

CARACTERIZACION DEL HORMIGON SEGÚN EL ENSAYO DE LUONG.

Domingo Sfer

Ingeniero Civil. Doctor en Ingeniería

Sergio E. Gutierrez

Ingeniero Civil. Magíster en Ingeniería Estructural

Mauricio García

Estudiante de Ingeniería Civil

Docente e Investigadores del Instituto de Estructuras "Arturo M. Guzmán"
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología
Universidad Nacional de Tucumán

RESUMEN

La resistencia al corte del hormigón es un tema ampliamente tratado y ha motivado muchas discusiones. En general el comportamiento de elementos estructurales de hormigón sometidos a esfuerzos cortantes va acompañado de otros esfuerzos, es decir que se trata de situaciones combinadas y son pocos los casos de elementos estructurales solicitados a corte puro.

En la actualidad no existe un estudio experimental específico que permita determinar la resistencia al corte del hormigón o que permita caracterizar al hormigón según este parámetro. Este valor no surge de una determinación experimental de rutina sino que se obtiene como una fracción de la resistencia uniaxial de compresión. Esta apreciación puede conducir en ciertos casos a valores de resistencia inseguros o bien a subestimar la capacidad resistente del material.

En este trabajo se presenta un estudio experimental de acuerdo a una de las propuestas más simples para la determinación de la capacidad resistente a corte, se trata del ensayo de LUONG aplicado originalmente en morteros y rocas. Los objetivos perseguidos en este estudio son validar la propuesta de LUONG como una alternativa consistente para la caracterización al corte del hormigón y por otro lado analizar la sensibilidad de este ensayo frente a diferentes geometrías.

SUMMARY

The concrete shear strength is a subject widely discussed in recent years. In general, the behavior of structural concrete elements under shear effects is combined with other types of strength. Only few structural elements act under pure shear effects.

At present there is no specific experimental test to establish the shear strength of concrete. This strength is not the result of an experimental test but it is obtained from an uniaxial compression fraction. This kind of determination can mislead to wrong strength values, below or above the real value,.

In this paper an experimental study according to more simple proposals to determine the shear strength capacity is presented. It is the LUONG test applied originally to mortars and rocks. The objectives are to validate LUONG proposal as an alternative to characterize concrete shear strength and also analyze this test sensibility before different geometry

INTRODUCCIÓN

El comportamiento al corte del hormigón es un tema que en décadas pasadas fue ampliamente tratado y motivó diversas discusiones. En general el comportamiento de elementos estructurales de hormigón sometidos a esfuerzos cortantes se encuentra acoplado con la presencia de esfuerzos normales, es decir, que frecuentemente estos problemas plantean situaciones de combinación de tensiones y son pocos los casos de elementos estructurales solicitados a corte puro.

En la actualidad no existe un ensayo experimental específico estándar que permita determinar la capacidad resistente a corte del hormigón. En general no se efectúa una determinación experimental de rutina, sino que, la resistencia a corte se obtiene como un porcentaje de la resistencia uniaxial de compresión o a partir de relaciones empíricas en las que interviene la resistencia a compresión uniaxial como parámetro. Este tipo de determinación puede conducir en ciertos casos a valores de resistencia poco confiables o bien suele subestimar la capacidad resistente del material, puesto que esta relación porcentual o empírica puede resultar variable en función del tipo de hormigón, particularmente en aquellos casos de hormigones de alta resistencia, autocompactables u otros tipos de hormigones especiales en los que no se poseen demasiados antecedentes que permitan definir la relación entre ambas resistencias.

Existen cuantiosos antecedentes de estudios experimentales que permiten caracterizar el hormigón a corte, sin embargo por diversas razones ninguno de ellos se ha destacado sobre los otros como ensayo estándar.

Una de las propuestas más simple para la determinación de la capacidad resistente a corte fue realizada por LUONG en 1990^{1, 2}. Esta propuesta consiste en un ensayo experimental de un prototipo de configuración axisimétrica, un cilindro de hormigón de altura reducida, al cual se le realizan entallas concéntricas en las caras superior e inferior respectivamente. La carga se aplica superiormente en la zona central interior a la entalla, mientras que la muestra apoya en la cara inferior sobre la corona exterior, de manera que la zona solicitada a corte es la superficie cilíndrica entre entallas.

