

ANÁLISIS TEÓRICO NUMÉRICO DE LA FALLA POR CORTE DEL HORMIGÓN A TRAVÉS DEL ENSAYO DE LUONG

Gutiérrez, Sergio Eduardo y Sfer, Domingo

*Instituto de Estructuras "Ing. Arturo M. Guzmán", Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología,
Universidad Nacional de Tucumán, Av. Roca 1800, 4000 San Miguel de Tucumán, Argentina,
sgutierrez@herrera.unt.edu.ar*

Palabras Claves: Hormigón, Falla por corte, Análisis Computacional, Ensayo de Luong

Resumen. El estudio de la falla del hormigón se encuentra expresado en una extensa bibliografía que analiza los diferentes aspectos teóricos relativos a este estado. Se reconocen el Modo I (tracción), el Modo II (corte) y el Modo III (corte perpendicular), además de otros modos producto de la combinación de estos o aquellos más complejos propuestos por diversos autores. Se observa que aún existe una discusión abierta en torno a la existencia de los modos de corte, sus combinaciones, el efecto de trabazón del agregado y la acción de la barra de la armadura longitudinal.

Mediante diversos ensayos experimentales, tales como: la viga de cuatro puntos, probetas cúbicas entalladas y la probeta cilíndrica entallada de Luong se pretende explicar la falla por corte del hormigón. No obstante, en estos ensayos se observa la presencia recurrente de fisuras debidas a tensiones de tracción que coexisten con las tensiones de corte de interés.

En el presente trabajo se describe la realización de un estudio teórico numérico sobre el ensayo experimental de Luong, llevado a cabo con el programa computacional ABAQUS. Se analiza el estado tensional del espécimen para distintos tipos de hormigón, condiciones de borde y de confinamiento a los fines de optimizar el mecanismo del ensayo a llevarse a cabo experimentalmente para poder independizar el comportamiento de falla por corte de la perturbación producida por tensiones de tracción no deseadas.

1 INTRODUCCIÓN

Básicamente se reconocen los siguientes modos de falla del hormigón: Modo I (tracción), Modo II (corte) y Modo III (corte perpendicular), además de otros modos producto de la combinación de estos. Se observa que aún existe una discusión abierta en torno a la existencia de los modos de corte, sus combinaciones, el efecto de trabazón del agregado y la acción de la barra de la armadura longitudinal.

Mediante diversos ensayos experimentales, tales como: la viga de cuatro puntos, probetas cúbicas entalladas y la probeta cilíndrica entallada de Luong se pretende explicar la falla por corte del hormigón. No obstante, en estos ensayos se observa la presencia recurrente de fisuras debidas a tensiones de tracción que coexisten con las tensiones de corte de interés. El hormigón resulta ser más sensible ante esfuerzos de tracción que ante esfuerzos de corte, por lo tanto se observa que en aquellos ensayos en donde se requiere evaluar la capacidad resistente al corte, el ensayo en realidad muchas veces falla debido a tracción indirecta. Por esta razón no existe una propuesta experimental estándar o típica para evaluar la capacidad resistente al corte en probetas de hormigón. Generalmente, los requerimientos necesarios para que el espécimen cumpla esta condición es que este sea geoméricamente simple de realizar, de fácil preparación y de aplicación sencilla de la carga. Se requiere además que los resultados sean poco sensibles a pequeñas variaciones en la geometría.

En el presente trabajo se describe la realización de un estudio teórico numérico sobre el ensayo experimental de Luong, llevado a cabo con el programa computacional ABAQUS. Se analiza el estado tensional del espécimen para distintos tipos de hormigón, condiciones de borde y de confinamiento a los fines de optimizar el mecanismo del ensayo a llevarse a cabo experimentalmente para poder independizar el comportamiento de falla por corte de la perturbación producida por tensiones de tracción no deseadas.

2 DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO DE LUONG

Seguidamente se hará una breve descripción del ensayo al corte de [Luong \(1990\)](#).

Las muestras a ensayar son cilíndricas de 100 mm de diámetro y 40 mm de altura, con dos entalladuras concéntricas de 10 mm de profundidad y 50 mm de diámetro interno, una en la cara superior y la otra en la inferior, como se aprecia en las [Figura 1](#).

