

DETERMINACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL HORMIGÓN FC'30 MEDIANTE MÉTODOS EXPERIMENTALES Y NUMÉRICOS (MEF)

Luis Alberto Laurens Arredondo^{1,2}, Juan Vilches Tapia¹, Juan Figueroa Meriño¹, Wilmer Romero³ Díaz

¹ Centro de Innovación en Ingeniería Aplicada (CIIA), Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Universidad Católica del Maule, 3480112, Talca, Chile. Mail: jvilches@ucm.cl, jfigueroa@ucm.cl

² Candidato a Doctor en Ciencias de la Ingeniería, Universidad Nacional Experimental Politécnica Antonio José de Sucre, Venezuela. Mail: llaurens@ucm.cl

³ Universidad Católica Andrés Bello (Extensión Guayana), Puerto Ordaz, Venezuela. Mail: profesorwilmer@gmail.com

Recibido (24/01/19), Aceptado (01/06/19)

Resumen: En los últimos años se ha incrementado la industria de la construcción a nivel mundial, potenciado por el desarrollo económico de los países, en donde sin duda el hormigón es el material más usado [1], por lo que se hace relevante estudiar las características y el comportamiento de este material en distintas condiciones. Dentro de las propiedades mecánicas destaca la tenacidad, que se puede entender como la capacidad de un material de absorber energía antes de fracturarse. En la actualidad existen distintos ensayos especializados, tanto destructivos como no destructivos, así como directos e indirectos, que sirven para determinar este valor de la tenacidad. El presente estudio de investigación desarrolla una metodología alternativa a los procedimientos clásicos para la estimación de la tenacidad antes mencionada, todo esto a través de la utilización de herramientas computacionales que utilizan el método de elementos finitos, para predecir de forma virtual el comportamiento de una probeta de hormigón fc'30, validando los resultados con datos experimentales. Los resultados encontrados para la tenacidad a la fractura con la metodología propuesta arrojaron valores que coinciden con la literatura revisada.

Palabras Claves: Hormigón, M.E.F, Tenacidad, ASTM C39, ASTM 469

DETERMINATION OF MECHANICAL BEHAVIOR OF CONCRETE FC'30 THROUGH EXPERIMENTAL AND NUMERICAL METHODS (FEM)

Abstract: In recent years, the construction industry worldwide has increased, boosted by the economic development of the countries, where concrete is undoubtedly, the most used material [1], so it becomes relevant, to study the characteristics and the behavior of this material in different conditions. Within the mechanical properties, toughness stands out, which can be understood as the capacity of a material to absorb energy before fracturing. At present, there are different specialized tests to determine this value of toughness. These tests can be both destructive and non-destructive, as well as direct and indirect. The present research work develops an alternative methodology to the classical procedures for the estimation of the toughness, through the use of computational tools that use the finite element method to predict, in a virtual way, the behavior of a specimen of concrete fc'30. The results were validated with experimental data. In conclusion, it was found that the proposed methodology yields values for fracture toughness that coincide with the literature reported.

Keywords: Concrete, F.E.M, Toughness, ASTM C39, ASTM 469.

I. INTRODUCCIÓN

El hormigón es un material complejo que ha sido usado a escala global por décadas. Su componente principal es el cemento, pero usualmente se le adicionan distintas proporciones de agregado de varios tipos, aditivos químicos y agua [2]. Todo esto da como resultado la existencia de distintos tipos de concretos que presentan diferentes comportamientos mecánicos que son altamente influenciados por las características y procedimientos de mezcla. Esto hace que el estudio de este comportamiento tenga un grado de complejidad tal, que sea necesario recurrir a hipótesis para predecirlo. Dentro de este comportamiento mecánico, se encuentra la tenacidad, que según las teorías de mecánica de fractura, puede ser considerada como la energía de deformación total que es capaz de absorber o acumular un material antes de alcanzar la fractura [3].

En 1956 Irwin propone una modificación al modelo de fractura de Griffith, de forma tal de hacerlo más conveniente para resolver problemas contemporáneos de ingeniería. En su propuesta, Irwin define el concepto de tasa de liberación de energía “ G_f ”, como la medida de energía máxima que puede disiparse en una unidad de área de grieta, de la cual forman parte la densidad de energía de fractura superficial del material “ γ_0 ” y la

densidad de disipación plástica “ γ^P ” por unidad de área.

$$G_f = \gamma^0 + \gamma^P \quad (1)$$

Cuando un sólido está sometido a una fuerza exterior monótona y creciente se desarrolla un trabajo que se almacena en forma de energía de deformación, cuando esta alcanza la magnitud de γ_0 , el material se separa en dos partes liberando la energía en forma de fractura, para luego relajar inmediatamente las tensiones.

Para el caso particular de materiales frágiles, es decir, cuando no se desarrollan mecanismos plásticos de fractura ($\gamma^P=0$), el trabajo total se gasta en separar dos planos atómicos (fractura frágil). Esta energía puede expresarse como:

$$G_f = \frac{W_f}{A_f} = \int_0^\delta \sigma \cdot d\delta \quad (2)$$

En donde A_f es el área de la sección transversal de la geometría en estudio y el trabajo w_f , es la energía necesaria para la propagación de las grietas por el sólido, por lo que una forma cualitativa de obtener los datos de la Ec.2, es a través del área bajo la curva, como se puede apreciar en la figura 1, en donde u es la deformación o compresión de la probeta.

