

Puesta a punto de celda para ensayo de tensión indirecta Load cell set-up for indirect stress test

G. C. Sosa-Tamayo ^a, A. González-de la Fuente ^a, V. Volpi-León ^a, L. Lizárraga Mendiola ^a, I. E. Castañeda-Robles ^a, L. D. López-León ^{a*}

^a Área Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

Resumen

La resistencia a la compresión de mezclas de concreto se consigue al diseñar sistemas que cumplan con propiedades mecánicas y de durabilidad establecidas por normas nacionales e internacionales. En este trabajo se propone un elemento actuador de carga personalizado, tanto en la parte superior e inferior de la celda para tener mejor distribución de carga en el espécimen y ejercer un apoyo uniforme en la sección de contacto para el ensayo de tracción indirecta. En este proyecto se diseñó y manufacturó un dispositivo que podrá servir como instrumentación de la prensa marca Controls modC-43C04 para dar servicio a probetas, en las cuales el concreto es sometido a esfuerzos de tensión con mayor intensidad, donde se espera que el acero de refuerzo sea el que actúe al absorber estos esfuerzos. A través de las pruebas mecánicas se estableció que la celda cumple con un diseño funcional y con las necesidades de la prensa para la que fue adaptada.

Palabras Clave: Concreto, Resistencia a la compresión, Resistencia a la tracción, Celda de carga, Diseño

Abstract

The compressive strength of concrete mixtures is achieved by designing systems that comply with mechanical and durability properties established by national and international standards. This project proposes a customized load actuator element, both at the top and bottom of the cell, to have a better load distribution in the specimen and exert uniform support in the contact section for the indirect tensile test. A device was designed and manufactured to serve as instrumentation for the Controls modC-43C04 press to test specimens subject to high tensile stress. It is expected that the reinforcing steel will act to absorb these stresses. Mechanical tests established that the cell complies with a functional design and the needs of the press.

Keywords: Concrete, Compressive Strength, Tensile Strength, Load Cell, Design

1. Introducción

La ingeniería civil toma como base primordial el concreto para realizar diferentes proyectos de carácter público y privado, el concreto rodea nuestro día a día, de ahí la importancia de utilizar este material de construcción cumpliendo con las especificaciones técnicas y normativas correspondientes (Nejati et al, 2014). La calidad se puede alcanzar y comprobar mediante diferentes pruebas de laboratorio (Oneschkow, 2016). El realizar estudios preliminares al diseño de elementos estructurales como el concreto y seguir procedimientos de ensayo para control de procesos constructivos son hechos significativos para el desarrollo técnico (Erarslan et al, 2014).

Algunas características destacables de este material es la propiedad de adaptarse a diferentes formas de diseños arquitectónicos; igualmente es resistente a fuerzas de compresión, flexión y tensión, convirtiéndolo en una opción segura y duradera para edificaciones (Chhorn et al, 2018). El uso adecuado del concreto en proyectos de ingeniería depende directamente de la calidad del material, lo cual involucra un método de pruebas y ensayos (Fuentes, 1982).

En términos generales es difícil obtener la resistencia a tensión del concreto en forma directa, por lo que se determina por métodos indirectos, como son análisis matemáticos de predicción al ensayo de tensión por compresión y de tensión por flexión (Moreno et al, 2016).

La resistencia a la flexión podría considerarse una medida indirecta de la resistencia a la tracción del concreto. Es una

*Autor para la correspondencia: luis_lopez@uaeh.edu.mx

Correo electrónico: so319615@uaeh.edu.mx (Guadalupe Camila Sosa Tamayo), alejandro_gonzalez@uaeh.edu.mx (Alejandro González de la Fuente), volpi@uaeh.edu.mx (Valeria Volpi León), mendiolam@uaeh.edu.mx (Liliana Lizárraga Mendiola), ivan_castaneda@uaeh.edu.mx (Iván Erick Castañeda Robles), luis_lopez@uaeh.edu.mx (Luis Daimir López León)

medida de la resistencia a la falla por momento de una viga o losa de concreto no reforzada (Masías, 2018). Los especímenes deben ser rectangulares, su longitud debe ser la distancia entre apoyos más 50 mm como mínimo. La distancia entre apoyos será tres veces el peralte de la viga, estas distancias deben estar marcadas. Las caras laterales de la muestra deben tener un ángulo recto (90°) y estar lisas y libres de imperfecciones (Wang et al, 2016).