Para obtener la resistencia al corte en la superficie cilíndrica entre las entalladuras, se debe aplicar una carga de compresión en la cara superior del sector interior de la muestra y ella debe estar apoyada sobre el cilindro del sector exterior, como se ilustra en la [Figura 1](#). De esta forma se presenta una superficie sometida a un esfuerzo de corte que induce a una superficie de falla coincidente con la forma del Modo de Deslizamiento o Modo II de Corte, ([Sfer y Carol, 2005](#)).



Figura 1: Probeta de Hormigón

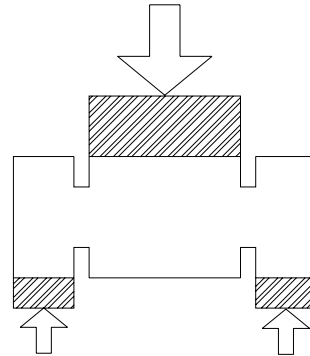


Figura 2: Aplicación de Carga

3 MODELO COMPUTACIONAL

A los efectos de analizar el comportamiento global del ensayo y aplicando las condiciones de borde por simetría en geometría, carga y apoyos se realizó un modelo computacional con elementos finitos axial simétrico.

En la conformación del modelo se trabajó con el espécimen de hormigón apoyado sobre un disco metálico para representar de una mejor manera el apoyo de la probeta de hormigón según las características del ensayo experimental. Dicho disco tiene propiedades de cuerpo rígido de forma tal que se logra una uniformidad de deformación en la base. Consecuentemente, el modelo cuenta con dos cuerpos: la probeta de Luong propiamente dicha y el disco o base que representa el apoyo. Cada uno con su correspondiente material.

El análisis numérico fue realizado haciendo uso del programa computacional ABAQUS/CAE Student Edition, Versión 6.4-2. En la Figura 3 se presenta la malla de elementos finitos empleada. Se utilizó el elemento CAX4R cuadrilátero de 4 nodos axial simétrico con integración reducida y control de bloqueo. En Figura 4 se muestra las cargas y apoyos introducidos en el modelo.



Figura 3: Malla de Elementos Finitos

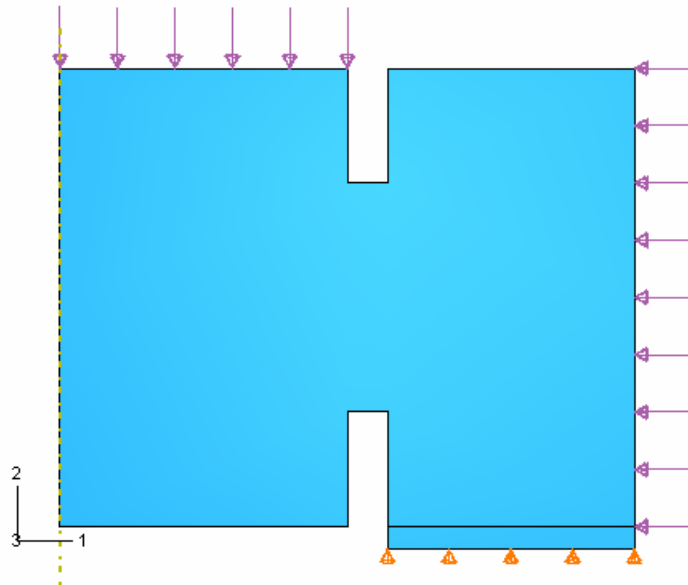


Figura 4: Cargas y Apoyos en el Modelo

4 ANÁLISIS NUMÉRICO

Primeramente se analizó el comportamiento de la muestra en función del tipo de hormigón. A continuación en [Figura 5](#) se muestran las curvas de comportamiento del hormigón ingresadas en el programa computacional, para el análisis de las tensiones de corte:

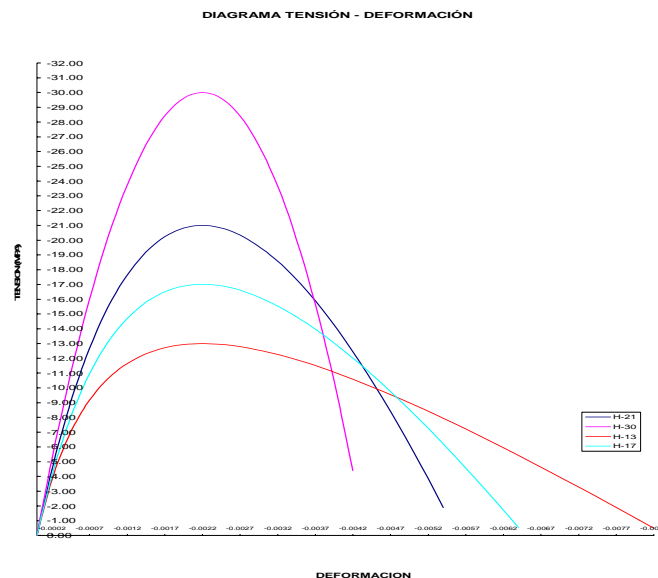


Figura 5: Diagramas Tensión-Deformación del Hormigón

El módulo elástico del hormigón fue definido de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$E_c = 9.5(f_{cm} + 8)^{0.33} \cdot 1000 \quad [MPa] \quad (1)$$

obteniéndose los siguientes valores según el tipo de hormigón.

$$E_{H-13} = 25945 \text{ MPa}$$

$$E_{H-17} = 27481 \text{ MPa}$$

$$E_{H-21} = 28861 \text{ MPa}$$

$$E_{H-30} = 31553 \text{ MPa}$$

A partir de los resultados obtenidos se representa el flujo de tensiones máximas que facilitan la comprensión del comportamiento estructural de la muestra ensayada. Las máximas tensiones de tracción se producen en el sector de la entalladura, de esta forma se origina posteriormente la fractura por corte en dicho lugar. En la Figura 6 se presenta el flujo de tensiones principales existente en el ensayo. De la observación del modelo deformado se aprecia que el núcleo central cilíndrico se mantiene indeformable y que en su trayectoria deforma el anillo exterior de tal forma que se tracciona el borde inferior externo y se comprime el borde superior interno de la entalladura. La fisuración comienza a causa de la tracción inferior que posteriormente se desplaza a través de la zona entre entalladuras.

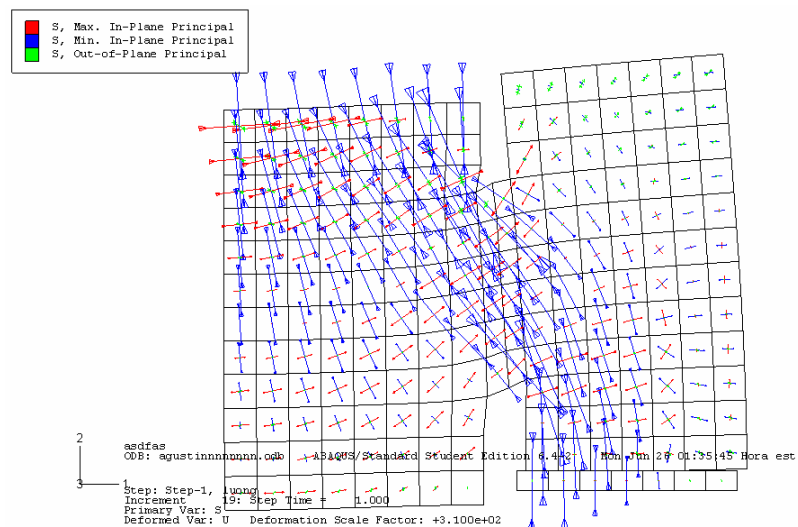


Figura 6: Distribución de Tensiones Principales en Modelo Deformado

Como era de esperarse, la tensión de corte última aumenta de acuerdo a la calidad del hormigón (ver Tabla 1) y a partir de los diagramas de distribución de la tensión de corte se puede inferir que las máximas tensiones de corte se presentan en el borde superior en forma conjunta con los valores máximos de tensiones normales de compresión, concluyéndose que el confinamiento producido en la parte superior de la muestra mejora el comportamiento al corte último.