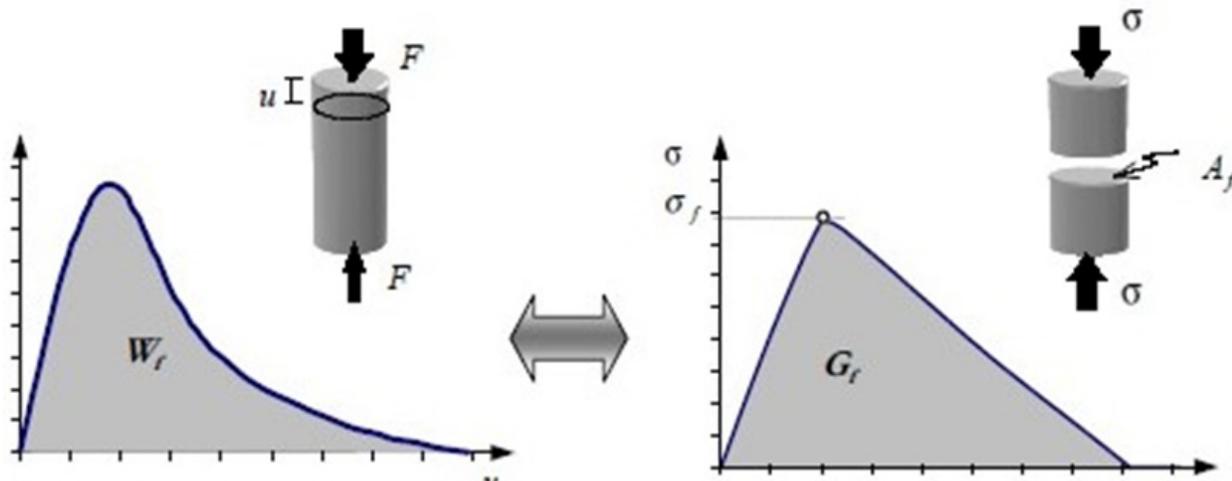


Fig. 1 Forma esquemática de la obtención de energía de fractura. [4]

Para el caso del hormigón, pese a tener niveles bajos de tenacidad, no es considerado totalmente frágil. Este tipo de material desarrollan grietas de tamaño subcrítico que preceden al fallo final.

El resultado de estas grietas es un comportamiento no lineal del material, lo que hace que el procedimiento de análisis tradicional de la resistencia mecánica resulte inadecuado, dado que a menudo es dependiente del tamaño, debido a que la deformación no lineal está causada no tanto por la plasticidad como por el agrietamiento secundario mencionado anteriormente [4][5].

Tradicionalmente para el estudio del comportamiento mecánico del hormigón se realizan ensayos destructivos, los cuales suministran unos resultados que luego de ser interpretados y analizados permiten conocer las características del material. Dentro de estos ensayos destructivos podemos citar a procedimientos de normas americanas como el ASTM C39: “Determinación de la resistencia a la compresión de probetas cilíndricas de concreto” [6], y al ASTM C469: “Determinación del módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson en probetas cilíndricas” [7], así como también procedimientos de normas europeas UNE 83515 (ensayo Barcelona):

Determinación de la tenacidad y resistencia residual del concreto [8], NTL 346/90 (ensayo brasileño o tracción indirecta): Determinación de la resistencia a compresión diametral de mezclas bituminosas [9].

Todos estos ensayos requieren, no solo largos periodos de preparación, sino también la inversión de varios recursos económicos en equipos especializados para realizar dichas pruebas, lo cual en muchos casos se convierte en un impedimento que no es fácilmente franqueable. No obstante, gracias al avance de las herramientas computacionales y el desarrollo de disciplinas como la mecánica de fractura, hace posible que se planteen nuevas estrategias para la predicción del comportamiento de los distintos materiales [10] [11].

Este enfoque se superpone a otros métodos indirectos de más reciente creación como la utilización de ultrasonido para la medición de la resistencia mecánica del concreto [12] y el de medición de frecuencia de resonancia para la estimación del módulo de Young dinámico [13], ya que no poseen los problemas causados por la heterogeneidad de la conductividad ultrasónica.

Dentro de las herramientas computacionales más utilizadas en la actualidad se encuentra el modelamiento de elementos finitos que ha sido comúnmente utilizado para predecir y verificar el comportamiento de estructuras de diversos materiales. Estudios basados en hormigones livianos han demostrado un buen acercamiento entre la simulación y los resultados experimentales [14].

Algunos experimentos han sido conducidos para verificar la influencia del módulo de Elasticidad y de la compacidad del hormigón en el comportamiento mecánico. El modelo numérico, permite estudiar el comportamiento mecánico del hormigón liviano, y los datos experimentales son necesarios para comparar y validar el modelo [15]. Diversos estudios han demostrado que los modelos de elementos finitos permiten simular los modos de falla experimentados en las pruebas, así como varias comparaciones con los experimentos han demostrado la validez de los modelos de elementos finitos [16].

