, authors reported a new methodology to generate a tension strength test in hollow concrete cylinders. As a novel method, to understand the stress behaviour on the probe, it is important to establish relationships between these stresses and its correlations. This article reflects how these stresses vary according to the different internal radius ( $r_i$ ) for hollow cylinders. As result of this evaluation, it was found that the value of tangential stress at any point is equal to the minimum tangential stress (it is present at the outer surface of the hollow cylinder) plus the value of the radial stress at the evaluation point. The maximum tensile stress always occurs at the internal surface of the cylinder and at a value for tangential stress higher than  $p_i$ .

**Keywords:** Concrete, pressure, radial stress, tangential stress, tension.

Fecha de recepción: 24 de octubre de 2016  
Fecha de aceptación: 10 de septiembre de 2017

## I. INTRODUCCIÓN

La resistencia a la tracción del concreto equivale de un 10 a 15 % de la resistencia a la compresión [1]-[3]. Debido a su baja capacidad de resistir fuerzas a tracción, cuando estas se presentan en él se generan grietas en la superficie de las estructuras de concreto. Aunque normalmente estas fisuras no causan colapso en las estructuras debido a la presencia de refuerzos de acero, la presencia de este tipo de grietas es relevante en algunas estructuras tales como los pavimentos de concreto, las estructuras masivas (como, por ejemplo, presas), o también estructuras sometidas a ambientes agresivos (ambiente marino o industrial) [4].

La resistencia a la tracción es útil para el diseño de estructuras de concreto, especificar el refuerzo de acero y evitar grietas o fisuraciones debidas a este fenómeno. La resistencia a la tracción se tiene en cuenta a fin de evaluar y prever la aparición de grietas en el concreto que puedan llevarlo a la falla. La resistencia a la tracción se define como la capacidad máxima a la tracción que el concreto es capaz de resistir sin que se presenten grietas continuas en él. Contar con un valor exacto de este parámetro proporcionará una ayuda al momento del cálculo del acero de refuerzo de elementos estructurales en concreto, de modo que se reduciría la cantidad de los aceros de refuerzo al calcularlos con menor incertidumbre [5].

En la práctica de la ingeniería civil esta resistencia a la tracción se toma como nula [6], es decir, se considera que el concreto no aporta ningún tipo de resistencia cuando se generan esfuerzos de tracción por flexión o carga axial. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, el concreto presenta una resistencia a la tracción, la cual es significativa a medida que se incrementa la calidad del concreto ( $f'c$ ). Este valor de resistencia a la tracción incrementaría el factor de seguridad para diseños que involucren esta variable (e. g. prefabricados, presforzados) a la hora de la construcción.

Existen varios tipos de pruebas que se han desarrollado para evaluar la resistencia a la tracción del concreto. Las más comunes son el ensayo de tracción directa [7], el módulo de ensayo de ruptura [8] y la prueba de tracción indirecta [7], [9].

La mayor problemática de los ensayos de tracción directa se da en la forma como se aplican las fuerzas en la probeta mediante dispositivos de agarre, los cuales pueden causar fracturas del espécimen o generar esfuerzos secundarios

por excentricidades de las cargas [10]. Los ensayos para hallar la tracción de forma directa son de una complejidad elevada y resultan demandantes, debido a la gran cantidad de factores que pueden afectar su comportamiento; no obstante, son los métodos que generan una mayor confianza [11].

Para el caso del ensayo de módulo de ruptura (flexión de viguetas), la problemática se presenta en la concentración de esfuerzos que ocurren en la zona de contacto con los apoyos de la vigueta y en la zona de contacto con los aplicadores de carga. Lo anterior origina una distribución de esfuerzos no homogéneos a lo largo del espécimen, lo que genera variaciones en los resultados del 16 % al 19 %, e incertidumbre en los datos [8].

En el ensayo brasilero, a un cilindro de concreto se le aplica una carga lineal compresiva aplicada en la periferia (línea paralela al eje central). Este tipo de carga genera una falla del cilindro de concreto por tensión indirecta (efecto de la relación de Poisson), de manera que se separa el cilindro en dos partes a lo largo de una línea radial. Este tipo de falla genera incertidumbre debido a que se determina la resistencia a la tracción del concreto de forma indirecta al usar fuerzas de compresión concentradas. Para este ensayo debe considerarse el efecto del tamaño de las probetas como las de radio menor a los 150 mm. El tamaño de la probeta (y por tal motivo, el tamaño de los agregados de la mezcla constituyente) afecta los datos obtenidos a través de esos experimentos [12], [13].