La propuesta de LUONG se aplicó originalmente a morteros y roca, por lo tanto existe el interrogante sobre la validez de ella en el caso de hormigones, cuando los agregados son relativamente grandes respecto de la superficie de falla entre entallas. Una alternativa para estudiar esta perturbación consiste en desarrollar muestras de hormigón con diferentes alturas de la superficie de falla, para seguidamente comparar estos resultados con otras probetas de idéntica geometría pero desarrolladas en un material similar sin agregado grueso, es decir muestras de un mortero “equivalente” (de resistencia similar).

OBJETIVOS

Los objetivos perseguidos en este estudio experimental es validar la propuesta de LUONG como una alternativa consistente para la caracterización al corte del hormigón. Por otro lado analizar la sensibilidad del ensayo de LUONG a las diferentes geometrías propuestas, así como la incidencia de estas respecto de los tamaños de los áridos del material. Para ello se cuenta con algunos antecedentes experimentales que ya fueron desarrollados precedentemente^{3,4}.

METODO EXPERIMENTAL

Las muestras para el ensayo se obtuvieron a partir de probetas de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura. Estas probetas se cortaron transversalmente en secciones que constituyeron los cilindros de base, luego se pulieron las caras superior e inferior de cada uno de ellos para ajustar de esta forma la altura y garantizar el paralelismo entre las caras. Se realizaron cilindros de tres alturas diferentes: 40, 60 y 80 mm. Posteriormente con una broca de tipo copa de 5 cm de diámetro se ejecutaron las entallas en las caras superior e inferior hasta los 10 mm de profundidad, procurando que ambas se efectúen de manera concéntrica. (Figura 1).

Finalmente cada una de las muestras es medida con un calibre para registrar su geometría a los efectos de controlar la posible heterogeneidad de los resultados derivados de muestras con variaciones en la geometría.



Figura 1. Muestras cortadas, pulidas y entalladas

El procedimiento experimental se realiza mediante la aplicación de la carga con una prensa servocontrolada en su cabezal superior. La muestra se encuentra apoyada en un soporte especial que la sujeta por la corona exterior. Durante estos ensayos se registra la carga aplicada y el desplazamiento entre platos. La lectura del desplazamiento se efectúa mediante tres transductores potenciométricos ubicados a 120° alrededor de la muestra. En la Figura 2 se muestra una fotografía de la instrumentación.



Figura 2. Instrumentación del ensayo

PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para el desarrollo del presente estudio experimental se moldearon probetas estándares de 100 mm de diámetro por 200 mm de altura, y a partir de ellas se obtuvieron las muestras a ensayar.

Se realizaron ensayos sobre muestras de diferentes materiales y geometría. A fin de apreciar la incidencia del tamaño de agregado en la respuesta del ensayo se incluyen muestras de hormigón y mortero. Es decir que se han realizado muestras de una misma geometría pero de materiales de diferentes.

Se usaron tres tamaños de probetas de forma tal que la superficie de unión entre entallas cumpla la relación 1:2:3. Las probeta **T40** corresponden a muestras cilíndricas de 40 mm de altura, las **T60** a 60 mm de altura y las **T80** a 80mm de altura respectivamente. En la siguiente figura se presentan las geometrías empleadas.