Hormigón	Incremento (%)	τ Sup [MPa]	τ Inf [MPa]	τ Promedio [MPa]	Incremento (%)
H-13	0	2.3	1.8	2.0	---
H-17	31	2.5	1.9	2.2	10
H-21	62	2.6	2.0	2.3	15
H-30	131	4	3.2	3.6	80

Tabla 1: Incremento de la Tensión de Corte según el Tipo de Hormigón

En la **Figura 7** se presentan las distribuciones de tensión de corte para los distintos tipo de hormigón sobre una misma escala cromática.

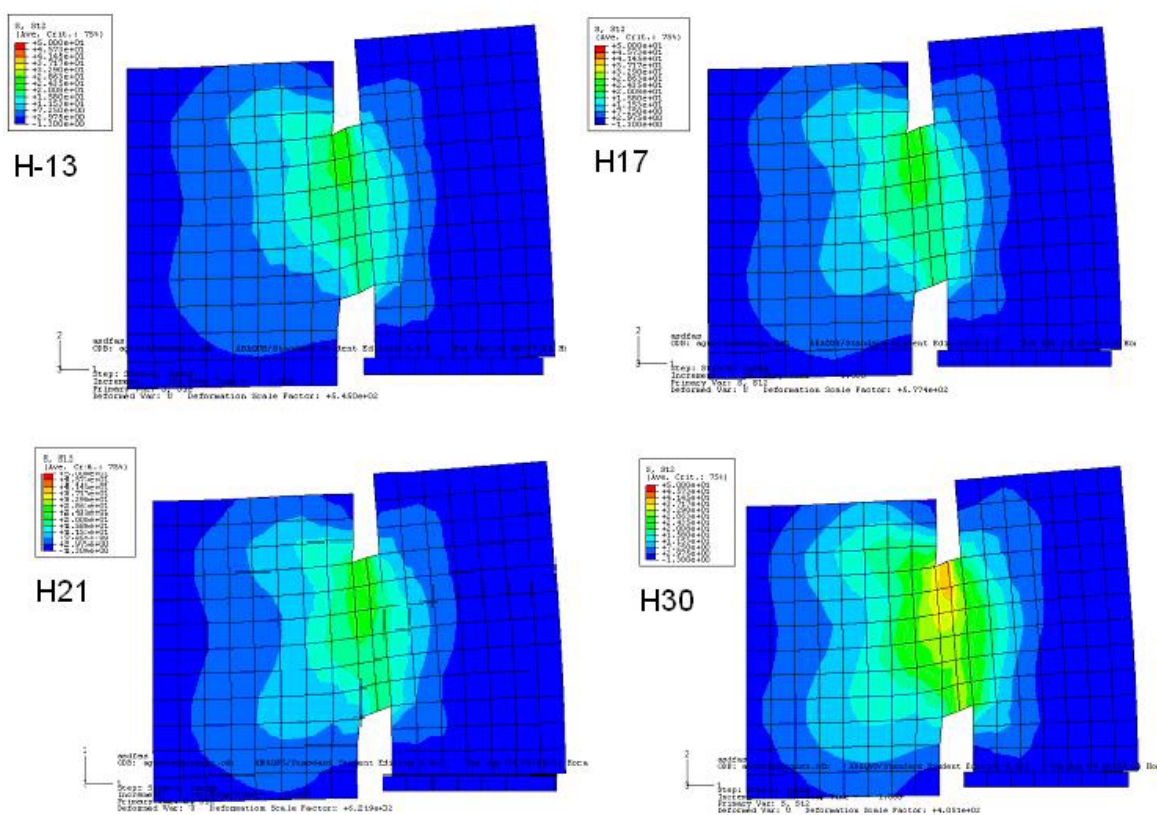


Figura 7: Distribución de Tensiones de Corte según el Tipo de Hormigón

Teniendo en cuenta que a medida que se incrementa el esfuerzo normal de compresión en el plano de falla también lo hace la resistencia al corte último, se procedió a aplicar una tensión radial de compresión en la cara perimetral de la probeta de Luong según se muestra en la **Figura 4**. Se adopta para la tensión de confinamiento los valores de 0.2 MPa, 0.4 MPa y 0.6 MPa.