La resistencia a la compresión se mide fracturando probetas cilíndricas de concreto en una máquina de ensayos de compresión. La resistencia a la compresión se calcula a partir de la carga de ruptura dividida por el área de la sección que resiste a la carga (NRMCA, 2020). Los resultados de las pruebas de resistencia a la compresión se usan fundamentalmente para determinar que la mezcla de concreto suministrada cumpla con los requerimientos de la resistencia f_c , especificados en el proyecto a realizar (Song et al. 2018). Además, se pueden utilizar para fines de control de calidad, aceptación del concreto o para estimar la resistencia del concreto en estructuras, permitiendo programar las operaciones de construcción (Sarfarazi et al, 2017).

La resistencia a compresión axial es la mayor de las fortalezas del concreto y su propiedad mecánica más apreciada; a pesar de que la resistencia a tensión en muchas ocasiones es tan baja que se desprecia para propósitos estructurales (Krzemień et al, 2015). Sin embargo, es importante ya que se solicita para pronosticar agrietamientos en este material (Moreno et al, 2016).

La aplicación de ensayos de tensión determina las propiedades mecánicas del concreto, enfatizando que nos permite conocer y comprobar la resistencia de este, herramienta que nos posibilita a la elección adecuada del material (Masías, 2018).

La ingeniería civil tiene que ver profundamente con el concreto que es probablemente uno de los materiales más importantes para la construcción, esto se debe a las diferentes ventajas que podemos encontrar en él, ya que es un material con la capacidad de adaptarse a cualquier forma, otra virtud que posee es su gran relación precio-calidad (Su et al, 2017). Algunas de sus características importantes a resaltar son su gran resistencia a movimientos sísmicos (Resan et al, 2020), su fácil uso y su durabilidad, por lo que sus propiedades físicas deben ser precisadas con pruebas mecánicas (Jin et al, 2018a). El uso adecuado del concreto en proyectos de ingeniería depende directamente de la calidad del material, lo cual involucra un método de pruebas y ensayos (Fuentes-Espinoza, 1982).

Las mezclas endurecidas de concreto corresponden a la tercera etapa en la vida del concreto la cual empieza cuando este ha alcanzado un nivel de hidratación suficiente para que la mezcla sea capaz de mantener a los agregados unidos entre sí de manera permanente. Esto se pone a prueba por la resistencia que promete el concreto al cambio de forma por una demanda mecánica (Zhong et al, 2011).

Los ensayos mecánicos comunes empleados en concreto son: ensayo de resistencia a la rotura por compresión, ensayo de resistencia a la flexión y ensayo de tensión por compresión (Menendez et al, 2010).

La resistencia a la compresión de las mezclas de concreto es la referencia más solicitada en el ámbito de la construcción para el diseño de estructuras de concreto y esta se consigue al diseñar con los parámetros, normativas y requerimientos

necesarios del proyecto (Wang et al, 2016). El ensayo de resistencia a la compresión en concreto se realiza aplicando una fuerza axial en especímenes cilíndricos de concreto con la ayuda de una máquina de ensayos de compresión (Attewell et al, 1973). El valor numérico de la resistencia a la compresión se deduce a partir de la carga de rompimiento dividida por el área de la sección que resiste la carga. Las unidades de los resultados se expresan en kg/cm^2 y los requerimientos se establecen en las normas vigentes de cada zona (NRMCA, 2015).

Los resultados de las pruebas de resistencia a la compresión se usan fundamentalmente para determinar que la mezcla de concreto suministrada cumpla con los requerimientos de la resistencia f_c , especificados en el proyecto a realizar. Además, se pueden utilizar para fines de control de calidad, aceptación del concreto o para estimar la resistencia del concreto en estructuras, permitiendo programar las operaciones de construcción (Arioz, 2007).

Es verdad que hay diferentes factores externos que pueden alterar estos resultados, por ello se realiza la prueba en más de un cilindro para poder comparar y en diferentes ocasiones se saca un promedio de estos para tener mayor certeza de que los resultados obtenidos son favorables o en caso de no serlo tomar las medidas pertinentes para que en un futuro la construcción no sufra daños que no se encuentran contemplados (Alhussainy et al, 2019).

En elementos de concreto armado sometidos a flexión como lo son trabes y losas una porción del área de sección transversal está sometida a esfuerzos de tensión; situaciones en las cuales la expectativa es que el acero de refuerzo por flexión actúe con el fin de desarrollar los esfuerzos que compensen las fuerzas externas aplicadas en el elemento (Ye et al, 2012).