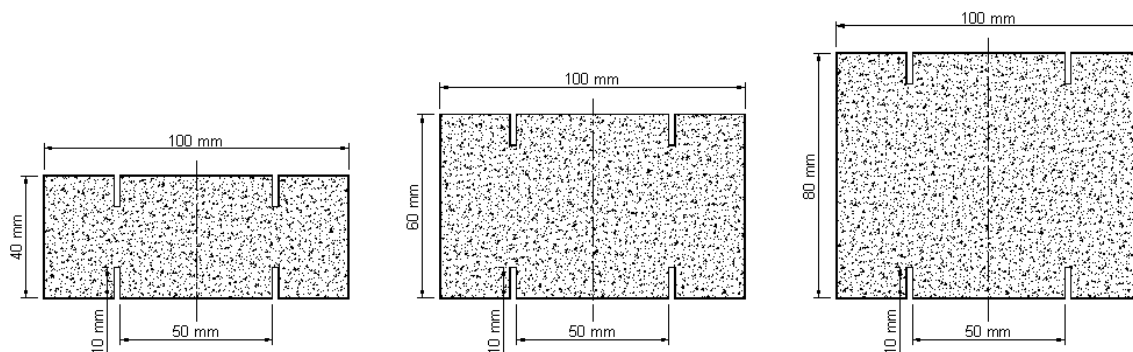


Figura 3. Geometrías de las muestras

El hormigón y el mortero se dosificó de tal manera que ambos materiales tuvieran una similar resistencia característica. Se realizaron dos amasadas de 50 litros, una de hormigón y otra de mortero, se pudieron moldear 23 probetas de cada material. El proceso de elaboración del material y el moldeado de las probetas se hizo de acuerdo a norma. Las probetas fueron desmoldadas a las 24 hs y se las colocaron en cámara húmeda durante 28 días durante el fraguado.



Figura 4 moldeado de probetas

Las probetas fraguadas fueron cortadas con una sierra circular sensitiva, luego se pulieron las caras superior e inferior mediante un disco diamantado montado en un taladro de banco, y de esta forma se ajustó la medida y se aseguró el paralelismo entre ambas caras.

Se prepararon 13 muestras tipo LUONG de cada tamaño y de cada material, es decir que se tuvo un total de 78 muestras y se conservaron de cada material 6 probetas de tamaño estándar para la posterior determinación de la resistencia uniaxial a compresión.



Figura 5. Probetas tipo LUONG antes de ensayarse

MECANISMO DE FALLA

A partir del análisis de los resultados del ensayo se observa la existencia de dos mecanismos de falla presentes en forma secuencial durante el transcurso del ensayo.

La marcha del ensayo presenta en un primer momento una respuesta lineal de acuerdo a la aplicación de la carga, posteriormente y prácticamente con pocos indicios previos se produce un pico de carga seguido de una caída abrupta de la misma. Este comportamiento resulta una respuesta esperada para sollicitaciones a corte en este tipo de materiales. La caída abrupta de carga se corresponde con el desarrollo de una fisura en la superficie cilíndrica entre entallas, esta fisura puede ser más o menos tortuosa de acuerdo a la heterogeneidad del material, pero en general se concentra en el cilindro entre entallas. Se puede definir esta primera etapa como un mecanismo de corte. La superficie de falla divide a la muestra en un cilindro central y un anillo exterior que al continuar actuando la carga tienden a deslizarse uno dentro del otro. No obstante, debido a la tortuosidad de las superficies en contacto se presenta una fricción entre ambas caras y se genera una tensión normal en el plano de la fisura (dilatancia). Este segundo mecanismo genera por una parte un confinamiento del cilindro central y por otra una tracción anular al anillo exterior. Finalmente acontece la rotura cuando se forma una red de fisuras radiales de tracción que dividen al anillo exterior en varios sectores constituyéndose así un mecanismo de tracción. En la figura 6 se presenta una fotografía de las muestras ensayadas en donde se evidencian ambos tipos de fisuras. Idénticos mecanismos de falla se presentaron tanto en las probetas de hormigón como en las de mortero, independientemente de la geometría de las probetas. Se observa que el confinamiento aportado por la corona en el caso de este material es tal que no incrementa sensiblemente la carga de rotura, lo que en realidad aporta es una mayor estabilidad en el pospico, por lo tanto la carga pico es prácticamente la correspondiente al mecanismo de corte.



Figura 6. Fisuración en muestras ensayadas

RESULTADOS

Se ensayaron 12 muestras para cada tamaño y tipo de material, es decir que se realizaron en total 72 ensayos registrándose en cada caso el comportamiento carga-desplazamiento. La siguiente tabla resume los resultados obtenidos en términos de carga.