No se tiene una decisión final acerca de la relación entre los métodos de módulo de ruptura, tracción indirecta y tracción directa. Según Neville [14], los valores que se obtienen por el método de módulo de ruptura son mayores a los obtenidos por el ensayo de tracción directa. Para el caso del ensayo brasilero, la resistencia a la tracción se considera subestimada [1]; como aspecto favorable la norma ASTM C496 establece que este método es el más simple en su forma de realización hasta el momento [9]. Esta característica favorece el hecho de que se emplee con tranquilidad en la evaluación de propiedades mecánicas de concretos de diferente naturaleza (no convencionales) [15].

En la investigación realizada por Slowik *et al.* se desarrolló un nuevo método asociado a ensayos a gran escala de tracción directa en concreto [16]. En este método, la resistencia a la tracción que obtuvieron fue la mitad de la resistencia obtenida por el método brasilero, y alrededor de un 6% de la resistencia a la compresión.

Zi y Park [2] en el 2008 propusieron un método de prueba indirecta a la tracción denominado “el ensayo de flexión biaxial” (BFT). Con este método se determinó la resistencia a la tracción del concreto sujeto a una condición de carga biaxial isotrópica. La resistencia a la tracción se obtiene mediante la aplicación de la teoría de flexión de placas. Mediante esta investigación se llegó a la conclusión de que los valores arrojados por este método eran mayores a los obtenidos por el método del módulo de ruptura.

Recientemente, en la Universidad del Norte se desarrolló una investigación en la que se implementa el ensayo de determinación de la tracción en concretos por medio de aplicaciones de presión de fluido en la cara interna de cilindros huecos estandarizados. La resistencia a la tracción del concreto se determina mediante el esfuerzo tangencial desarrollado y su incidencia en la falla. En el estudio se reportan valores de resistencia a la tracción de alrededor de 11 % de la resistencia a la compresión [17].

Mediante la presente investigación se le da continuidad al análisis teórico planteado por los investigadores Cantillo y Guzmán en su primera aproximación al problema [17]. En este documento se revisa la influencia del radio interno de la probeta de concreto sobre los esfuerzos generados debido presiones internas, y la consecuente determinación de la resistencia a tracción. Además, se evalúan los esfuerzos tangenciales y radiales, así como sus relaciones a lo largo del ensayo de tracción propuesto. La hipótesis de trabajo consiste en establecer si existe una relación entre los esfuerzos tangenciales y radiales obtenidos a través de la prueba, y cuál es su impacto sobre el resultado final de la resistencia a la tracción del concreto.

## II. METODOLOGÍA

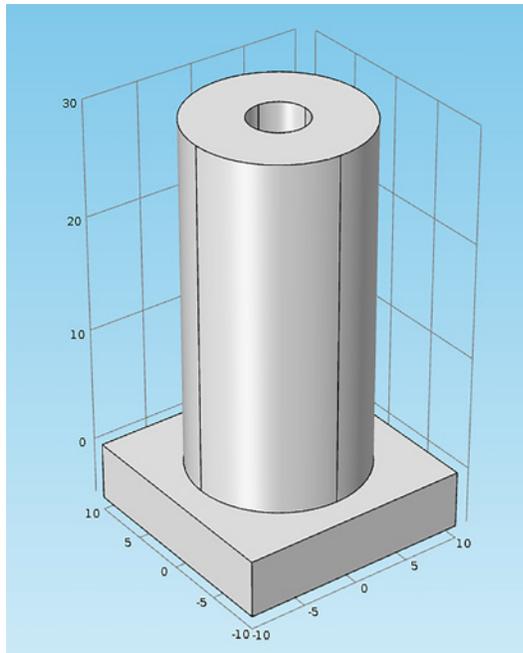
En esta investigación se emplean dos metodologías para el estudio de los esfuerzos tangenciales y radiales en los cilindros de paredes gruesas. La primera metodología que se aplica consiste en modelaciones computacionales del fenómeno mediante el software Comsol (Comsol Inc., 2016), el cual permite, por medio del FEM, conocer el comportamiento de objetos foco de estudio. La segunda metodología aplicada fue del tipo analítico y usó las ecuaciones de Lamé para cilindros de paredes gruesas [17], [18] .