Para obtener la tensión en concreto existen ensayos a tensión directa y a tensión indirecta, aunque es importante mencionar que es difícil obtener la resistencia a tensión de manera directa, por lo cual es más común y sencillo determinar la tensión por métodos indirectos (Ghosh et al, 2020).

1.1. Ensayo brasileño

El ensayo de tensión indirecta, “ensayo brasileño” o ensayo de compresión diametral es uno de los más sencillos, simples y representativos de realizar para determinar el máximo esfuerzo de tensión que puede soportar un material antes de romperse (Jin et al, 2018b). El ensayo brasileño surge, al igual que los ensayos de plasticidad de Casagrande, por la construcción de aeropuertos durante la Segunda Guerra Mundial (Lajtai et al, 1969). El problema de Carneiro era la dificultad de estudiar los pavimentos de concreto en Brasil (Sahuinco, 2011). Este ensayo consiste en someter una probeta de concreto de forma cilíndrica a una carga de compresión aprovechada en una banda delgada en toda la longitud de la probeta, provocando un esfuerzo de tensión relativamente uniforme en todo el diámetro del plano de carga vertical. El resultado de la fuerza de tensión ortogonal resultante origina que la probeta falle a tensión (British Standard International, 1983).

2. Diseño del dispositivo

El diseño del dispositivo se realizó basado en celdas para ensayo brasileño comerciales, tomando en cuenta las normas ASTM C-496/C496M, siguiendo un patrón de disposición de elementos y proponiendo un elemento actuador de carga personalizado (barra rectangular de 25.4 mm de anchura), tanto en la parte superior e inferior de la celda para tener una mejor distribución de carga en el espécimen de concreto y ejercer un apoyo uniforme en la sección de contacto para el ensayo de tracción indirecta (pieza 4 y 5 de la figura 5. Ensamble final de la celda). A diferencia de otros dispositivos en el mercado que utilizan una barra de acero superior y una barra de sección rectangular mínima de 50 mm de anchura en la parte inferior de la celda.

Como resultado se obtuvo un despiece del dispositivo contando con las características de cada elemento, así como su disposición y posición (figura 1, 2, 3 y 4). El diseño se realizó en un software para diseño industrial (SolidWorks). Se muestra el diseño final modelo en 3 dimensiones del dispositivo (figura 5) donde se observa la propuesta del actuador de acero en la celda personalizada para la prensa marca Controls modelo C-43C04.

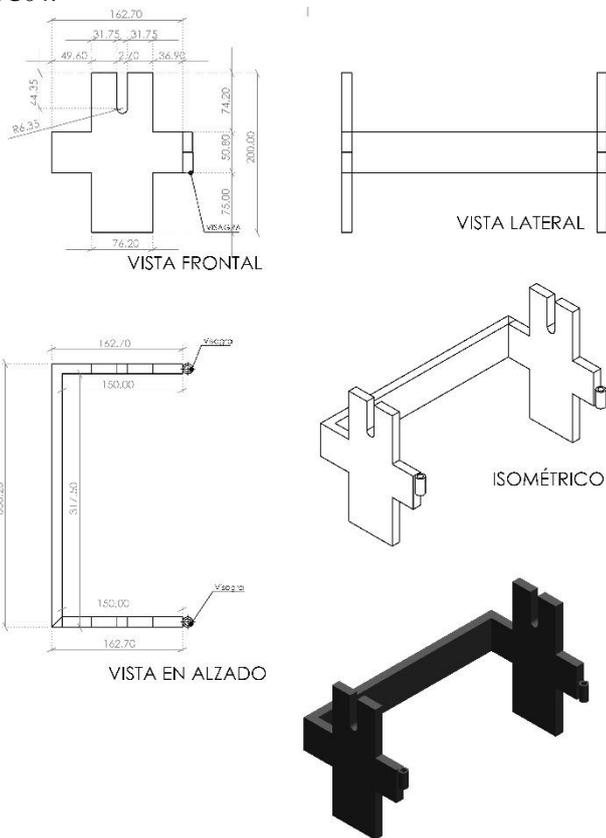


Figura 1: Cuerpo principal de la celda (pieza 1)