	Tamaño	N° ensayos	C prom. [kN]	desv. st [kN]	h [cm]	tau [MPa]	desv st [MPa]
HOMIGON	T40	12	33.103	7.290	2.0	10.537	2.320
	T60	12	76.509	12.823	4.0	12.177	2.041
	T80	12	104.084	13.828	6.0	11.044	1.467
MORTERO	T40	12	33.587	5.275	2.0	10.691	1.679
	T60	12	70.918	6.346	4.0	11.287	1.010
	T80	12	82.492	7.578	6.0	8.753	0.804

Tabla 1. Cargas Máximas obtenidas en los ensayos

En esta tabla los resultados se presentan de la siguiente forma, en correspondencia con el tamaño de muestra se indica el número de ensayos realizados, el promedio de la carga máxima aplicada, la desviación estándar de estas cargas máximas, el espesor o altura de la superficie de unión entre entallas, la tensión tangencial máxima desarrollada correspondiente al promedio y su desviación estándar.

En los gráficos carga-desplazamiento de las figuras siguientes, se presentan los registros en términos de carga desplazamiento de tres ensayos de diferentes tamaños para el caso de probetas de hormigón en la figura 7 y de mortero en la figura 8.

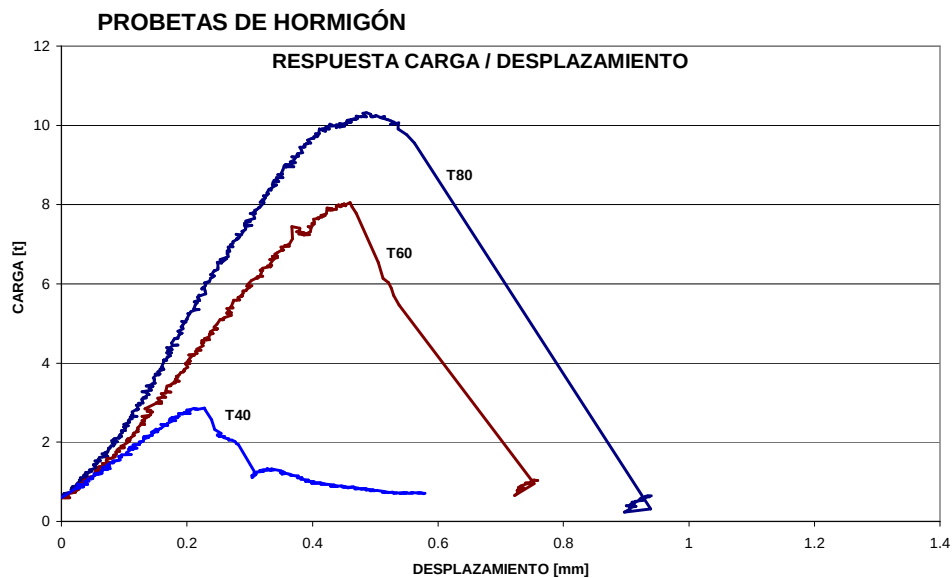


Figura 7. Gráfico Carga-desplazamiento para las probetas de hormigón.