En el presente trabajo de investigación se pretende desarrollar una metodología, distinta a las que ya están presentes en la actualidad, que sirva de método alternativo para la estimación de la tenacidad a la fractura del hormigón G25(Nch170-2016), para ello se utiliza el método de elementos finitos, el cual es rápido, de bajo costo, sin la aplicación de un método destructivo específico. Para ello se propone realizar los ensayos ASTM C39 y ASTM C469 de forma experimental y replicarlos de forma virtual con la ayuda del programa Ansys workbench V19.2, el cual es uno de los softwares comerciales más utilizados en este rubro. A través de este programa se puede predecir la deformación que sufriría una probeta del material en estudio y posteriormente determinar la energía necesaria para la expansión de

grietas en este material con la gráfica fuerza vs deformación [17].

II. DESARROLLO

Fase Experimental

Ensayo ASTM C39

Para obtener los valores experimentales del comportamiento mecánico a compresión en materiales frágiles se utilizó el procedimiento de la norma ASTM (American Society for Testing and Materials) que ha establecido ensayos normalizados que garantizan resultados confiables. Para el caso de la aplicación de esfuerzos uniaxiales a probetas cilíndricas de concreto se usa la norma ASTM C39. Este ensayo consiste básicamente en la aplicación de una carga de compresión axial, a una tasa predeterminada, a cilindros moldeados enteramente de una mezcla de concreto (hormigón fc'30), la cual para este estudio se utilizó una mezcla que se detalla en la tabla I. La fuerza de compresión del espécimen es calculada al dividir la carga máxima lograda durante la prueba y el área calculada del espécimen. Los resultados obtenidos en este ensayo dependen del tamaño y forma del espécimen, así como el mezclado, amasado, moldeado, edad, temperatura, humedad, curado y vibrado.

Tabla I. Proporción de mezcla para un fc'30 para 1 m³.

Ítem	Cantidad
Cemento Portland	406 kg.
Árido Grueso (Gravilla)	940 kg.
Árido Fino (Arena)	826 kg.
Agua	177 lts.
Plastificante (Melment F10)	2,03 kg.

Para la realización de los ensayos experimentales se utilizó una prensa marca Pinzuar, modelo PC-42, con capacidad máxima de 2000 kN, la cual posee un sistema de adquisición de datos que permite la exportación de los resultados obtenidos directamente a MS Excel, para facilitar su visualización y análisis. Estos ensayos fueron realizados con una velocidad promedio de 0.28 Mpa/s. Luego se prepararon probetas encofrando la mezcla en moldes cilíndricos de acero con dimensiones internas de 300mm x ϕ 150mm, como se puede apreciar en la figura 2. Todo esto siguiendo las recomendaciones de la norma ASTM C 192 y teniendo presente que el diámetro final entre ellas no difiera más del 2%.



Fig.2 Proceso de compactado de la mezcla de hormigón en el encofrado metálico.

Con el mismo amasado preparado anteriormente, se realizó la prueba del cono de Abrahms (Fig.3), que consiste en rellenar un recipiente en forma de cono, compactando o apisonando en tres capas con 25 golpes en cada una de estas capas, para luego levantar este sobre una placa húmeda no absorbente y controlar la expansión diametral de la masa del cono y el tiempo de fluencia. El resultado arrojó un descenso de 3,5 cm del cono, lo que cumpliría el rango admisible de un $f_c'30$ cono 5 (± 2).



Fig.3 Prueba del cono Abrahms.

Las primeras 24 hrs de las probetas cilíndricas permanecieron en los moldes metálicos y posteriormente se introdujeron a un tratamiento de curado, el cual consistió en mantener el hormigón bajo unas condiciones climáticas controladas de 25°C promedio y 30% promedio de humedad relativa, de tal modo de asegurar que el proceso de hidratación del cemento fuese continuo

durante el mayor tiempo posible, con el fin de que alcanzara su máxima resistencia y durabilidad, así como también fuese más impermeable y se redujera su riesgo de fisuración espontánea.

El desmolde de las probetas se realizó 2 hrs después de cumplirse el curado de 28 días, según lo recomendado por la norma ASTM C39, para luego proceder a colocar el primer espécimen en la placa inferior de la máquina de ensayo a compresión, procediendo a colocar la placa rectangular y centrar ambos de acuerdo a la placa esférica, esto es, centrada con la carga, como se muestra en la figura 4, y verificando que el dispositivo se encontrara en cero antes de iniciar la prueba.



Fig.4 Probeta de Hormigón en montaje de prensa.

La carga fue aplicada hasta que la probeta falló, y se registró el valor máximo de la carga soportada por el espécimen, así como también se indicó el tipo de falla ocurrida. Luego se calculó la resistencia a la compresión de cada uno de los especímenes, al dividir la carga máxima soportada durante la prueba entre el promedio de las áreas obtenidas al medir ambos diámetros (inferior y superior). Los datos obtenidos se pueden apreciar de forma simplificada en la figura 5 y la tabla II.

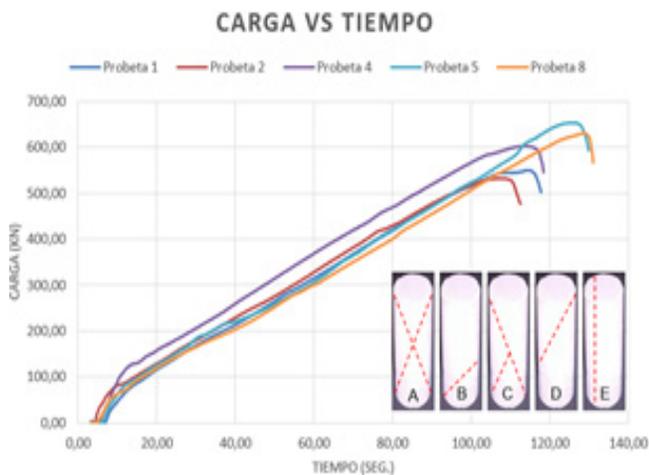


Fig. 5 Resultados obtenidos para las probetas de hormigón. Abajo a la derecha se muestra el tipo de falla.