## A. Modelo computacional

Un modelo cilíndrico tridimensional del cilindro de concreto se construye mediante el uso de la herramienta Comsol, tal como se muestra en la Fig. 1.

El modelo cilíndrico correspondiente a los cilindros estándar del ensayo a compresión de concretos [19] tiene una altura de 0,30 m (12 in), y se encuentra apoyado sobre una base metálica de 0,05 m (2 in) de altura.

El modelo cilíndrico en su sección transversal (Fig. 2) consta de un  $r_i$ : radio interno del cilindro de concreto;  $r_o$ : radio externo del cilindro de concreto; y  $r$ : radio al cual se desea conocer el esfuerzo tangencial o radial. Al modelo se le aplicó una  $p_i$ : presión interna a la cual se sometió el cilindro de concreto.



**Figura 1.** Modelo tridimensional del cilindro

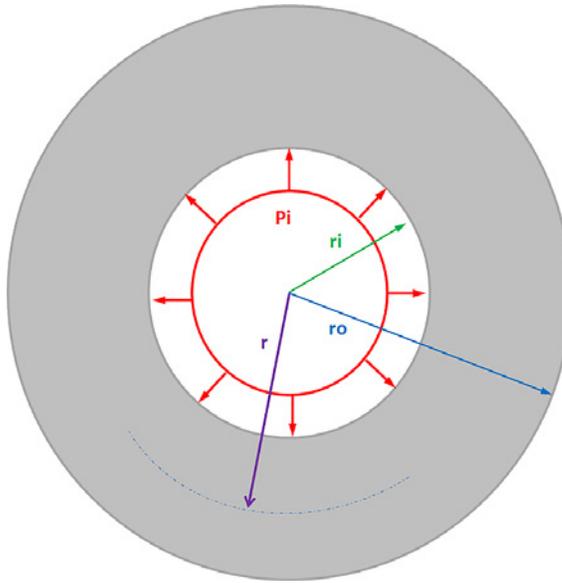
El material que se usa para el modelo se asume como elástico lineal e isotrópico (concreto), modificado a partir de la galería de materiales de la herramienta empleada.

Densidad ( $\gamma$ ): 2400 kg/m<sup>3</sup>

Coefficiente de Poisson ( $\nu$ ): 0,33

Resistencia a la compresión del concreto ( $f'_c$ ): 28 MPa

Módulo de Young (E): 4700  $\sqrt{f'_c}$  MPa [3]



**Figura 2.** Parámetros geométricos [17]

Las condiciones de frontera del modelo incluyen una condición de soporte para el cilindro de concreto, de tal forma que no se cuente con restricciones estáticas paralelas al plano de apoyo (libre expansión) en la frontera inferior del cilindro. Entre la placa base o soporte y el cilindro de concreto se crea una superficie de contacto; esta condición asegura que no se fusionen los bordes de los elementos que comparten un espacio geométrico en el modelo y se garantice la libre expansión. Luego, se aplica un mallado sugerido por el programa. A continuación se revisa que la calidad del mallado sea superior a 0,65 (calidad del mallado 0,7677), como se puede observar en la Fig. 3.