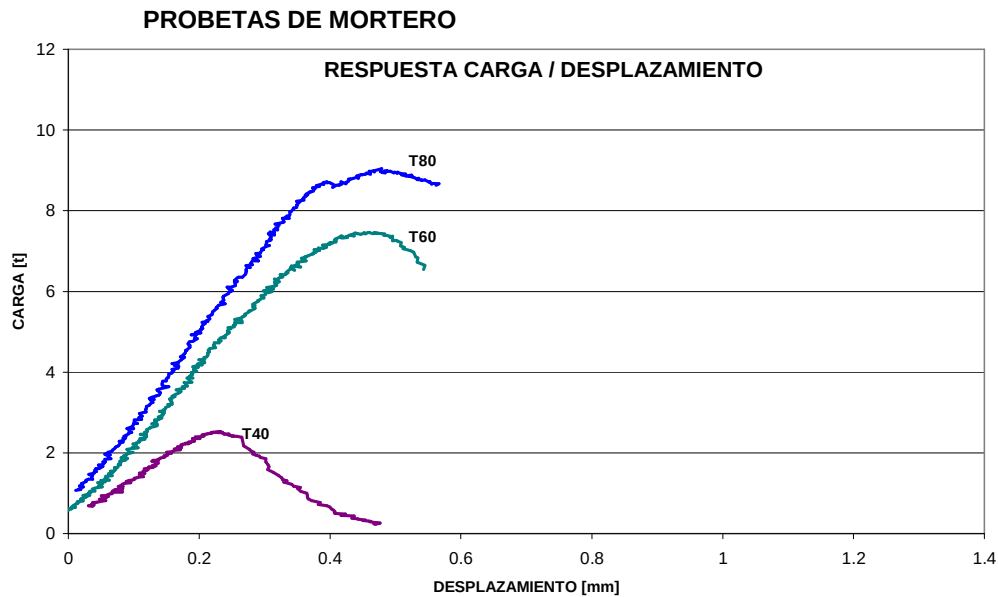


Figura 8. Gráfico Carga-desplazamiento para las probetas de mortero.

Otro resultado que se muestra en la siguiente figura muestra la dispersión de la tensión tangencial máxima desarrollada en la superficie entre entallas. Esta se obtiene como el cociente entre la carga máxima desarrollada y la superficie entre entallas. En la figura 9 se representa la tensión tangencial máxima desarrollada en las muestras de hormigón para el tamaño T60.

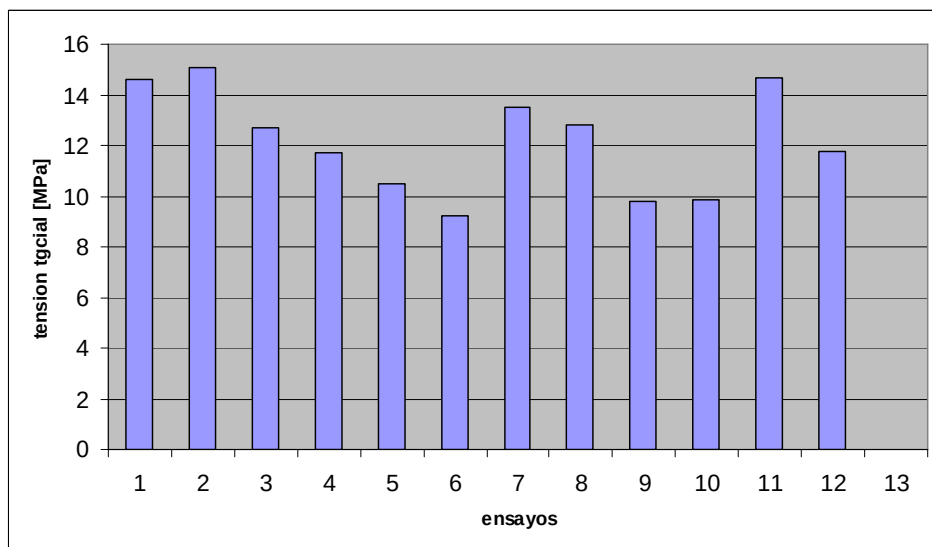


Figura 9. Tensión Tangencial máxima en Muestras T60 de hormigón

Finalmente se presentan los resultados de los ensayos de compresión uniaxial obtenido de probetas estándar 100mm x 200mm.

	Nº ensayos	sigma [MPa]	desv. st [MPa]
HORMIGON	4	21.996	2.869
MORTERO	4	22.529	1.315

Tabla 2. Resultados ensayos de compresión uniaxial

CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Analizando los gráficos carga-desplazamiento se observa que las muestras de ambos materiales para los diferentes tamaños tienen un comportamiento mecánico similar donde las formas de las curvas son similares. Sin embargo se observa que para los tamaños más grandes la rotura es más frágil. Se observa que en el caso del mortero la rotura es más frágil aún, acompañada de un desprendimiento violento de la corona exterior.

