

ESTUDIO TEÓRICO EXPERIMENTAL DEL PUNZONADO EN LOSAS DE HºAº.

Facundo Andrés Isla Calderón

Ingeniero Civil. Becario del CONICET
Estudiante de Postgrado Doctorado en Ingeniería, U.N.T.

Domingo Sfer

Ingeniero Civil. Doctor en Ingeniería.
Magíster en Ingeniería Estructural, U.N.T.

Sergio Eduardo Gutiérrez

Ingeniero Civil.
Magíster en Ingeniería Estructural, U.N.T.

Docentes e Investigadores del Instituto de Estructuras “Arturo M. Guzmán”
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología
Universidad Nacional de Tucumán.

RESUMEN

Las ventajas arquitectónicas que brinda un entrepiso sin vigas y sin capiteles en el proyecto de edificios para oficinas, plantas industriales y estacionamientos ha incrementado el uso de esta tipología estructural en la construcción actual.

La falla por punzonado en losas de hormigón es un mecanismo de falla frágil que ocurre con una importante reducción de capacidad portante.

En el presente trabajo se expone el desarrollo de un estudio teórico y experimental realizado a los fines de proveer información de relevancia con respecto al mecanismo de falla de una unión columna-losa.

Una gran cantidad de parámetros, a saber: resistencia del hormigón, cuantía de armadura, tensión de fluencia del acero, ángulo de inclinación de la fisura, diámetro de la columna, etc., influyen sobre los modelos teóricos para la predicción de la carga de falla por punzonado. La normativa existente solamente considera algunos de ellos y en determinados casos muestra cierta deficiencia en la determinación de la capacidad estructural.

En el marco experimental se realizó un ensayo sobre un prototipo donde se evalúa la influencia de la cuantía de armadura en la determinación de las tensiones máximas de corte y de la carga última obtenida a través de modelos teóricos y pautas de diseño establecidas en las normas actuales.

ABSTRACT

The architectural advantages of flat plates without beams and without drop panels in the project of office buildings, industrial plants and parking lots has increased the use of this type of structures in present constructions.

The punching failure in reinforced concrete plates is a brittle failure mechanism that takes place with an important reduction in the load capacity.

In order to provide information of the failure mechanism of slab-column connections a theoretical and experimental study is developed and presented here.

A big number of parameters like concrete strength, steel reinforcement ratio, steel yield strength, punching crack inclination, column size, etc. have influence over the theoretical models for the prediction of punching load failure. The present standards only consider some of these parameters and they are not efficient to determine the structural capacity.

A test on a prototype was carried out to assess the influence of steel reinforcement ratio in the evaluation of the ultimate shear stress and ultimate load capacity by the current design criteria.

1. INTRODUCCION

Las ventajas arquitectónicas que brinda un entrepiso sin vigas y sin capiteles en el proyecto de edificios para oficinas, plantas industriales y estacionamientos ha incrementado el uso de esta tipología estructural en la construcción actual. El uso de hormigones de alta resistencia u hormigones especiales representa además un desafío para la construcción de estructuras esbeltas que pueden presentar solicitaciones de este tipo.

El punzonado es un mecanismo de falla frágil o quebradiza que ocurre sin manifestación de peligro alguno y con una importante reducción en la capacidad portante. Para evitar este tipo de falla se desarrollaron varios métodos constructivos, entre los cuales se pueden destacar, el aumento del espesor de la losa en la proximidad de la columna configurando un capitel y diversos tipos de armaduras de refuerzos, como reforzar la armadura de flexión, disposición de estribos, pernos, perfiles de acero (trabajan como voladizos empotrados en la unión losa-columna, sometidos principalmente a corte), barras inclinadas y armadura tesada. En consecuencia, los modelos de predicción de carga de falla por punzonado deben contemplar todos estos diferentes casos ^{1, 2, 3, 4}.

Una gran cantidad de parámetros, a saber: resistencia del hormigón, cuantía de armadura, tensión de fluencia del acero, ángulo de inclinación de la fisura, diámetro de la columna, etc., influyen sobre los modelos teóricos para la predicción de la carga de falla por punzonado. La normativa existente solamente considera algunos de ellos y en determinados casos muestra cierta deficiencia en la determinación de la capacidad estructural ⁵.

En el presente trabajo se expone el desarrollo de un estudio teórico y experimental realizado a los fines de proveer información de relevancia con respecto al mecanismo de falla de una unión columna-losa.

Se presentan los modelos analíticos para la predicción de la carga de falla por punzonado. Se indica el mecanismo de falla supuesto, el modelo físico asociado y las expresiones necesarias para estimar la carga de falla por punzonado para:

- Modelo del Código ACI (1977 y 2002)⁶
- Modelo de Menétrey (2002)⁷

En el marco experimental se realizó un ensayo sobre un prototipo donde se evalúa la influencia de la cuantía de armadura en la determinación de las tensiones máximas de corte y de la carga última obtenida a través de modelos teóricos y pautas de diseño establecidas en las normas actuales.

2. MODELO DEL CODIGO ACI

Este modelo fue desarrollado considerando una columna cuadrada, y una superficie de falla con forma de pirámide. Con las consideraciones correspondientes el método puede extenderse a columnas con secciones de diversas formas.

2.1. MECANISMO DE FALLA Y MODELO

Al aplicarse la carga, las primeras fisuras en formarse son leves fisuras circunferenciales alrededor de la columna debido a momentos negativos en dirección radial. Luego desde la columna se extienden las fisuras radiales, debidas a los momentos negativos en la dirección circunferencial. El momento en la dirección radial decrece rápidamente al alejarse de la columna por lo cual seria necesario un incremento significativo de la carga para que se formen fisuras circunferenciales a una cierta distancia alejada de la columna.