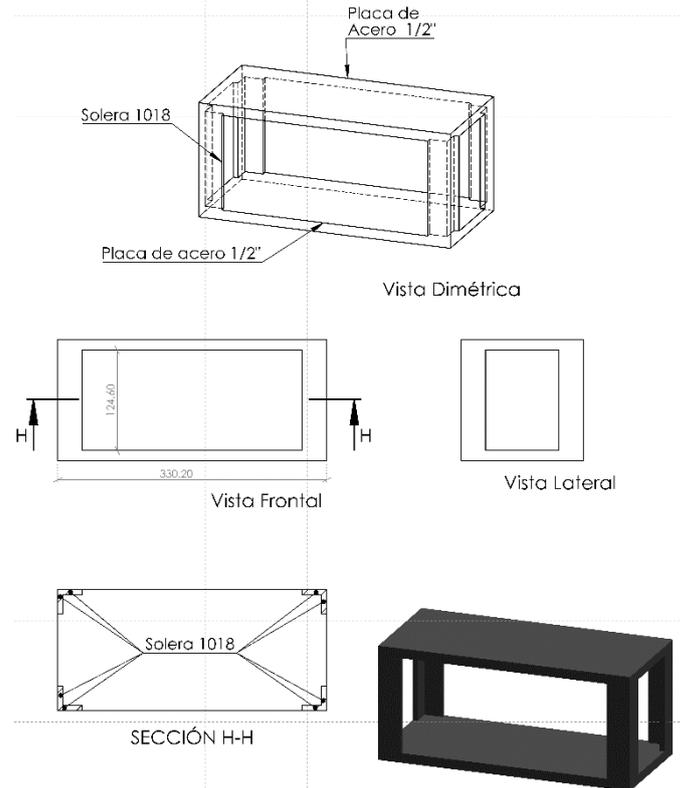


Figura 2: Base de la celda (pieza 2)

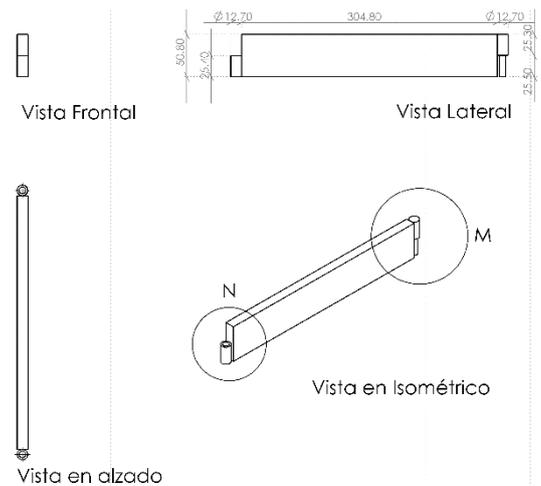


Figura 3: Puerta de la celda (pieza 3)

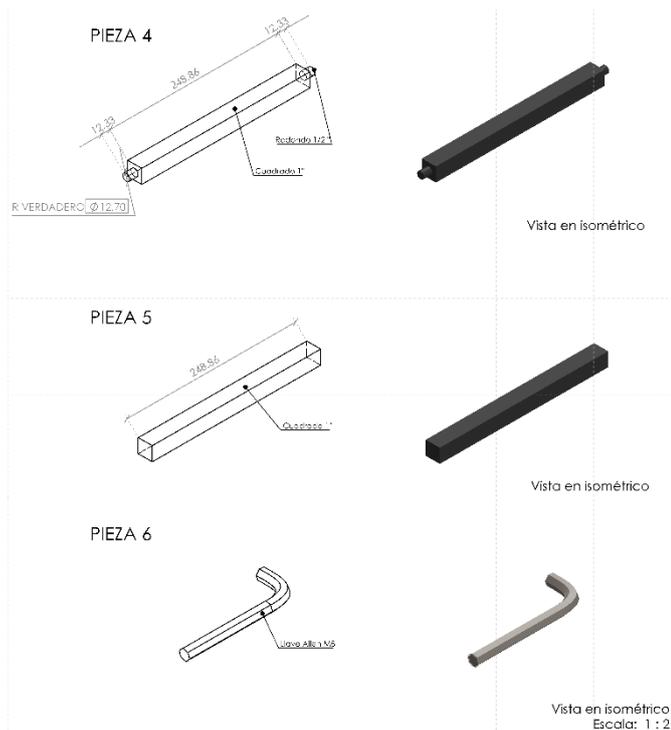


Figura 4: Accesorios de la celda (pieza 4, 5 y 6)