Tabla II. Resultados obtenidos para las probetas de hormigón.

Resultados de ensayo ASTM: C39					
Característica	No. De la Probeta				
	1	2	4	5	8
Peso (kg)	12,6	12,6	12,6	12,9	12,8
Densidad (kg/m ³)	2.423	2.423	2.392	2.416	2.427
Altura (mm)	299	297,8	300,5	299,8	300,8
Diámetro (mm)	148,8	149,1	149,4	150,6	149,4
Área (mm ²)	17390	17460	17530	17813	17530
Edad (días)	28	28	28	28	28
Carga (kN)	549,3	532,8	603,0	653,3	631,0
Resistencia Real (Mpa)	31,59	30,51	34,40	36,68	36,00
Tipo de Falla	E	E	C	D	C

Ensayo ASTM C469

La realización del ensayo ASTM C469 proporciona la razón entre el esfuerzo y la deformación del concreto, así como también la razón entre la deformación lateral y longitudinal de un espécimen de concreto endurecido, a cualquier edad y condiciones de curado que se designen. Estos valores de deformación fueron obtenidos utilizando transductores lineales de desplazamiento adicionales a la celda de carga de la prensa hidráulica utilizados anteriormente para dimensionamiento de concreto, y para determinar esfuerzos por medio de deformaciones observadas, como se puede apreciar en la figura 6. Los valores de módulo de elasticidad obtenidos de esta forma son usualmente menores que los módulos derivados de una aplicación rápida de carga (como cargas dinámicas o sísmicas) y usualmente son

mayores que los obtenidos por aplicación lenta de carga o de duración extendida.

Los especímenes cilíndricos de prueba utilizados son de la misma amasada y encofrado utilizado en el ensayo anteriormente descrito, siguiendo las recomendaciones de la norma ASTM C 192. Antes de su ensayo se aseguró que todos los especímenes o probetas utilizadas tuvieran las caras superior e inferior perpendiculares a la superficie longitudinal, para ello se realizó refrentado de las caras.



Fig. 6 Montaje de probeta de hormigón.

En el desarrollo del procedimiento, primeramente, se realizó la medición del diámetro y longitud de un espécimen cilíndrico de hormigón. Luego, conociendo la resistencia última promedio por el ensayo anterior, se colocó al espécimen de prueba el aparato de medición (compresómetro extensómetro) y se ajustaron los diales para tomar las deformaciones para determinar la curva esfuerzo deformación, así como también se determinó el módulo de elasticidad al llegar al 40% de la resistencia última.

Finalmente, para el módulo de Poisson, se registraron las deformaciones transversales en los mismos puntos que se requirió para el módulo de elasticidad.

Con estos datos recopilados, se calculó los módulos respectivos mediante el método de mínimos cuadrados, ya que este representa la relación entre la deformación transversal unitaria y la deformación longitudinal unitaria del elemento en estudio. En la gráfica 6, 7, 8 y 9, así como en la tabla 3 se pueden apreciar el resumen de los resultados obtenidos.

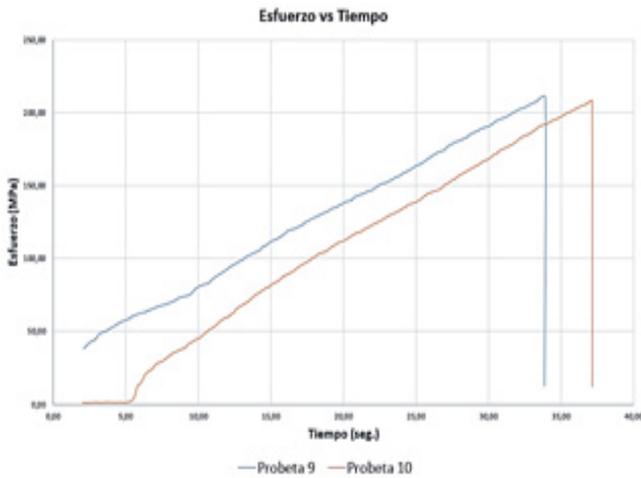


Fig. 6 Valores de esfuerzos alcanzados por las probetas

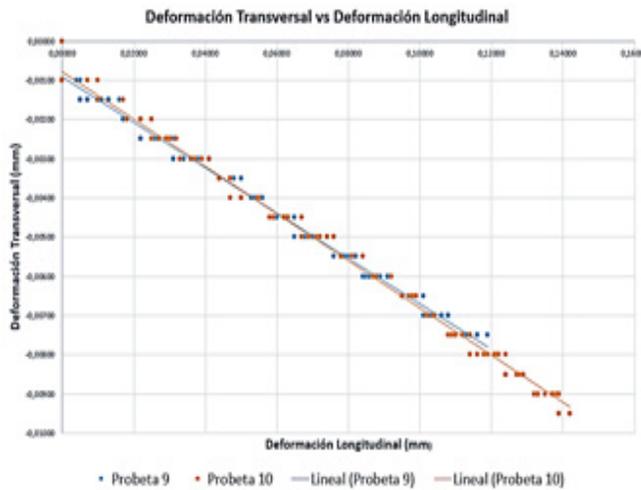


Fig.7 Valores de deformación alcanzada por las probetas.