Las fisuras diagonales de tracción se desarrollan cerca de la altura media y son por consiguientes más similares a un entramado de fisuras por corte que a fisuras por flexión-corte.

La rigidez de la losa alrededor de la región fisurada tiende a controlar la abertura de las fisuras diagonales preservando así la transferencia del esfuerzo de corte correspondiente a la trabazón del agregado para grandes cargas.

La falla por punzonado puede ocurrir eventualmente, acompañada de la falla por fluencia de la armadura de flexión.

En la figura 1 se indican las fuerzas horizontales que actúan en la sección cerca de superficie de falla de una unión losa-columna.

La condición de equilibrio es:

$$C_1 + C_2 = T_1 + T_2 \quad \text{donde no necesariamente } C_1 = T_1 \quad (1)$$

La fuerza C_1 puede distribuirse alrededor del hormigón, en función de la rigidez de la losa. Esto conduce a la idea de que aumentando la cuantía de armadura a través de la pirámide puede incrementarse la resistencia al punzonado, produciendo una mayor altura de zona comprimida en el hormigón y un incremento en el efecto pasador de la armadura. Sin embargo, el incremento de la cuantía tiene un efecto limitado en la resistencia al punzonado, porque parte de la fuerza de la armadura puede equilibrarse fuera de la pirámide de falla y el efecto pasador de la armadura no es significativo cuando se desprende el recubrimiento.

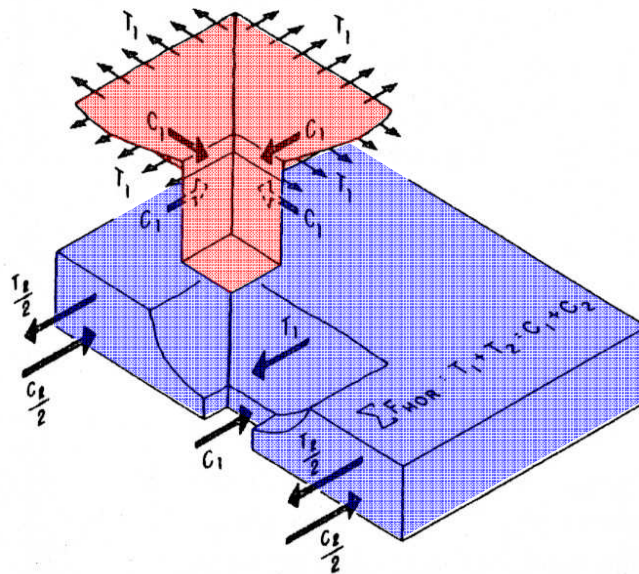


Figura 1 – Fuerzas horizontales que actúan en la sección cerca de superficie de falla de una unión losa-columna

La rigidez de la losa que rodea la región de falla restringe la deformación de la unión losa-columna en el plano paralelo a la losa. Esta restricción a la deformación genera esfuerzos de compresión que incrementan la capacidad al corte y flexional en la zona crítica, pero esto también reduce la ductilidad del modo de falla.

Este cambio en el modo de falla puede representarse a través de la curva carga-deflexión para losas con diferentes cuantías de armadura a flexión. Para cuantías bajas, generalmente la falla se produce por la fluencia de la armadura. En este caso ocurre una falla dúctil, es decir con grandes deformaciones plásticas. Cuando la cuantía es grande, se puede producir una falla frágil o quebradiza (falla por punzonado). Podría presentarse conjuntamente a una falla por fluencia de la armadura. En este caso las deformaciones son pequeñas y mayormente elásticas. En la siguiente figura 2 se esquematizan las curvas carga-deflexión para una cuantía baja (falla dúctil) y una cuantía alta (falla frágil)

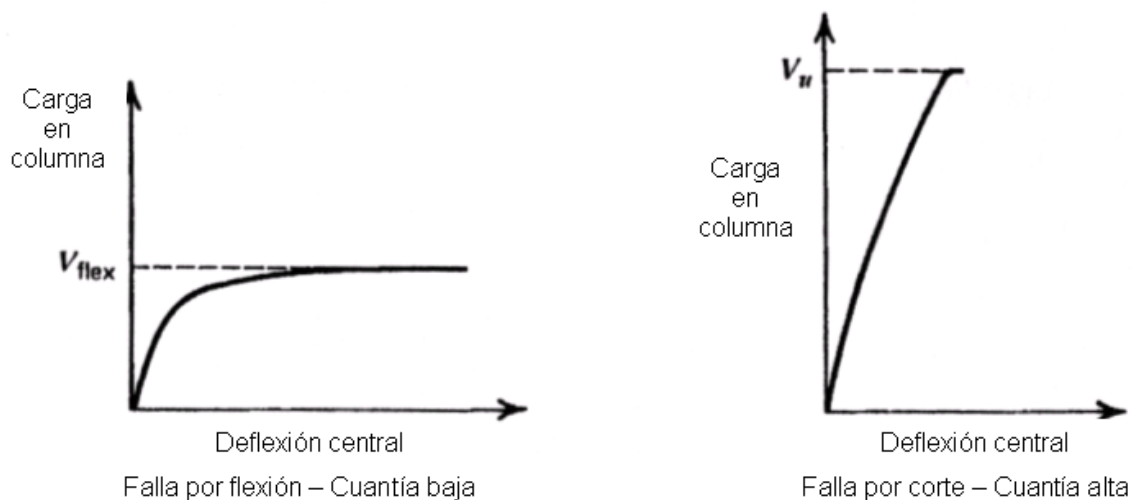


Figura 2 – Efecto de la cuantía de armadura en la curva carga-deflexión

Los principales Parámetros considerados en el desarrollo teórico del modelo son:

- Resistencia cilíndrica a compresión del hormigón (f'_c).
- Relación de longitud del lado de la columna y la altura efectiva de la losa.
- Relación de longitud de los lados de la columna.
- Tipo de agregado del hormigón (hormigón normal o alivianado).