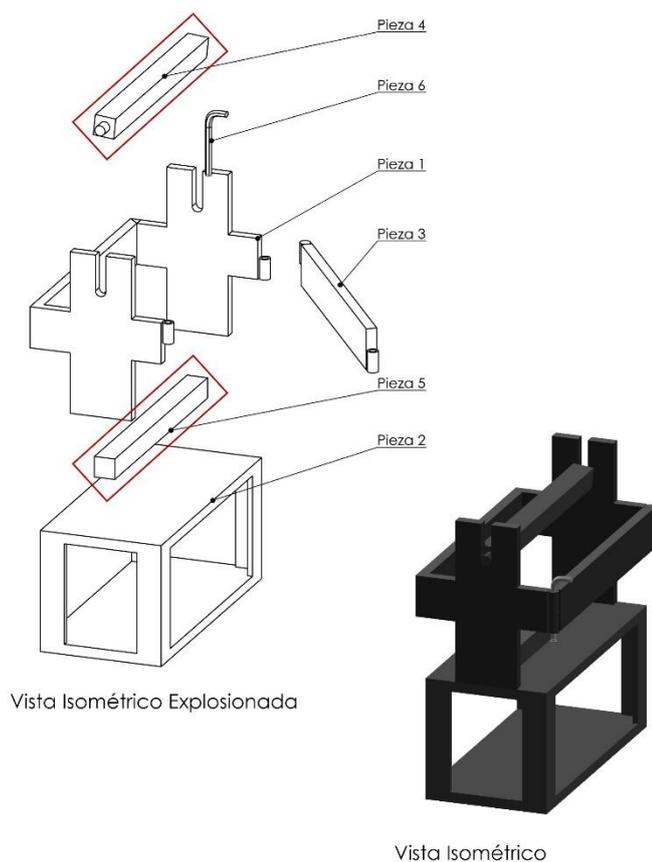


Figura 5: Ensamble final de la celda

previamente descrito, tomando en cuenta las dimensiones de la prensa con las medidas de los elementos del dispositivo, considerando que solo servirá para la prensa marca Controls modelo C-43C04 y para especímenes cilíndricos de concreto de 150 mm de diámetro y 300 mm de alto.

Tabla 1: Materiales de manufactura de la celda

Materiales
Placa de acero al carbono AISI 1018 (½")
Perfil angular de acero al carbono AISI 1018 (2")
Perfil de cuadrado de acero al carbono AISI 1018 (1")
Bisagras de acero al carbono AISI 1018 (½")

4. Diseño de Mezcla de concreto y construcción de especímenes

4.1. Parámetros para el diseño de la mezcla de concreto

El diseño de la mezcla se elaboró mediante el procedimiento descrito por el American Concrete Institute (ACI 211.1-91, 2002) “Práctica Estándar para Seleccionar el Proporcionamiento de Concreto de Peso Normal, Pesado y Masivo”, por el método de volúmenes absolutos, cuyo objetivo principal es el de conocer las características de los materiales para encontrar las proporciones adecuadas de los mismos para lograr los resultados deseados en el concreto. Este diseño se elaboró para un concreto con $f'c = 150 \text{ kg/cm}^2$.

Una vez obtenidos los parámetros necesarios de los agregados pétreos, tomando en cuenta una resistencia a la compresión del concreto $f'c = 150 \text{ kg/cm}^2$, y un revenimiento máximo de 100 mm, se realizó el diseño de la mezcla. En la Tabla 2, se muestran valores utilizados para el diseño de la mezcla de concreto.

Tabla 2: Parámetros para el diseño de mezcla de especímenes de concreto con $f'c = 150 \text{ kg/cm}^2$

Datos para el diseño de mezcla	
Revenimiento (mm)	Máximo 100 y mínimo 25
Tamaño máximo del agregado (mm)	19
Peso específico del cemento (gr/cm^3)	3.15
Peso volumétrico del agregado grueso (gr/cm^3)	1.24
Peso volumétrico del agregado fino (gr/cm^3)	1.24
Peso específico de agregado grueso (gr/cm^3)	2.60
Peso específico de agregado fino (gr/cm^3)	1.89
Módulo de finura	2.91
Porcentaje de absorción del agregado grueso (%)	1.07
Porcentaje de absorción del agregado fino (%)	2.41
Contenido de humedad del agregado grueso (%)	2.09
Contenido de humedad del agregado fino (%)	3.26

3. Materiales de la celda

Los materiales empleados para la construcción del dispositivo se especifican en la tabla 1. La disposición de los elementos se llevó a cabo de acuerdo con el diseño

De acuerdo con las dimensiones de los especímenes de concreto que se elaboraron con dimensiones de 150 mm de diámetro por 300 mm de altura, se obtuvo la siguiente dosificación tabla 3.