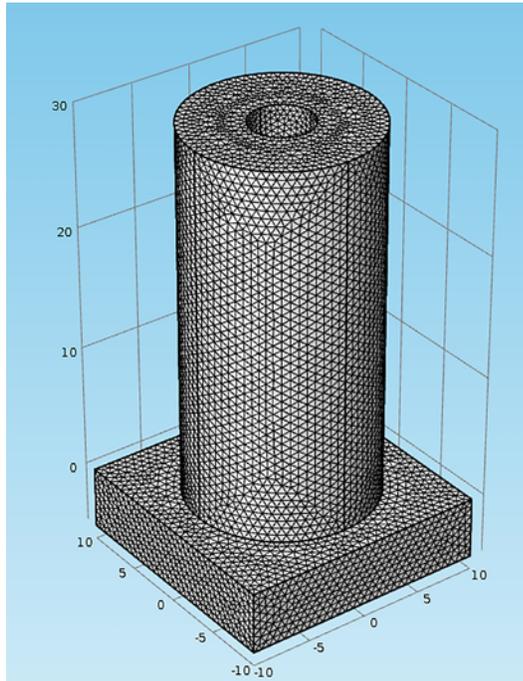


Figura 3. Vista del mallado del cilindro

### Variación del radio interno

Para este estudio se planteó variar el radio interno del cilindro con el objetivo de determinar el impacto de este parámetro en el valor de los esfuerzos tangenciales y radiales, manteniendo siempre la definición de un cilindro de paredes gruesas [18] ( $t > r/10 = 0,75 \text{ cm}$  [0,30 in]), donde  $t$  es el espesor del cilindro y  $r$  es el radio externo del cilindro). Comsol permite establecer un plano de trabajo (*working plane*) a través del cual se extraen los valores de esfuerzos requeridos en cada una de las caras del cilindro. Los esfuerzos se evalúan a la altura media de la probeta a fin de descartar el efecto de condiciones de contorno en los extremos superior e inferior (Fig. 4).

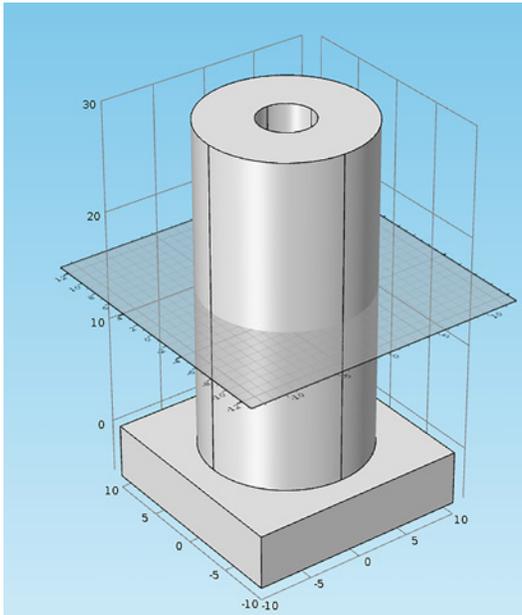


Figura 4. Esquema del plano de trabajo

El radio interno del cilindro empleado para el análisis oscila entre 0,025 m (Fig. 5) y 0,065 m (Fig. 6), con incrementos de 0,005 m.

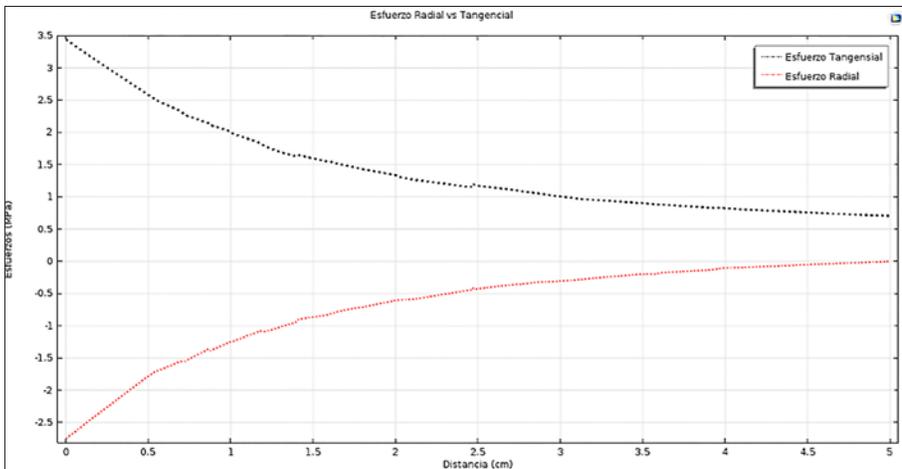


Figura 5. Elementos finitos para un radio interno de 0,025 m (Comsol)