Una vez realizados los cálculos computacionales respectivos se obtuvieron los siguientes resultados. En la **Tabla 2** se presenta la variación de la carga última aplicada sobre el sector cilíndrico central en función de la tensión de confinamiento conferida sobre la cara exterior.

Confinamiento [MPa]	Carga Última [KN]	τ_{\max} [MPa]	Incremento (%)
Nulo	7.3	2.32	---
0.2	9.5	3.02	30
0.4	10.7	3.41	46
0.6	12.9	4.11	77

Tabla 2: Incremento de Carga Última

Puede observarse que la carga última incrementa en función del aumento de la tensión de confinamiento. Este fenómeno, que era de suponerse, fue analizado a partir del estado de tensiones que presenta el espécimen. El comportamiento al corte en el sector de la entalladura se encuentra favorecido a consecuencia del incremento en la capacidad al corte de la sección

de acuerdo a lo representado en la **Figura 8**. La muestra desarrolla una mayor resistencia en función del aumento de las tensiones de corte.

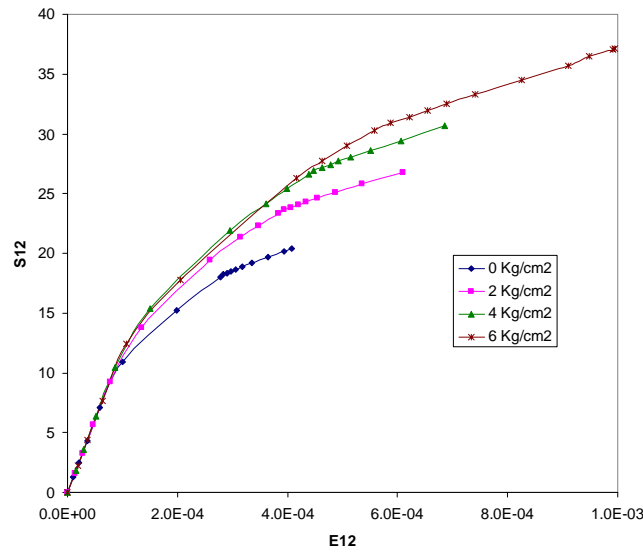


Figura 8: Tensión de Corte en Sector de Entalladura

En la **Figura 9** se muestra un diagrama cromático de la distribución de las tensiones normales radiales, puede observarse que el sector correspondiente al borde de la entalla superior se encuentra solicitado a la compresión mientras que el sector inferior se halla traccionado. En las **Figura 10** y **Figura 11** se representan las tensiones normales radiales en el borde superior e inferior respectivamente en correspondencia con los distintos niveles de confinamiento.