Tabla 3: Dosificación de materiales para la elaboración de la mezcla de concreto $f'c=150 \text{ kg/cm}^2$

Relación agua-cemento	Agua (kg/m^3)	Agregado grueso (kg/m^3)	Agregado fino (kg/m^3)	Cemento (kg/m^3)
0.79	190.98	727.01	792.59	259.49

4.2. Construcción de especímenes

Se construyeron especímenes de concreto para cada condición de prueba, 20 especímenes de concreto con las mismas características y con el mismo tipo de molde, cumpliendo con la norma ASTM C 470. La preparación de las probetas se hizo de acuerdo con lo establecido en el manual M-(MMP-0-02-058, 2004), Resistencia a la compresión Simple de Cilindros de Concreto.

El procedimiento de curado tiene un efecto significativo en cuanto a la resistencia y durabilidad del concreto. Es por ello por lo que, al término del proceso de vaciado del concreto en los moldes, los especímenes se dejaron fraguar 24 horas, posteriormente se desmoldaron y se colocaron en una tina de curado por 28 días.

Para el curado por inmersión, se cuidó que la temperatura del agua se mantuviera constante, así como el tirante por encima de los especímenes no fuera menor a 100 mm (NMX-C-021-ONNCCE-2015).

5. Resultados

5.1. Pruebas mecánicas

Diez especímenes se destinaron para prueba de resistencia a la compresión y los otros diez para prueba de resistencia a tensión indirecta. La prueba de resistencia a la compresión se realizó tomando en cuenta la norma (M-MMP-0-02-058, 2004), Resistencia a la compresión simple de cilindros de concreto y la prueba de tensión indirecta se hizo tomando en cuenta la norma (M-MMP-2-02-059, 2004) (Figura 6) resistencia a la Tensión de Cilindros de Concreto. La prueba se realizó con la prensa marca Controls modelo C-43C04 (Figura 7) con una velocidad de $2.45 \text{ kg/cm}^2/\text{s}$ y la aplicación de la carga axial se programó para llevar a la ruptura del espécimen de concreto como lo indica la normativa.



Figura 6: Prueba de resistencia a la compresión



Figura 7: Prueba de tensión indirecta

De acuerdo con los resultados de los ensayos realizados (tabla 4), se pudo observar que la celda propuesta para realizar la prueba de tensión indirecta cumple con los parámetros reportados en literatura para especímenes diseñados con un $f'c=150 \text{ kg/cm}^2$ (Wen-Cheng Liao et al., 2020) (Liao et al., 2020), ya que el valor de los datos de la resistencia a la tracción representa el 7 al 15% de su resistencia a la compresión para cada uno de los especímenes estudiados, es importante mencionar que después de realizar el ensayo mecánico (figura 9) la fractura del cilindro se hizo de una forma uniforme simétrica al aplicar la carga axial en la prensa.

Tabla 4: Parámetros de resistencia compresión vs tracción

Especímen	Resistencia a la compresión (kg/cm^2)	Especímen	Resistencia a la tracción (kg/cm^2)
1	159.3	11	15.4
2	166.2	12	16.4
3	157.8	13	14.3
4	165.3	14	15.6
5	166.6	15	15.8
6	152.2	16	14.8
7	153.2	17	14.6
8	159.4	18	15.0
9	154.2	19	15.2
10	160.0	20	15.8