2.2. CARGA DE FALLA POR PUNZONADO SEGÚN ACI

El código ACI (ACI-318-02)⁶ recomienda para el diseño de secciones sometidas predominantemente a esfuerzos de corte sin armadura de refuerzo:

$$V_u \leq \phi \cdot V_c \quad (2)$$

con

V_u resistencia al corte de diseño en la sección considerada.

ϕ factor de reducción de la resistencia por corte ($\phi = 0,75$).

V_c resistencia nominal de corte del hormigón normal.

La resistencia nominal de corte (V_c [N]) en losas de hormigón normal, esta dada por el menor de los tres resultados de las expresiones siguientes:

Caso 1: Efecto de la forma de la columna o área cargada, β_c .

$$V_c = 0,083 \cdot \left(2 + \frac{4}{\beta_c} \right) \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_o \cdot d \quad (3)$$

Caso 2: Efecto de la relación entre el perímetro de la sección crítica y la altura útil, β_o .

$$V_c = 0,083 \cdot \left(2 + \frac{\alpha_s}{\beta_o} \right) \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_o \cdot d \quad (4)$$

Caso 3: Sin considerar los efectos de β_c y β_o .

$$V_c = 0,33 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_o \cdot d \quad (5)$$

donde

β_c es la relación entre la mayor y menor dimensión de la columna o superficie donde se aplica la carga. En columnas circulares $\beta_c = 1$.

α_s parámetro que indica como trabaja la columna, es decir, como columna interior, de borde o de esquina, tomando los valores 40, 30 y 20 respectivamente.

β_o es la relación entre el perímetro de la sección crítica y la altura útil de la losa.

f'_c resistencia cilíndrica a compresión del hormigón, en N/mm^2 .

d distancia de la fibra mas comprimida hasta el centro de gravedad de la armadura de flexión, en mm. Es la altura efectiva promedio de la losa.

b_o perímetro de la sección crítica, en mm.

Dado que la expresión no es dimensionalmente homogénea deben respetarse las unidades indicadas en cada parámetro, para obtener V_c en [N]

3. MODELO DE MENETREY

El trabajo experimental de Menétrey⁷ estudia las diferencias entre la falla por flexión y la falla por punzonado, en la unión losa-columna, incluyendo la influencia de la inclinación del cono de falla. Además, a través de la simulación numérica, estudió el mecanismo de falla en la unión losa-columna, obteniendo los parámetros más relevantes que influyen en este proceso. En base a esto, se propone un modelo analítico para predicción de carga de falla.

3.1 DIFERENCIAS ENTRE FALLA POR FLEXIÓN Y FALLA POR PUNZONADO, INFLUENCIA DE LA INCLINACIÓN DEL CONO DE FALLA

La curva carga-desplazamiento para un ensayo de unión losa-columna posee dos zonas características, a saber: un tramo desde el origen hasta el punto de carga máxima (carga pico) y otro tramo desde el punto de carga máxima en adelante. El paso del primer tramo al segundo caracteriza el tipo de falla, que puede ser dúctil (cuando hay continuidad entre el tramo pre-pico y el tramo pos-pico) o frágil (se presenta un salto brusco en el paso de un tramo al otro).

Para cuantías elevadas se produce una falla frágil y para cuantías bajas una falla dúctil. Además, se obtienen inclinaciones diferentes del cono de falla, revelando una transición entre falla por punzonado y falla por flexión que es controlada por la inclinación de la superficie de falla (inclinación del cono).

En base a lo mencionado, Menétrey propone una expresión analítica para estimar la carga de falla (F_{falla}) en términos de una componente de punzonado (F_{pun}) y una componente de flexión (F_{flex}).

$$F_{falla} = F_{pun} + (F_{flex} - F_{pun}) \cdot \sqrt{\sin\left(\frac{\pi}{\pi - 2 \cdot \alpha_o} \cdot (\alpha - \alpha_o)\right)} \quad (6)$$

donde

α_o es la inclinación de superficie de falla cuando predomina la componente de punzonado y no tiene influencia la componente de flexión, es decir se presenta solamente punzonado.

Se ilustra en la figura 3 el modelo propuesto por Menétrey, indicando las fuerzas de los elementos que intervienen en la resistencia a la falla. La carga de falla según el ángulo de inclinación del cono depende de una componente flexional y una componente de punzonado.

La componente flexional (F_{flex}) puede determinarse con la teoría de la carga última según el mecanismo de falla de líneas de fluencia (estado plástico del hormigón). En cuanto a la componente de punzonado (F_{pun}) se deduce a partir del equilibrio de fuerzas verticales en la posible región que configuraría el cono falla.