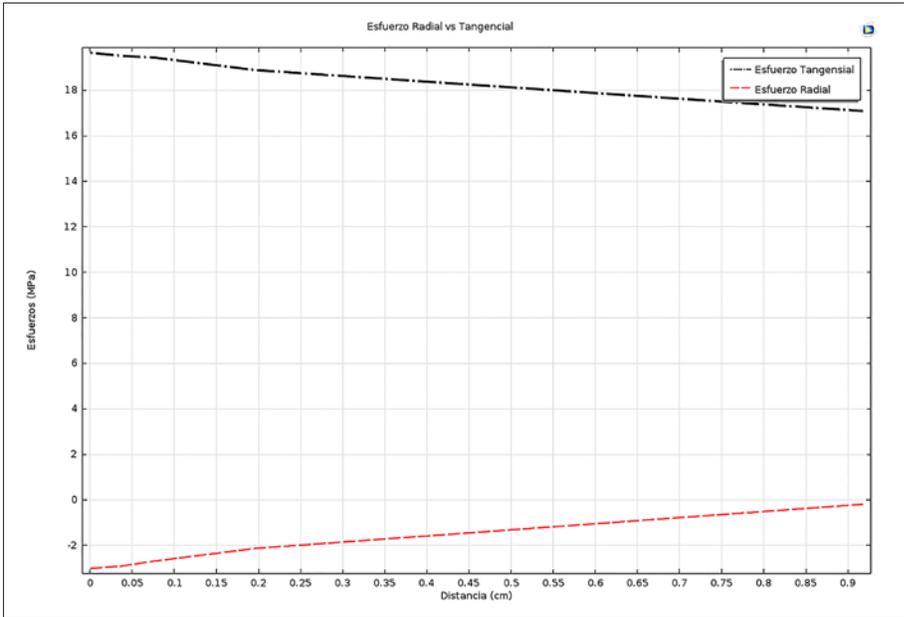


Figura 6. Elementos finitos para un radio interno de 0,065 m (Comsol)

## B. Modelo analítico

Para el análisis analítico se usó el programa Mathcad Prime® (PTC Engineering, 2015). Este programa es versátil para el cálculo de ecuaciones paramétricas y la generación de las respectivas imágenes de comportamiento de las variables del alcance de este estudio. Las ecuaciones utilizadas en este análisis se basan en las fórmulas de Lamé que describen los esfuerzos tangenciales y radiales para los cilindros (ecuación 1) y (ecuación 2) [18], [17].

$$\sigma_r = -P_i; \sigma_\theta = \frac{P_i(r_o^2 + r_i^2)}{(r_o^2 - r_i^2)} \quad (1)$$

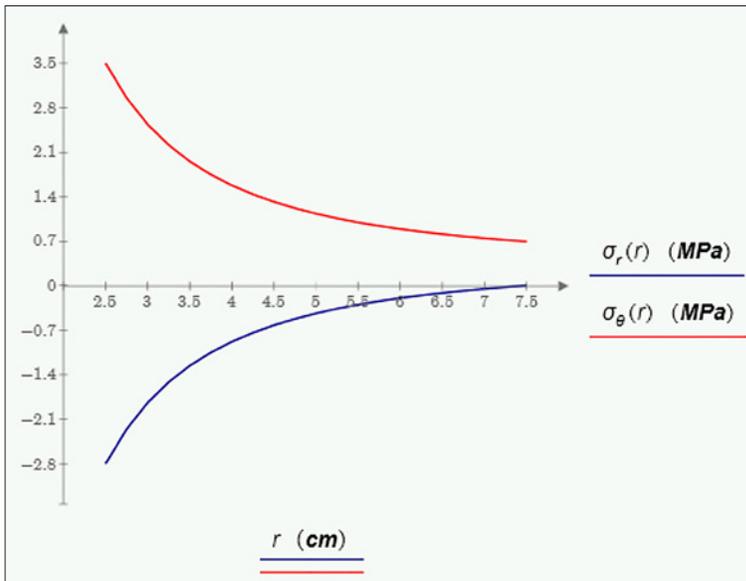
$$\sigma_r = 0; \sigma_\theta = \frac{2P_i r_i^2}{(r_o^2 - r_i^2)} \quad (2)$$

Donde  $\sigma_r$ : esfuerzo radial; y  $\sigma_\theta$ : esfuerzo tangencial. Al realizar procesos matemáticos se pueden obtener las ecuaciones que describen el comportamiento de los esfuerzos radiales y tangenciales a lo largo del espesor del cilindro (ecuaciones 3 y 4).

$$\sigma_r = \frac{P_i r_i^2}{(r_o^2 - r_i^2)} \left( 1 - \frac{r_o^2}{r^2} \right) \quad (3)$$

$$\sigma_\theta = \frac{P_i r_i^2}{(r_o^2 - r_i^2)} \left( 1 + \frac{r_o^2}{r^2} \right) \quad (4)$$

A continuación se pueden apreciar los resultados con el programa Mathcad Prime® (PTC Engineering, 2015) para el radio interno de 0,025 m (Fig. 7), y 0,065 m (Fig. 8).