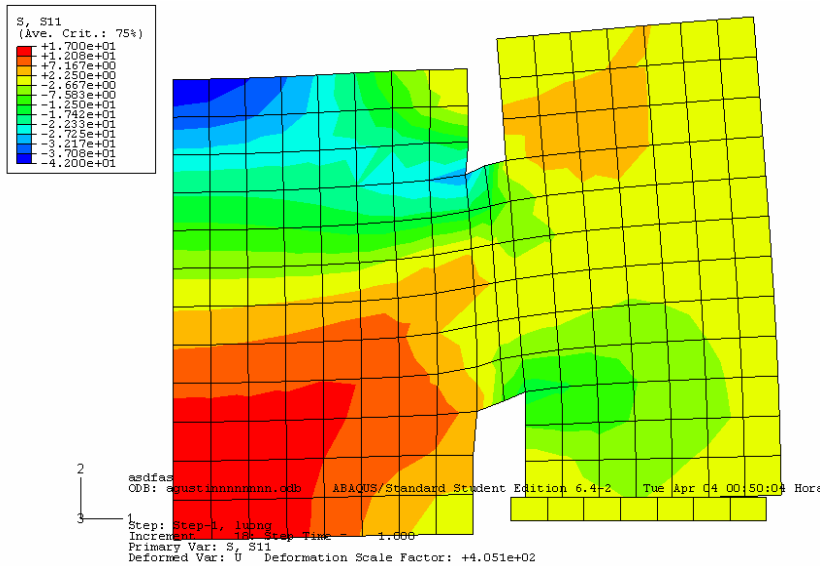


Figura 9: Distribución de Tensiones Normales Radiales

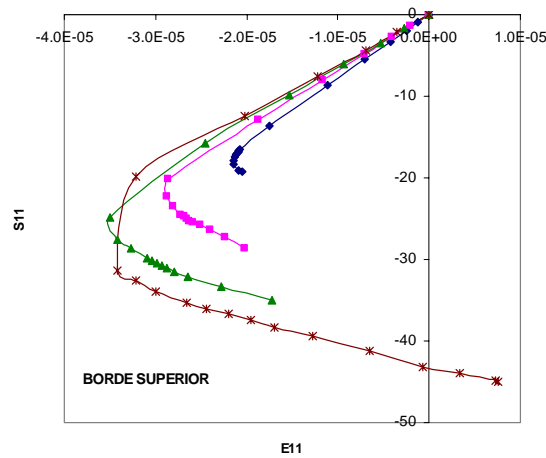


Figura 10: Tensión de Compresión en Borde Superior

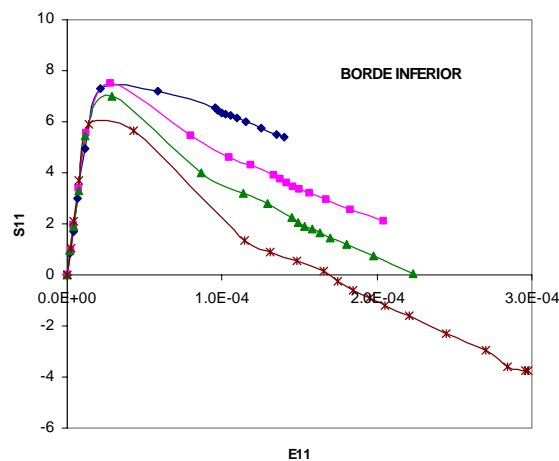


Figura 11: Tensión de Tracción en Borde Inferior

Puede concluirse que la tensión de tracción inferior disminuye su valor a medida que se incremente el confinamiento mientras que la tensión de compresión superior aumenta. Este comportamiento global del sector de entalladura influye satisfactoriamente en la resistencia al corte del espécimen.

5 CONCLUSIONES

1. Se presenta una modelación computacional satisfactoria del ensayo al corte de Luong utilizando elementos finitos axiales simétricos.
2. A partir del análisis de los resultados se concluye que la fisuración al corte en el ensayo se origina por la presencia de tensiones de tracción ubicadas en el borde inferior de la entalladura.

3. La aplicación de tensiones de compresión de confinamiento disminuyen estas tensiones de tracción comentadas en el párrafo anterior y logran incrementar la capacidad de la carga última del ensayo.
4. La carga última obtenida en los ensayos incrementa en porcentaje menores a los conferidos a la tensión de confinamiento. Es necesario desarrollar aún más este tema a los fines de optimizar el grado de confinamiento estructural.
5. Puede concluirse que la muestra del ensayo de Luong presenta características de geometría y carga optimas para la aplicación de tensiones de confinamiento. De esta manera resulta un apropiado ensayo experimental para el estudio de la resistencia al corte del hormigón.

6 AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la ayuda brindada en el marco del Proyecto 26/E313 financiado por el Consejo de Investigaciones de la Secretaría de Ciencia y Técnica de la UNT.

7 REFERENCIAS

- M. P. Luong. Tensile and Shear Strength of Concrete and Rock, Engineering Fractura Mechanics, Vol. 35, Nº 1/2/3, 127-135, 1990.
- D. Sfer e I. Carol. Caracterización Experimental del Modo Mixto de Fractura en Hormigón mediante Probetas tipo Luong. Fip Simposio “El Hormigón Estructural y el Transcurso del Tiempo”. Tomo 2, 905-912. La Plata, Argentina. 2005.