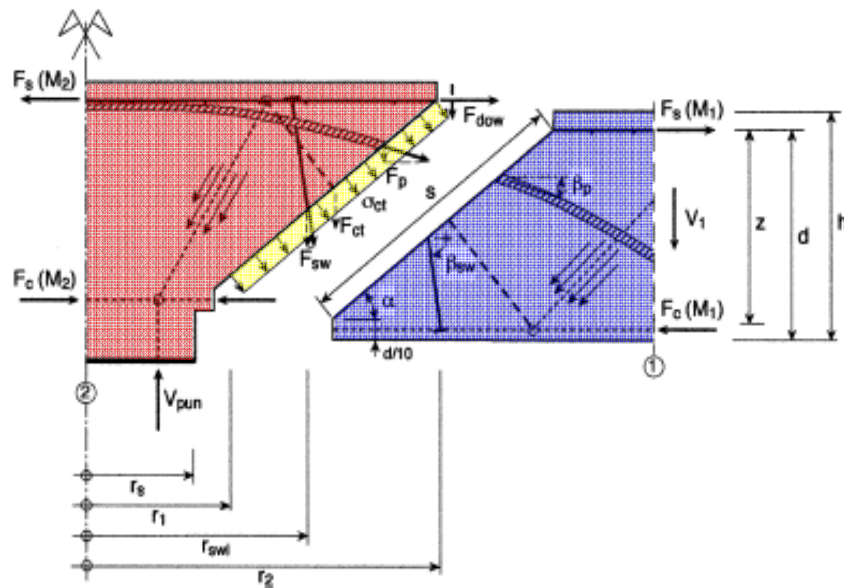


Figura 3 – Modelo de cálculo y fuerzas involucradas en la resistencia al punzonado.

Sea:

- V_{pun} Carga de la columna, carga exterior.
- F_{ct} Aporte de las tensiones de tracción del hormigón.
- F_{dow} Aporte de la armadura de flexión, efecto pasador.
- F_{sw} Aporte de barras dobladas, estribos y/o pernos.
- F_p Componente vertical de la fuerza de tesado.

A partir de la condición de equilibrio de fuerzas verticales surge la resultante de punzonado (F_{pun}), es decir:

$$F_{pun} = F_{ct} + F_{dow} + F_{sw} + F_p \quad (7)$$

Se asume que en la falla por punzonado la inclinación de la superficie de falla es de 30° ($\alpha_0 = 30^\circ$), esto tiene sus bases en observaciones experimentales. Con lo cual la expresión de la carga de falla resulta:

$$F_{falla} = F_{pun} + (F_{flex} - F_{pun}) \cdot \sqrt{\sin\left(\frac{3}{2}\alpha - 45^\circ\right)} \quad (8)$$

Para la estimación de la componente flexional puede aplicarse la teoría de la carga última según el mecanismo de falla de líneas de fluencia sin fisuras sobre la columna, que está dada por la siguiente expresión:

$$F_{flex} = \frac{2 \cdot \pi \cdot m_U}{1 - r_s/r_e} \quad (9)$$

con

- m_U momento flector último por unidad de ancho.
- r_e radio de apoyo de la losa.
- r_s radio de la columna.

3.2. COMPONENTE DE PUNZONADO

De acuerdo a los objetivos de este trabajo, en la estimación de la componente de punzonado (F_{pun}) solo se tendrá en cuenta el aporte de las tensiones de tracción del hormigón (F_{ct}) y la armadura de flexión (F_{dow}).

$$F_{pun} = F_{ct} + F_{dow} \quad (10)$$

3.2.1. APOORTE DE LAS TENSIONES DE TRACCIÓN DEL HORMIGÓN (F_{ct})

La resultante de las tensiones de tracción del hormigón, se determina integrando las componentes verticales (σ_v) de las tensiones de tracción (σ_{ct}) que actúan en la superficie de falla.

Si se considera una distribución uniforme de σ_v , el cálculo (F_{ct}) se simplifica al multiplicar dicha tensión (σ_v) por el área de la superficie de falla.

$$F_{ct} = A_{falla} \cdot \sigma_v \quad (11)$$

con

Área de la superficie de falla (A_{falla}):

Se considera que la superficie de falla es un cono truncado, comprendido entre dos radios r_1 y r_2 como se muestra en figura 3. Estos radios se estiman de la siguiente manera:

$$r_1 = r_s + \frac{1}{10} \cdot \frac{d}{\tan \alpha} \quad r_2 = r_s + \frac{d}{\tan \alpha} \quad (12)$$

$$\text{La longitud inclinada } s \text{ se calcula como: } s = \sqrt{(r_2 - r_1)^2 + (0,9 \cdot d)^2} \quad (13)$$

Entonces, el área de la superficie de falla resulta:

$$A_{falla} = \pi \cdot (r_1 + r_2) \cdot s \quad (14)$$

Componentes verticales (σ_v) de las tensiones de tracción (σ_{ct}):

$$\sigma_v = f_t^{\frac{2}{3}} \cdot \xi \cdot \eta \cdot \mu \quad (15)$$

Donde

f_t Resistencia uniaxial a la tracción del hormigón.