**Figura 7.** Ecuaciones de Lamé para un radio interno de 0,025 m (Mathcad Prime)

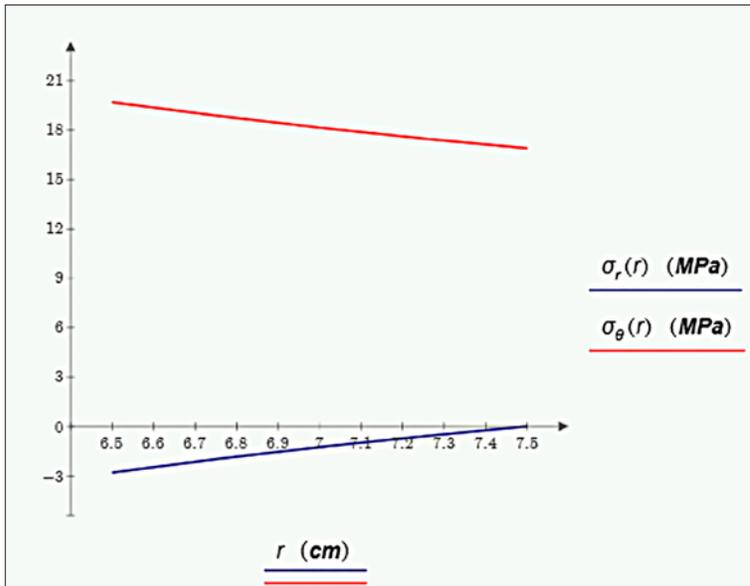


Figura 8. Ecuaciones de Lamé para un radio interno de 0,065 m (Mathcad Prime)

### III. RESULTADOS

Se recolectó en la Tabla 1 la información necesaria para los diferentes radios internos que se plantearon en esta investigación. A partir de esta información se establecen los parámetros  $f_i$  y  $f_o$  que permitirán aportar conclusiones sobre la interacción de las variables de estudio. En la Tabla 1 se encuentran los resultados determinados de forma analítica mediante las ecuaciones desarrolladas en Mathcad Prime.

**Tabla 1.** Resumen de los resultados

	$r_i$ (m)	$r_o$ (m)	$P_i$ (MPa)	$\sigma_{ri}$ (MPa)	$\sigma_{ro}$ (MPa)	$\sigma_{\theta i}$ (MPa)	$\sigma_{\theta o}$ (MPa)	$f_i$	$f_o$
Modelo 1	0,025	0,075	2,800	-2,800	0,000	3,500	0,700	1,250	74.998,5
Modelo 2	0,030	0,075	2,800	-2,800	0,000	3,867	1,067	1,381	74.998,5
Modelo 3	0,035	0,075	2,800	-2,800	0,000	4,359	1,559	1,557	74.998,5
Modelo 4	0,040	0,075	2,800	-2,800	0,000	5,026	2,226	1,795	74.998,5
Modelo 5	0,045	0,075	2,800	-2,800	0,000	5,950	3,150	2,125	74.998,5
Modelo 6	0,050	0,075	2,800	-2,800	0,000	7,280	4,480	2,600	74.998,5
Modelo 7	0,055	0,075	2,800	-2,800	0,000	9,315	6,515	3,327	74.998,5
Modelo 8	0,060	0,075	2,800	-2,800	0,000	12,756	9,956	4,556	74.998,5
Modelo 9	0,065	0,075	2,800	-2,800	0,000	19,700	16,900	7,036	74.998,5

$r_i$  : Radio interno del cilindro de concreto.

$r_o$  : Radio externo del cilindro de concreto.

$P_i$  : Presión a la cual fue sometido el cilindro de concreto.

$\sigma_{ri}$  : Esfuerzo radial en la cara interna del cilindro.

$\sigma_{ro}$  : Esfuerzo radial en la cara externa del cilindro.