Tabla III. Resultados obtenidos para las probetas de hormigón

Resultados de ensayo ASTM: C469		
Características	No. De la Probeta	
	9	10
Peso (kg)	12,6	12,5
Altura (mm)	298,3	299,5
Diámetro (mm)	149	148,5
Área (mm ²)	211	208
Edad (días)	28	28
Carga (kN)	210,1	208,2
Esfuerzo al 40% [MPa]	12,10	12,00
Módulo de Elasticidad [MPa]	31 713	33 792
Relación de Poisson	0.18	0.18

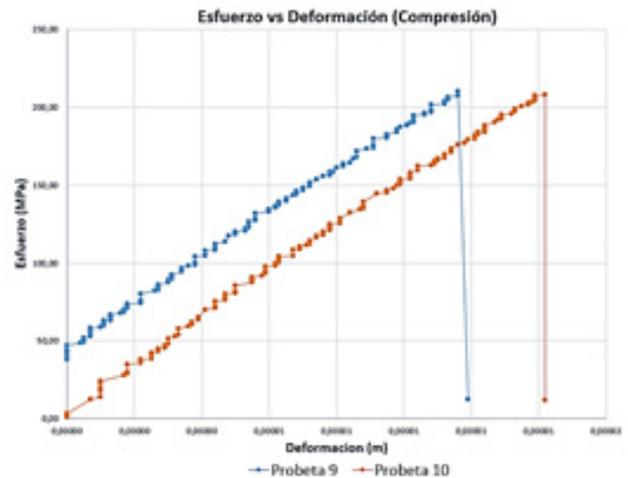


Fig.8 Valores de esfuerzo / compresión alcanzada por las probetas.

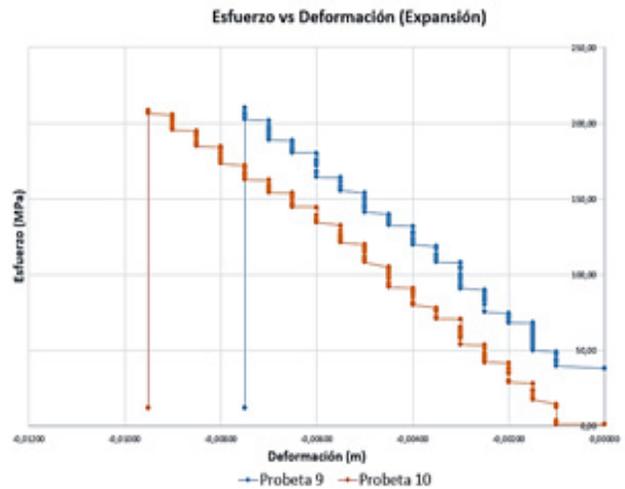


Fig.9 Valores de esfuerzo / expansión alcanzada por las probetas.

Fase Virtual

Con la finalidad de obtener un método alternativo para la determinación de la tenacidad a la fractura del hormigón mediante ensayos rápidos, no destructivos y de bajo costo, es decir, sin la necesidad de realizar pruebas de laboratorios, se realizó la modelación virtual de los ensayos C39 y C469 con la ayuda del software de simulación mecánica llamado Ansys Workbench V19.2, basado en el método de elementos finitos (MEF). Para ello se siguió el procedimiento mostrado en la figura 10, en donde se modeló una probeta de dimensiones 300mm x φ150mm. La malla utilizada para la discretización es de tipo tetraédrico tridimensional, como se puede apreciar en la figura 11. Este tipo de malla permite la deformación plástica, la generación de fisuras a tracción y a compresión en las 3 direcciones ortogonales, así como permite también considerar las propiedades no lineales del material. Para este mallado se obtuvieron 20.640

elementos para 45.028 nodos. Los materiales utilizados fueron acero estructural para los soportes de la prensa hidráulica y concreto para las probetas, ambos con modelos de material no lineal cuyas características básicas son las presentadas en las tablas 4 y 5. A estos materiales se adecuó a la resistencia máxima a compresión ($f_c'30$).



Fig.10 Procedimiento clásico para simulación mediante MEF

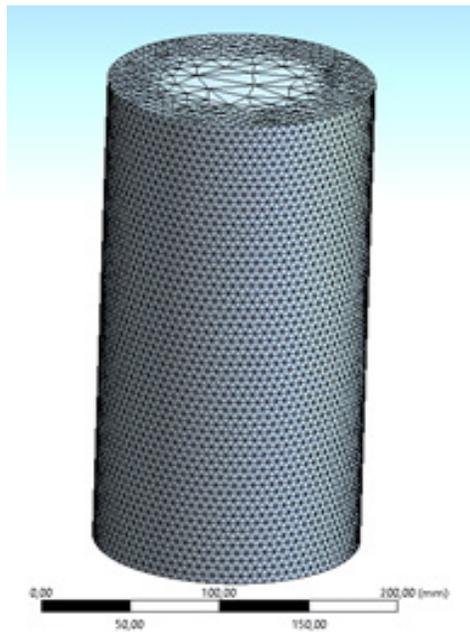


Fig.11 Mallado de la probeta virtual

Tabla IV. Datos de propiedades mecánicas del Acero

Acero Estructural A36	
Módulo de Young	171.420,98 Mpa
Coefficiente Poisson	0,25
Esfuerzo máximo	460 Mpa
Esfuerzo de Fluencia	300 Mpa
Densidad	7,85 g/cm ³