ξ Influencia de la cuantía de la armadura de flexión (ρ) en la resistencia a tracción en el hormigón. Se determinó mediante simulación numérica:

$$\xi = \begin{cases} -0,1 \cdot \rho^2 + 0,46 \cdot \rho + 0,35 & 0 < \rho < 2\% \\ 0,87 & \rho \geq 2\% \end{cases} \quad (16)$$

η Efecto tamaño, relaciona el espesor de losa (h) y el radio de columna (r_s). Se determinó mediante simulación numérica:

$$\eta = \begin{cases} 0,1 \cdot (r_s/h)^2 - 0,5 \cdot (r_s/h) + 1,25 & 0 < r_s/h < 2,5 \\ 0,625 & r_s/h \geq 2,5 \end{cases} \quad (17)$$

μ Efecto tamaño, relaciona el tamaño máximo del agregado (d_a) y la altura útil de losa (d). Se determinó mediante simulación numérica:

$$\mu = 1,6 \cdot (1 + d/d_a)^{-1/2} \quad \text{con } d > 3 \cdot d_a \quad (18)$$

3.2.2. APOORTE DE LA ARMADURA DE FLEXIÓN (F_{dow})

Las fuerzas que pueden transferir las barras de la armadura de flexión (efecto pasador) que cruzan la superficie de falla, se pueden estimar según Menétrey de la siguiente forma:

$$F_{\text{dow}} = \frac{1}{2} \cdot \sum^{n \text{ sec barras}} \phi_s^2 \cdot \sqrt{f_c \cdot f_s \cdot (1 - \zeta^2)} \cdot \sin \alpha \quad (19)$$

La sumatoria se extiende a todas las barras que cruzan la superficie de falla. Se asume que hay una relación parabólica entre la fuerza axial de la barra y la fuerza F_{dow} , la cual está dada por el término $(1 - \zeta^2)$. El factor $\frac{1}{2}$ es un factor promedio que tiene en cuenta los ángulos en plano horizontal con los que las barras atraviesan la superficie de falla. El término “ $\sin \alpha$ ”, aminora la contribución de F_{dow} tomando en cuenta el ángulo entre la armadura de flexión y la superficie de falla.

Donde

- f_s Tensión de fluencia de la armadura de flexión.
- f_c Resistencia a la compresión del hormigón.
- ϕ Diámetro de las barras.
- ζ Relación entre la tensión tracción en la barra (σ_s) y la tensión de fluencia.

$$\zeta = \frac{\sigma_s}{f_s} \quad \text{donde} \quad \sigma_s = \frac{F_{\text{pun}} / \tan \alpha}{\sum^{n \text{ sec barras}} A_s} \quad (20)$$

3.3. ANÁLISIS PARAMÉTRICO

El tipo de falla ya sea por punzonado, por flexión o mixto, se puede establecer según la inclinación de la superficie de falla. A continuación, se indican los tipos de falla y la inclinación α correspondiente a la superficie de falla:

- Falla por Punzonado $\alpha = 30^\circ$
- Falla por Punzonado y Flexión $30^\circ < \alpha < 90^\circ$
- Falla por Flexión $\alpha = 90^\circ$

La aplicación del modelo de Menétrey involucra procesos iterativos, lo que condujo al desarrollo de algoritmos programados. El ángulo α se determina con proceso iterativo adoptándose el correspondiente a la menor carga.

Para una determinada geometría y resistencia del acero que se indican a continuación:

Radio de apoyo: 0,79 m
Diámetro de columna: 0,25 m
Espesor de losa: 0,15 m
Recubrimiento: 2,5 cm
Altura útil: 0,125 m
Acero: ADN 420

Se variaron la resistencia del hormigón y la cuantía de armadura de flexión

- cuantía 1,26%, Ø 10 mm cada 5 cm
- cuantía 0,63% Ø 10 mm cada 10 cm
- cuantía 0,31% Ø 8 mm cada 13 cm

y se consideraron intervalos de variación para la resistencia característica del hormigón: **15MPa a 45MPa**

Los resultados del modelo del ACI 318-02⁶ y del modelo de Menétrey⁷, se muestran en las curvas de las figuras 4, 5 y 6.

El modelo del ACI 318-02, brinda resultados diferentes con respecto al modelo de Menétrey. Se considera, que ésta diferencia, radica en que el modelo del ACI 318-02, no tiene en consideración la influencia de la cuantía de la armadura de flexión, en la falla por punzonado.

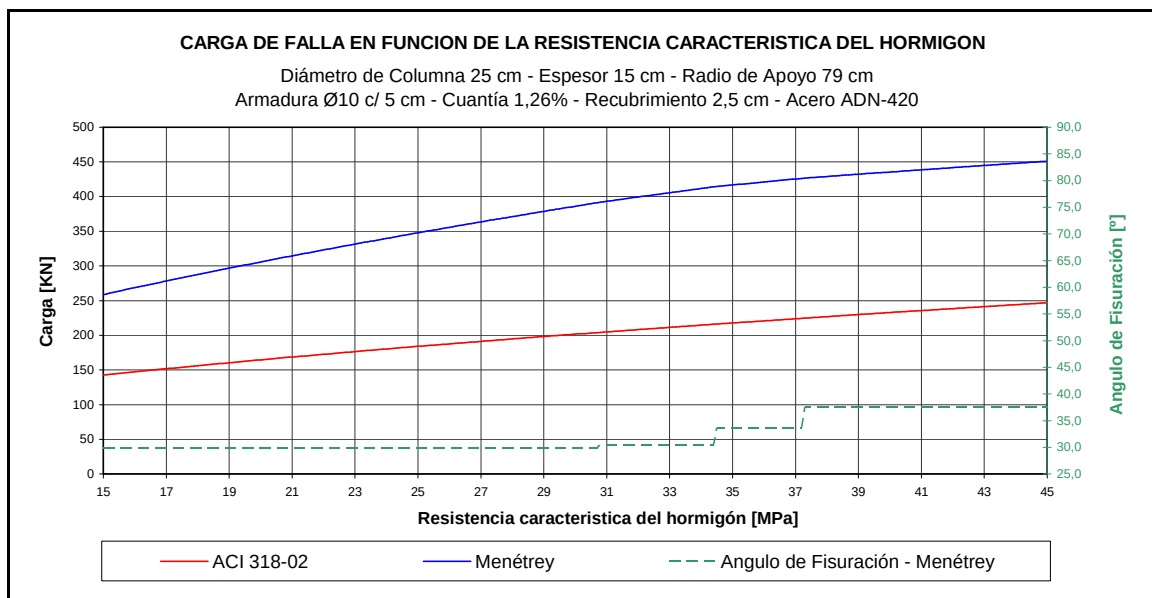


Figura 4 – Carga de falla en función de la resistencia característica del hormigón. Cuantía 1,26%.