$\sigma_{\theta i}$  : Esfuerzo tangencial en la cara interna del cilindro.

$\sigma_{\theta o}$  : Esfuerzo tangencial en la cara externa del cilindro.

Donde  $\sigma_{ri}$  los valores de  $\sigma_{\theta i}$  y fueron calculados usando las ecuaciones de Lamé (ecuaciones 3 y 4), y donde el valor  $r$  de fue tomado como el radio interno de la probeta cilíndrica. Los valores de  $\sigma_{ro}$  y  $\sigma_{\theta o}$  se calculan para un valor de  $r$  igual al radio externo de la probeta. Además, con el fin de establecer la diferencia existente entre los valores del esfuerzo tangencial y el esfuerzo radial se calcularon dos factores  $f_i$  y  $f_o$  (ecuaciones 5 y 6).

$$f_i = \frac{\sigma_{\theta i}}{\sigma_{ri}} \quad (5)$$

$$f_o = \frac{\sigma_{\theta o}}{\sigma_{ro}} \quad (6)$$

Donde  $f_i$ : relación de esfuerzo tangencial sobre el radial para  $r = r_i$ ; y  $f_o$  : relación de esfuerzo tangencial sobre el radial para  $r = r_o$  (para lograr su cálculo se toma un valor menor y muy cercano pero no  $r_o$  de tal forma

que  $\sigma_{r_o} \approx 0$ ). Con estos valores es fácil observar la diferencia entre estos dos valores al ir variando el espesor del cilindro, y cómo  $f_i$  aumenta cuando el valor de  $r$  se acerca a  $r_o$ .

Mediante los datos obtenidos en la investigación se pudo notar que la diferencia de  $\sigma_{\theta_i}$  y  $\sigma_{\theta_o}$  da como resultado el mismo valor que  $\sigma_{r_i}$ . Se realizaron otras pruebas en las que se calculaba el valor de  $\sigma_{\theta}$  en un radio entre el radio interno y el radio externo. Lo anterior arroja como resultado que al obtener su diferencia con el  $\sigma_{\theta_o}$  este da igual al valor de  $\sigma_r$  hallado en el mismo punto. Con esto podemos decir que la variación en el esfuerzo tangencial es igual a la variación en el esfuerzo radial. Dado lo anterior, se puede hacer una ecuación para relacionar estos dos valores (ecuación 7).

$$\sigma_{\theta} = \sigma_{\theta} + |\sigma_r| \quad (7)$$

De la ecuación 7 se colige que el valor del esfuerzo tangencial en cualquier punto del cilindro es igual al esfuerzo tangencial en la cara externa del cilindro más el valor del esfuerzo radial a la distancia deseada.

#### IV. CONCLUSIONES

El esfuerzo tangencial ( $\sigma_{\theta}$ ) es muy sensible a los cambios del espesor del cilindro, tal como se pudo notar a lo largo de esta investigación. El esfuerzo tangencial siempre será mayor que el esfuerzo radial como se expresa en la ecuación 7, lo que da como resultado que las fallas que se presentaran en el cilindro provendrán del esfuerzo tangencial debido a su mayor magnitud.

Cabe señalar que al aumentar el radio interno ( $r_i$ ) disminuye el espesor del cilindro, y los esfuerzos tangenciales y radiales tienden a una configuración similar a la lineal, con una pendiente muy baja para dicha recta. Lo anterior conduce a aseverar que al contar con probetas cuyos espesores sean pequeños se tendrían inconvenientes al predecir la zona de inicio de la falla (pared interna o externa del cilindro). El estudio sugiere que para el ensayo a tracción propuesto se tengan cilindros con paredes gruesas, para los cuales se tiene claridad sobre el lugar de inicio de la falla. De acuerdo con las figuras 5 y 7 se evidencia que, para los casos estudiados, la falla a tracción de cilindros huecos de concreto se generaría de adentro hacia afuera del cilindro.