Tabla V. Datos de propiedades mecánicas del Hormigón

Hormigón G25	
Módulo de Young	31.710 Mpa
Coefficiente Poisson	0,18
Esfuerzo máximo	30 Mpa
Esfuerzo de Fluencia	N/A
Densidad	2,423 g/cm ³

Para la simulación se hicieron las siguientes suposiciones:

1. La no existencia de microfisuras en la interfase entre el agregado pétreo y la pasta de cemento, esto con la finalidad de no tomar en consideración el desprendimiento del árido.
2. La no existencia de fisura originadas en la pasta de cemento, con orientación dominante, normal a la deformación principal de compresión.
3. La homogeneidad de la mezcla, lo que supone la inexistencia de espacios vacíos en la mezcla y entre la mezcla y la matriz o molde de encofrado.
4. Análisis estructural estático con propiedades no lineales del material.

Una vez simulado virtualmente y validado el ensayo ASTM C39 se procedió a determinar los valores de deformaciones obtenidos para cada valor de carga conseguidos en el ensayo ASTM C469, con la configuración del software antes determinada, hasta que algún punto en la probeta alcanzara valores de esfuerzo superiores al esfuerzo último del concreto registrado. Con estos valores se obtuvieron los datos de tenacidad midiendo el área bajo la curva de la gráfica carga vs deformación.

Haciendo un análisis paramétrico en la simulación mecánica de los ensayos antes mencionados, se calibró la simulación mecánica para acercar el comportamiento de esta a la evidenciada en los ensayos experimentales, por lo que para las fuerzas de compresión empleadas se obtuvieron los resultados de la deformación por compresión que se pueden observar en la gráfica 12. Adicionalmente, en las figuras 13, 14 y 15 se muestran la distribución y valores máximos de deformación para el resto de los ejes coordenadas (expansión) obtenidos para la probeta virtual.

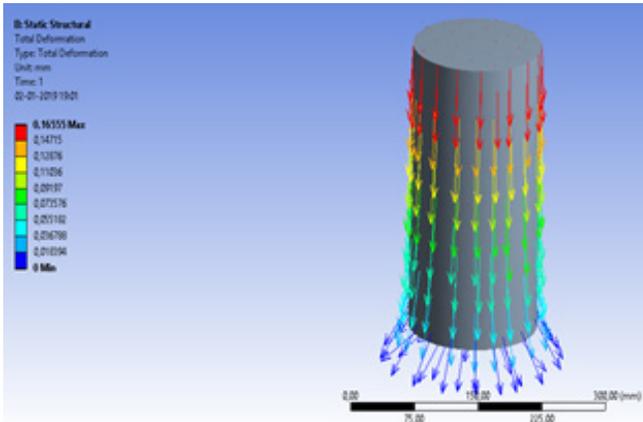


Fig. 12 Deformación total máxima de la Probeta virtual.

En la figura 12 se observa que el valor máximo obtenido de deformación lineal es de 0.16555 mm en la dirección del eje “Z”, también se puede observar que la probeta tiende a expandirse más en su base que en el extremo superior mostrado.

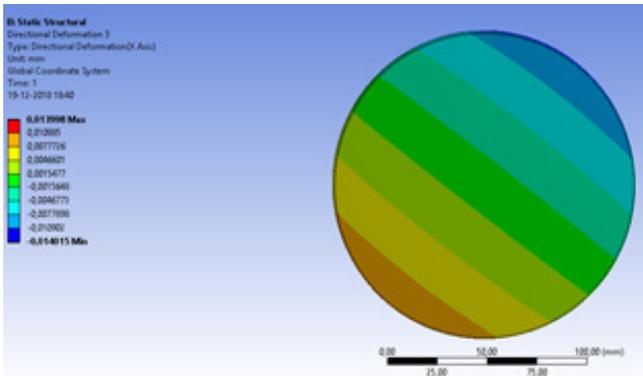


Fig. 13 Deformación Direccional Eje “X” de la Probeta virtual.

La figura 13 muestra que el valor máximo obtenido de deformación en la dirección del eje X es de 0.0139 mm, también se puede observar que hacia la zona negativa de este eje la deformación alcanza valores de 0.0140 mm.

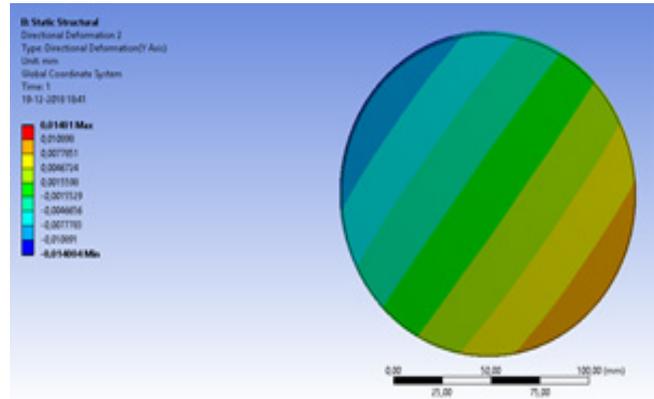


Fig. 14 Deformación Direccional Eje “Y” de la Probeta virtual.