A partir de los resultados de los ensayos realizados se puede concluir que la propuesta experimental de LUONG realizada es apta para la caracterización de la resistencia al corte del hormigón. Esta conclusión surge de la evaluación estadística realizada que a través de las diferentes pruebas que indican la buena calidad general de los resultados. Se observa que existe dispersión de los valores de resistencia obtenidos, esta resulta mayor en los casos de muestras más pequeñas, sin embargo la calidad de los resultados es aceptable, esto se aprecia observando la longitud de la caja de cada grupo de resultados presentada en los gráficos, la cual es indicativa de la calidad de la medición.

Si se consideran las tres geometrías utilizadas se observa que para el caso de hormigón el valor medio obtenido de los diferentes tamaños es aproximado, sumado a ello la evaluación estadística revela que el comportamiento en cuanto al valor de resistencia a corte obtenido es similar, es decir que en este caso no se encontraron evidencias estadísticas para afirmar que se tiene un comportamiento diferente. Por el contrario en el caso de mortero la evaluación indica que si son diferentes. Esto indicaría que para este material existe un efecto estructural asociado al tamaño que establece diferencias entre los valores de resistencia obtenidos de los diferentes tamaños de las muestras.

Considerando ahora los diferentes materiales y un mismo tamaño, se tiene que en para las muestras T40 y T60 existe un comportamiento similar para ambos materiales, es decir que para estos tamaños el comportamiento, en lo que a resistencia refiere, es el mismo para hormigón y mortero. Sin embargo al comparar mortero y hormigón para el tamaño T80 se observa que ambos materiales son diferentes.

Por lo tanto puede concluirse que el ensayo de LUONG en muestras de hormigón da resultados similares para los diferentes tamaños, a pesar de que el tamaño máximo de árido utilizado sea significativamente grande para el caso de las muestras T40. Sumado a ello al comparar muestras de hormigón y de mortero para el tamaño T40 se observa estadísticamente un mismo comportamiento, lo cual prueba que para este tamaño de muestra, el tamaño de árido del hormigón no introduce diferencias.

Respecto a la relación entre la tensión tangencial máxima y la resistencia uniaxial de compresión se observa que los valores medios ajustan dentro del 15% del valor, tanto para las diferentes geometrías. Sin embargo se evidencia un importante cambio para el caso de la muestra T80 de mortero. En la siguiente tabla se presentan estas relaciones.

	Tamaño	tau [MPa]	tau/sigma
HOMIGON	T40	10.537	0.479
	T60	12.177	0.554
	T80	11.044	0.502
MORTERO	T40	10.691	0.475
	T60	11.287	0.501
	T80	8.753	0.389

Tabla 3. Relación entre tensión tangencial máxima y resistencia uniaxial de compresión

Esta relación es un poco elevada para los valores de resistencia al corte obtenidos según otras propuestas que determinan una relación entre resistencia a corte y uniaxial de compresión comprendida entre el 25 y el 30%.

Este estudio abre entonces el interrogante respecto de este punto el cual podría resolverse comparando los resultados de esta y otra propuesta experimental de la que surja una relación como la tradicionalmente utilizada.

A partir de estos resultados, salvando lo dicho en el párrafo anterior, se concluye que el ensayo de las probetas tipo LUONG son aptas para la caracterización del hormigón al corte. Inclusive utilizando la geometría T40 si es que se hace un número considerable de muestras.

REFERENCIAS

- ¹ LUONG, M.P., 1992. Fracture testing of concrete and rock materials. Nuclear Engineering and Design, 133:33-95 [1]
- ² LUONG, M. P. (1990) "Tensile and Shear Strength of Concrete and Rock", Engineering Fracture Mechanics Vol 35, N° 1/2/3, pp 127-135
- ³ SFER, GUTIERREZ, CAROL, "Caracterización de la falla del hormigón en modo Mixto Corte Compresión" Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural 2006.
- ⁴ SFER, CAROL, "Caracterización experimental del modo mixto de Fractura en Hormigón mediante probetas tipo Luong" Simposio fib - 2005.