Otro factor que se debe tener en cuenta es que al tener un menor espesor en la pared del cilindro, la diferencia entre los valores del esfuerzo tangencial ( $\sigma_\theta$ ) y esfuerzo radial ( $\sigma_r$ ) aumentan. Esto se puede evidenciar a través de los parámetros  $f_i$  y  $f_o$  en los que, a medida que se disminuye el espesor, se reportan relaciones desde 1,250 hasta 7,036, como se puede apreciar en la Tabla 1. Debido a esto, se puede tener plena seguridad de que, aunque se dé una afectación mínima del esfuerzo radial sobre el esfuerzo tangencial, este se presenta —en su mayoría— en la cara interna del cilindro, y es de más cuidado al tener cilindros de menor radio interno.

También es posible deducir de la presente investigación que el esfuerzo radial ( $\sigma_r$ ) es independiente del radio interno. Este esfuerzo siempre corresponderá a la presión interna en  $r_i$  (*inside radius*) y cero (0) en  $r_o$  (*outside radius*).

## REFERENCIAS

- [1] Z. Lin, Z. L., Wood, L., "Concrete uniaxial tensile strength and cylinder splitting test," *Journal of Structural Engineering*, vol. 129, n.o. 5, pp. 692--698, 2003.
- [2] G. Zi, H. Oh, S.-K. Park, "A novel indirect tensile test method to measure the biaxial tensile strength of concretes and other quasibrittle materials," *Cement and Concrete Research*, vol. 38, n.º 6, pp. 751-756, junio 2008.
- [3] ACI Committee 318, "ACI 318-14: Building code requirements for structural concrete and commentary", Farmington Hills, United States: American Concrete Institute, 2014.
- [4] J. R. Klepaczko, A. Brara, "An experimental method for dynamic tensile testing of concrete by spalling," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 25, n.º 4, pp. 387-409, abril 2001.
- [5] S. Swaddiwudhipong, H.-R. Lu, T.-H. Wee, "Direct tension test and tensile strain capacity of concrete at early age," *Cement and Concrete Research*, vol. 33, n.º 12, pp. 2077-2084, diciembre 2003.
- [6] Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), Reglamento colombiano de construcción sismo resistente, NSR-10. Bogotá, Colombia, 2010.
- [7] W. Zheng, A. K. H. Kwan, P. K. K. Lee, "Direct tension test of concrete," *Materials Journal*, vol. 98, n.º 1, pp. 63-71, enero. 2001.
- [8] ASTM International, "ASTM C78/C78M-16: Standard test method for flexural strength of concrete (Using simple beam with third-point loading)", West Conshohocken, PA: ASTM International, 2016.

- [9] ASTM International, "ASTM C496/C496M-11: Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens", West Conshohocken, PA: ASTM International, 2011.
- [10] J. G. M. van Mier, M. R. A. van Vliet, "Uniaxial tension test for the determination of fracture parameters of concrete: state of the art," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 69, n.º 2, pp. 235-247, enero 2002.
- [11] G. Rosati, M. P. N. Sora, "Direct tensile tests on concretelike materials: structural and constitutive behaviors", *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 127, n.º 4, p. 364, 2001.
- [12] Z. P. Bažant, J. Ožbolt, R. Eligehausen, "Fracture size effect: review of evidence for concrete structures," *Journal of Structural Engineering*, vol. 120, n.º 8, agosto 1994.
- [13] S. Carmona, "Efecto del tamaño de la probeta y condiciones de carga en el ensayo de tracción indirecta," *Materiales de Construcción*, vol. 59, n.º 294, pp. 7-18, mayo 2009.
- [14] A. M. Neville, *Properties of concrete*, Prentice Hall/Pearson Education, 4a ed., Harlow, England, 2009.
- [15] S. L. Quintero García, L. O. González Salcedo, "Uso de fibra de estopa de coco para mejorar las propiedades mecánicas del concreto," *Ingeniería y Desarrollo*, n.º 20, pp. 134-150, julio 2006.
- [16] V. Slowik, V. E. Saouma, A. Thompson, "Large scale direct tension test of concrete," *Cement and Concrete Research*, vol. 26, n.º 6, pp. 949-954, junio 1996.
- [17] V. Cantillo, A. Guzmán, "Fluid-pressured test to measure tensile strength of concrete," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 26, n.º 4, pp. 776-780, 2014.
- [18] L. S. Negi, *Strength Of Materials*. Tata McGraw-Hill Education, New Delhi, India, 2008.
- [19] ASTM International, "ASTM C39/C39M-16B: Test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens", West Conshohocken, PA: ASTM International, 2016.