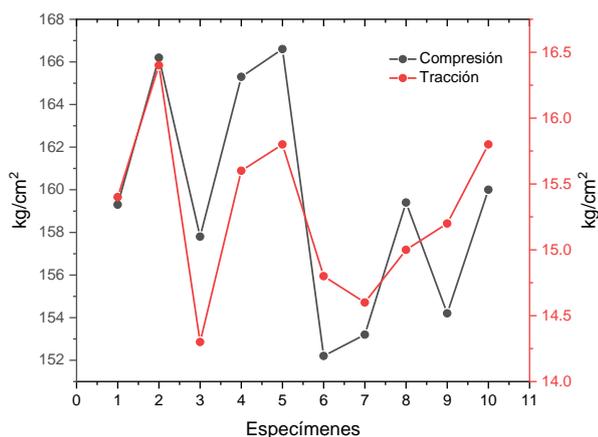


Figura 8: Comparativa ensayo de compresión y tracción

En la figura 8 se puede observar que no existen cambios significativos en los valores de los ensayos de compresión ($150\text{--}166\text{ kg/cm}^2$) y los valores de ensayos de tensión indirecta con el dispositivo personalizado ($15.0\text{--}16.4\text{ kg/cm}^2$), lo que indica que la repetibilidad y reproducibilidad de las pruebas que se realizaron, muestran tener una buena confiabilidad comparados con los reportados en la literatura.



Figura 9: Espécimen después de la prueba de tensión indirecta

6. Conclusiones

La aportación de la celda para pruebas de tracción indirecta personalizado para la realización de ensayos mecánicos para la prensa marca Controls modelo C-43C04 con un sistema actuador en la parte superior e inferior, muestra la aplicación de una carga uniforme en el espécimen de concreto presenta resultados satisfactorios comparados con los reportados en la literatura.

El dispositivo desarrollado será potencialmente apto para ser utilizado en pruebas de tracción indirecta. Para trabajos futuros se propone diseñar el sistema actuador de carga con dimensiones más pequeñas para cilindros de concreto con otras medidas y probar distintos diseños de mezcla para así determinar si estos parámetros influyen directamente en el resultado del ensayo mecánico, ya que esta celda propuesta fue diseñada y probada para una sola dimensión de espécimen de concreto y fue una limitante en este trabajo de investigación.

El diseño y manufactura de la celda para ensayo brasileño permite servir como instrumentación a la prensa marca

Controls modelo C-43C04 para realizar el ensayo de tensión indirecta cumpliendo con la normativa mexicana de pruebas mecánicas en materiales.

El concreto se identifica por tener una resistencia a la compresión alta, no obstante, su resistencia a la tensión es casi nula comparada con la resistencia a la compresión, ya que es aproximadamente de 7% al 15% de la segunda, esta celda con el sistema actuador de carga personalizado en la parte superior e inferior cumple con este parámetro y podrá ser utilizada con la finalidad de encontrar posibles soluciones a servicios o proyectos que se soliciten.

Agradecimientos

Agradecemos al Ing. P. Rebollar-Fragoso por la amable ayuda en la elaboración del diseño gráfico de la celda y a la UAEH por el uso de las instalaciones para desarrollar este proyecto de investigación.

Referencias

- ACI:211.1-91, (2002) - Standard Practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete: American Concrete Institute.
- American Standard for Testing and Materials (2017). ASTM C-496/C496M, Standard Specification for Molds for Forming Concrete Test Cylinders Vertically, USA.
- American Standard for Testing and Materials (2009). ASTM C-470, Standard Specification for Molds for Forming Concrete Test Cylinders Vertically, USA.
- Alhussainy F., Hasan H.A., Sheikh M.N., Hadi M.N.S., (2019). A new method for direct tension testing of concrete. *J. Test. Eval.* 47, 708-718. <https://doi.org/10.1520/jte20170067>
- Attewell, P.B., Farmer, I.W., (1973). Fatigue behaviour of rock, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 10, 1–9. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(73\)90055-7](https://doi.org/10.1016/0148-9062(73)90055-7)
- Arioz, O., (2007). Effects of elevated temperatures on properties of concrete, *Fire Saf. J.* 42, 516–522. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2007.01.003>
- British Standard (1983), Compressive strength of test specimens, British Standards Online, Britain.
- Chhorn, C., Hong, S.J., Lee, W., (2018). Relationship between compressive and tensile strengths of roller-compacted concrete, *J. Traffic Transp. Eng.* 5, 215–223. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2017.09.002>
- Eraslan, N., Alehossein, H., Williams, D. (2014). Tensile fracture strength of brisbane tuff by static and cyclic loading tests, *Rock Mech. Rock Eng.* 47, 1135–1151. <https://doi.org/10.1007/s00603-013-0469-5>
- Fuentes E. F., (1982). Ensayos mecánicos en metales. Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Monterrey.
- Ghosh, S., Dhang, N., Deb, A., (2020). Influence of aggregate geometry and material fabric on tensile cracking in concrete, *Eng. Fract. Mech.* 239, 107321. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2020.107321>
- Jin, L., Miao, L., Han, J. (2018a). Size effect tests on shear failure of interior RC beam-to-column joints under monotonic and cyclic loadings, *Eng. Struct.* 175, 591–604. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.08.092>
- Jin, L., Yu, W., Su, X., Zhang, S., Du, S. (2018b). Effect of cross-section size on the flexural failure behavior of RC cantilever beams under low cyclic and monotonic lateral loadings, *Eng. Struct.* 156 (2018) 567–586, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.11.069>
- Krzemień, K., Hager, I., (2015). Post-fire assessment of mechanical properties of concrete with the use of the impact-echo method, *Constr. Build. Mater.* 96, 155–163. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.007>
- Lajtai, E.Z., (1969). Strength of Discontinuous Rocks in Direct Shear, Department of Geology, University of New Brunswick, USA.
- Liao, W.C., Chen, P.S., Hung, C.W., Wagh, S.K. (2020). An Innovative Test Method for Tensile Strength of Concrete by Applying the Strut-and-Tie Methodology. *Materials.* 13, 2776. <https://doi.org/10.3390/ma13122776>