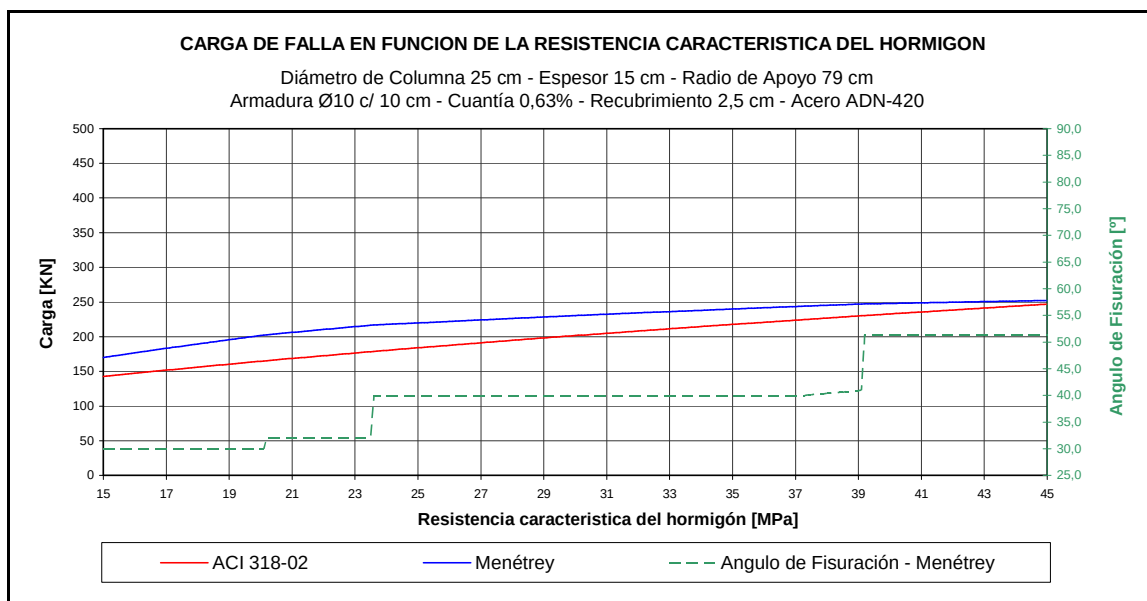


Figura 5 – Carga de falla en función de la resistencia característica del hormigón. Cuantía 0,63%.

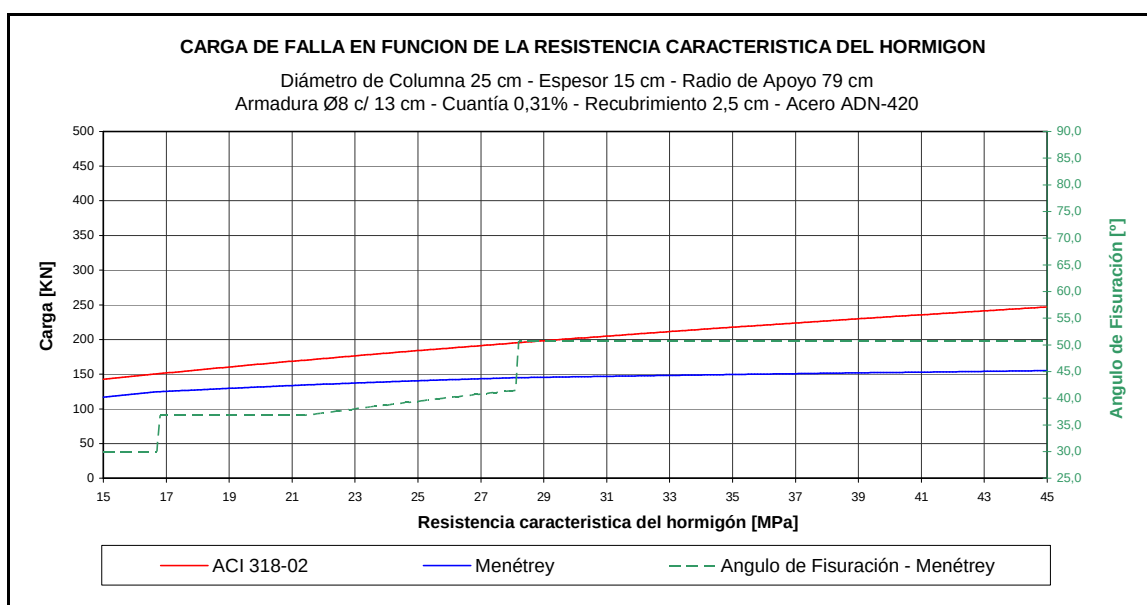


Figura 6 – Carga de falla en función de la resistencia característica del hormigón. Cuantía 0,31%.