De la figura 14 se puede observar que el valor máximo obtenido de deformación en la dirección del eje Y es de 0.0140 mm, también se puede observar que hacia la zona negativa de este eje la deformación alcanza valores de 0.0140 mm

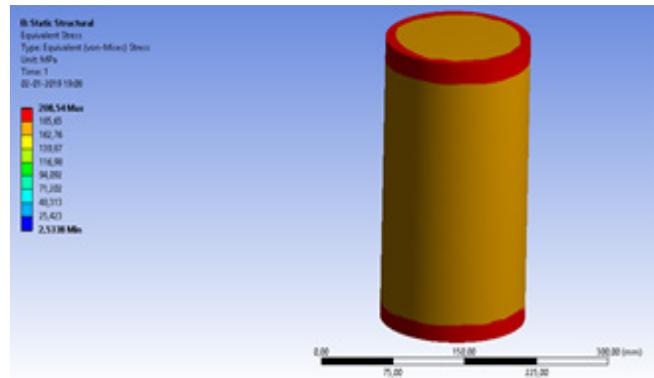


Fig. 15 Esfuerzo máximo de Von-Mises de la probeta virtual.

En la figura 15 se puede observar los valores de esfuerzo de von-misses, así como su distribución, siendo el esfuerzo máximo de 208,54 MPa, lo que corresponde a una fuerza de compresión de 43.334 N en la probeta virtual, y concentrado en los bordes de las caras superior e inferior.

III.RESULTADOS:

Un resumen de los datos obtenidos de la deformación de la probeta se presenta en la figura 16, allí se puede comparar el comportamiento de los resultados experimentales y virtuales de la carga aplicada vs la compresión de la probeta, en donde se observa que para desplazamientos muy pequeños la relación fuerza/desplazamiento es lineal (sigue la ley de Hooke).

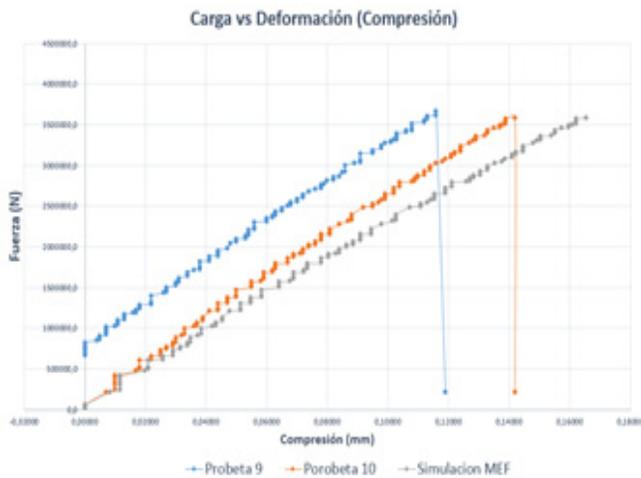


Fig. 16 Valores de fuerza vs compresión alcanzada por la probeta virtual.

Para estimar el valor de tenacidad del concreto se determinó el trabajo suministrado al sistema “Wf”, es decir, el área bajo las distintas curvas, y mediante la ecuación 1 se obtuvo la tasa de liberación de energía.

Para el cálculo de la capacidad de absorción de energía (tenacidad) del material ensayado, se determinó el área bajo la curva carga vs deformación de la probeta, como se muestra a continuación.

$$W_f (probeta\ 9) = \int_0^{0.119} (286677y + 10172)dy$$

$$W_f (probeta\ 9) = 3240,28\ N.mm$$

$$= 3,240\ N.m$$

$$W_f (probeta\ 10) = \int_0^{0.142} (2939397y + 1707,6)dy$$

$$W_f (probeta\ 10) = 3205,97\ N.mm$$

$$= 3,205\ N.m$$

$$W_f (Simulación) = \int_0^{0.165} (261367y + 1219,2)dy$$

$$W_f (Simulación) = 3459,02\ N.mm$$

$$= 3,459\ N.m$$

La energía de fractura por unidad de área se calculó con los valores del área bajo la curva esfuerzo deformación y dividiéndola entre el área de la probeta circular, como se muestra a continuación.

$$G_f = \frac{W_f}{A_f} = \frac{3459,02\ N.m}{17671,45\ mm^2}$$

$$= \frac{3,45902\ N.m}{0.017671\ m^2}$$

$$= 195,74\ J/m^2$$

$$= 0,19574\ KJ/m^2$$

En la tabla VI se muestran valores de energía de fractura por unidad de área para varios materiales reportados en la literatura con la finalidad de compararlo con los datos obtenidos de forma experimental y a través del análisis por elementos finitos.

Tabla VI. Propiedades mecánicas de varios materiales [4].