- Masías, K. (2018). Resistencia a la flexión y tracción en el concreto usando ladrillo triturado como agregado., Universidad de Piura, Facultad de Ingeniería, Perú.
- Menendez, E., Vega, L., (2010). Analysis of the behaviour of the structural concrete after the fire at the Windsor Building in Madrid, *Fire Mater.* 10, 95–107. <https://doi.org/10.1002/fam>.
- M-MMP-0-02-058, (2004), Resistencia a la compresión simple de cilindros de concreto, México.
- M-MMP-0-02-059, (2004), Resistencia a la tensión en cilindros de concreto, México.
- Moreno, E.I., Solis, C., Rómel G., Varela, A.R., (2016). Tensile strength of concrete with high absorption limestone aggregate. *Concr. cem. investig.* 8, 35-45. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-30112016000200035&lng=es&tlng=.
- Nejati, H.R., Ghazvinian, A. (2014). Brittleness effect on rock fatigue damage evolution, *Rock Mech. Rock Eng.* 47, 1839–1848. <https://doi.org/10.1007/s00603-013-0486-4>.
- NMX-C-021-ONNCCE. (2015) *Industria de la Construcción - Cemento para Albañilería (mortero) - Especificaciones y Métodos de Ensayo*, México.
- NRCMA. (2020). *Concrete in practice*. <https://www.nrmca.org/wp-content/uploads/2020/04/35pr.pdf>
- Oneschkow, N. (2016). Fatigue behaviour of high-strength concrete with respect to strain and stiffness, *Int. J. Fatigue.* 87, 38–49. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2016.01.008>
- Resan, S.F., Chassib, S.M., Zemam, S.K., Madhi, M.J., (2020). New approach of concrete tensile strength test. *Case Stud. Constr. Mater.* 12, 347. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00347>
- Sahuinco, M.H.C., (2011). Utilização de métodos não destrutivos e semi-destrutivos na avaliação de pontes de concreto, Tese De Doutorado. Universidade De São Paulo.
- Sarfarazi, V., Ghazvinian, A., Schubert, W., Nejati, H. R., Hadei, R., (2017). “A New Approach for Measurement of Tensile Strength of Concrete”, *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 60, 199–203. <https://doi.org/10.3311/PPci.8328>.
- Song, Z., Frühwirth, T., Konietzky, H., (2018). Characteristics of dissipated energy of concrete subjected to cyclic loading, *Constr. Build. Mater.* 168 47–60. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.076>.
- Su, C., Lin, H., (2017). Mechanical performances of steel fiber reinforced high strength concrete disc under cyclic loading, *Constr. Build. Mater.* 146, 276–282. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.090>.
- Wang, W., Wang, M., Liu, X., (2016). Study on mechanical features of Brazilian splitting fatigue tests of salt rock, *Adv. Civ. Eng.* 25, 436. <https://doi.org/10.1155/2016/5436240>.
- Ye, J.H., Jeng, D.S., (2012). Response of porous seabed to nature loadings: waves and currents, *J. Eng. Mech.* [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0000356](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000356).
- Zhong, H., Lin, G., Li, X., Li, J., (2011). Seismic failure modeling of concrete dams considering heterogeneity of concrete, *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 31, 1678–1689. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2011.07.001>.