4. ENSAYO EXPERIMENTAL

Como primera premisa, se plantea como límite **500KN** para la carga última, aún considerando que los actuadores hidráulicos disponibles pueden aplicar cargas de hasta 1000KN. La base de este planteo se fundamenta en la seguridad de trabajo, como así también del instrumental a utilizar.

Se adopta un **sistema de apoyo perimetral**, formado por barras (trabajando a tracción) sujetas en uno de sus extremos a la losa a ensayar y en el otro a la losa reactiva del laboratorio. La posición de las barras esta sujeta a los orificios que

dispone la losa reactiva (orificios para fijar equipo de ensayo). Para lograr la mayor uniformidad en la distribución de las barras y la menor luz de apoyo se adoptaron ocho puntos de apoyo (8 barras). (ver figura 7)

Para la geometría y armadura de flexión se propusieron una serie de valores según los parámetros de diseño. Estos últimos se cargaron en un programa computacional basado en el método Menétrey y se obtienen los resultados de cargas de falla que se adjuntan en la Tabla 2.

Resistencia del hormigón a compresión f_c' [MPa]	21
Resistencia del hormigón a tracción f_t [MPa]	2,52
Diametro máximo del agregado d_a [mm]	9,5
Resistencia del acero f_s [MPa]	420
Radio de apoyo r_e [m]	0,790
Recubrimiento [cm]	2,5

Tabla 1 – Planilla de Ingreso de datos

En la Tabla 2 se encuentran los resultados del método de Menétrey para los parámetros indicados.

Espesor de Losa = 15 cm
 Diámetro de Columna (Filas)
 Diámetro de Armadura (Filas)
 Separación de Armadura (Columna)

El valor correspondiente a estos parámetros es la carga de falla. Además se incorporó una escala cromática (escala en base a colores), con el fin de indicar en forma aproximada el correspondiente ángulo de fisuración. Por lo tanto, no sólo se obtiene el valor de la carga, si no también el posible mecanismo de falla.

4.1 ELECCIÓN DEL ESPÉCIMEN

De los resultados obtenidos se cuenta con una amplia variedad de especímenes, entre los cuales se debe adoptar uno. El criterio de elección se basa en la carga máxima aceptable ($F_{falla} < 500\text{KN}$), en economía de materiales y en el objetivo principal que consiste en reproducir una falla por punzonado ($\alpha = 30^\circ$). Entonces, el espécimen adoptado tiene las siguientes características (ver figura 7):

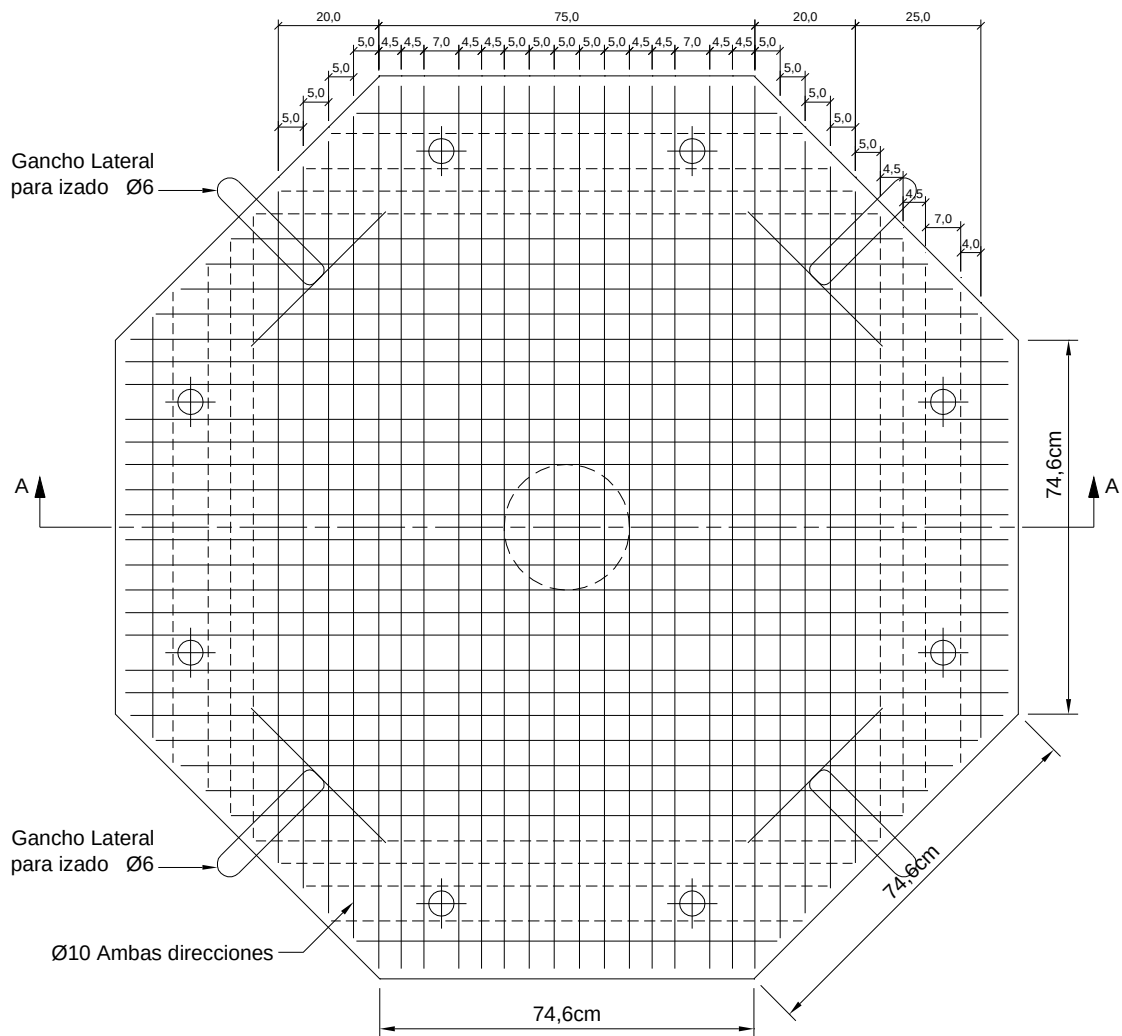
Espesor de Losa 15 cm.
 Angulo de Fisuración $\alpha = 30^\circ$.
 Diámetro de Columna 25 cm.
 Diámetro de Armadura $\phi 10$ mm.
 Separación de Armadura 5 cm.
 Carga de Falla 315KN