Material	K _{IC} MNm ^{3/2}	G _f KJ/m ²
Acero dúctil	100-200	50-95
Acero de alta resistencia	30-150	5-110
Hierro fundido nodular	6-20	0.2-3.0
Aleación de titanio	30-120	7-120
Aleación de aluminio	22-45	7-30
Matriz reforzado fibras long. de carbono (CFR) (†)	20-45	2-30
Matriz reforzado fibras long. de vidrio (GFR) (†)	10-100	3-60
Matriz reforzado fibras laminado vidrio (GFR)	10-60	5-100
Madera (†)	8-13	6-20
Vidrio	0,3-0,7	0,002-0,01
Acrílico	1,0-2,0	1,3-1,6
Polycarbonato	1,0-3,5	2,0-5,0
Hormigón	0,2-0,4	0,03-1
Epoxy	0,5-0,7	0,08-0,34

(†) Magnitudes medidas

Tabla VII. Variación de resultados obtenidos.

Referencia	Energía de fractura por unidad de área (G _f)KJ/m ²	Diferencia Porcentual
Probeta 9	0,1858	0,0000
Probeta 10	0,1864	0,2870
Probeta Virtual	0,1957	5,0112

III.CONCLUSIONES

Los resultados encontrados para la tenacidad a la fractura a través del ensayo virtual arrojan valores aceptables según referencias consultadas, al igual que los valores que se obtuvieron experimentalmente, por lo que se valida los procedimientos de simulación que se usaron en las probetas virtuales, haciendo válida la alternativa de estimar la tenacidad de hormigones G25 usando técnicas numéricas (MEF). Esto demuestra que la estimación de la tenacidad de hormigones G25 usando técnicas numéricas (MEF), es una alternativa factible de llevar a cabo, sobre todo cuando no se dispongan de los medios para realizar pruebas experimentales especializadas para la determinación de la tenacidad.

IV.REFERENCIAS

- [1].Kotsovos, M. (2015). "Finite-Element modelling of structural concrete: Short-Term static and dynamic loading conditions". CRC Press. National Technical University of Athens.
- [2].Aire, C. Molins, C. & Aguado, A. (2013). "Ensayo de doble punzonamiento para concreto reforzado con fibra: efecto del tamaño y origen de la probeta". *Concreto y cemento. Investigación y desarrollo*. Vol. 5. No.1. pp. 17-31.
- [3].Jaramillo, B. & Bacca, L. (2009). "Una propuesta para la determinación de la tenacidad a la fractura mediante MEF". *Suplemento de la revista latinoamericana de metalurgia y materiales*. S1 (4). pp. 1641-1646. Caracas.
- [4].Arana, J. & González, J. (S/F). "Mecánica de fractura". Servicio editorial de la Universidad del país vasco. Bilbao.
- [5].Oller, S. (2001). "Fractura mecánica. Un enfoque global". Centro internacional de métodos numéricos en ingeniería. Barcelona (España).
- [6].American Society for Testing and Materials. (2014). "C39/C39M – 14: Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens". ASTM international. USA.
- [7].American Society for Testing and Materials. (2010). "C469/C469M-10: Standard test method for static modulus of elasticity and poisson's ratio of concrete in compression". ASTM international. USA.
- [8].Carmona, S. & Molins, C. (2018). "Determinación de la absorción de energía del hormigón reforzado con fibras mediante el ensayo de panel EFNARC y el ensayo Barcelona". 5to Congreso iberoamericano de hormigón autocompactante y hormigones especiales. Editorial Universitat Politècnica de Valencia. España.
- [9].Iglesias, I. Acosta, B. Yu, R. Ruiz, G. Aineto, M. & Acosta, A. (2011). "Study of mechanical characterization of ceramic specimens from brazilian test adaptation". *Materiales de Construcción*. Vol.61. No.303. pp. 417-429.
- [10].Dill, E. (2011). "The finite element method for mechanics of solid with ANSYS applicatios". CRC press. Boca Raton.
- [11].Fraçois, D. Pineau, A. & Zaoui, A. (2013). "Mechanical Behaviour of Materials: Fracture Mechanics an Damage". Dordrecht. Springer.
- [12].Repetto, C., Roatta, A. & Welti, R. (2014). "Medición de frecuencias de resonancia, factor de pérdida y módulo de Young dinámico de varillas empotradas". *Revista brasileira de ensino de física*. Vol. 36. No. 1 (1314). pp.1-9.
- [13].Pellicer, V. (2016). "Ensayos no destructivos en hormigón: Georadar y ultrasonidos". Tesis inédita de la universidad politécnica de valencia. España
- [14].Song, G. Wang, L. Deng, L. & Yin, H. (2015). "Mechanical characterization and inclusion-based boundary element modeling of lightweight concrete containing foam particles," *Mech. Mater.*, vol. 91, no. P1, pp. 208–225.
- [15].Malachanne, E. Sassine, R. Garcia-Diaz, E. & Dubois, F. (2014) "Numerical model for mechanical behavior of lightweight concrete and for the prediction of local stress concentration," *Constr. Build. Mater.*, vol. 59, pp. 180–187.
- [16].Piot, A. Béjat, T. Jay, A. Bessette, L. Wurtz, E. & Barnes-davin, L. (2017). "Study of a hempcrete wall exposed to outdoor climate : Effects of the coating," *Constr. Build. Mater.*, vol. 139, pp. 540–550.
- [17].Jawdhari A. & Harik, I. (2018). "Finite element analysis of RC beams strengthened in flexure with CFRP rod panels," *Constr. Build. Mater.*, vol. 163, pp. 751–766.