CARGA DE FALLA POR PUNZONADO [KN] VARIACION DE DIAMETRO DE COLUMNA Y CUANTIA

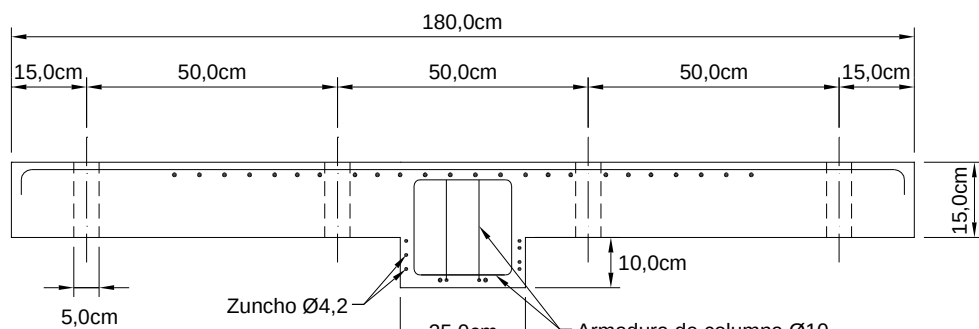
Angulo de Fisuración [°] - Escala Cromática											
30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
Diámetro de columna [cm]	Ø [mm]	Espesor de Losa [cm] 15 Recubrimiento [cm] 2,5									
		Separación de barras [cm]									
		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
25	6	229	194	161	148	136	97	94	92	90	88
	8	325	271	240	211	198	158	154	147	144	141
	10	423	356	315	275	256	231	221	208	193	189
	12	518	437	393	343	320	298	277	257	238	233
30	6	239	203	179	146	137	127	116	85	84	83
	8	338	284	252	223	203	190	179	142	138	135
	10	440	373	331	291	262	244	228	206	196	189
	12	539	458	414	364	327	305	284	263	257	239
35	6	251	214	181	165	135	128	121	112	100	78
	8	357	301	263	234	213	201	189	176	160	129
	10	466	398	346	306	277	259	243	227	213	186
	12	573	492	434	384	347	324	303	282	263	251
40	6	262	222	196	168	153	126	120	115	109	100
	8	375	313	274	244	224	200	190	182	171	160
	10	491	414	362	321	291	264	247	232	227	213
	12	606	512	454	403	366	330	308	287	281	262
45	6	270	229	200	179	157	144	119	115	110	104
	8	386	324	284	255	234	215	191	182	175	166
	10	507	429	376	335	306	278	261	245	231	217
	12	626	532	474	423	385	349	327	306	286	267
50	6	282	237	212	185	157	147	137	114	110	107
	8	404	335	295	265	238	225	207	185	177	171
	10	532	445	392	350	311	292	266	250	235	230
	12	660	552	494	442	391	368	332	311	291	285
55	6	294	249	219	189	174	150	142	132	110	107
	8	422	353	307	270	249	230	218	207	179	173
	10	558	470	407	356	326	297	280	264	249	235
	12	694	586	514	449	411	374	351	330	310	290
60	6	303	257	228	205	180	165	144	137	128	107
	8	436	365	319	282	261	241	223	211	201	174
	10	575	487	424	372	341	313	286	270	254	249
	12	715	607	535	470	432	394	358	336	316	310
65	6	317	267	237	212	185	172	148	141	134	125
	8	456	379	332	295	267	253	233	222	210	197
	10	603	505	442	389	349	329	302	286	270	256
	12	752	630	558	492	440	416	379	357	336	317
70	6	332	278	248	225	201	177	167	144	138	132
	8	479	394	346	309	280	260	248	230	219	208
	10	633	526	461	408	367	338	320	293	278	263
	12	790	655	583	517	464	425	402	366	345	325
75	6	345	294	259	235	210	184	173	162	142	137
	8	497	417	362	324	295	275	256	244	227	217
	10	656	557	482	428	387	357	329	312	296	281
	12	817	696	610	543	489	450	413	390	369	348

Tabla 2 – Planilla de Resultados Computacionales – Losa de 15 cm de espesor

DETALLE DE GEOMETRIA Y ARMADO



PLANTA



CORTE A-A

Figura. 7 – Geometría y detalle de Armadura de espécimen adoptado.

4.2 INFRAESTRUCTURA EXPERIMENTAL

La fase experimental se desarrolló en las instalaciones del Instituto de Estructuras “Ing. Arturo M. Guzmán” de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología de la UNT. En la figura 8 se esquematiza el sistema de aplicación de cargas y el dispositivo de apoyo empleado en el ensayo.

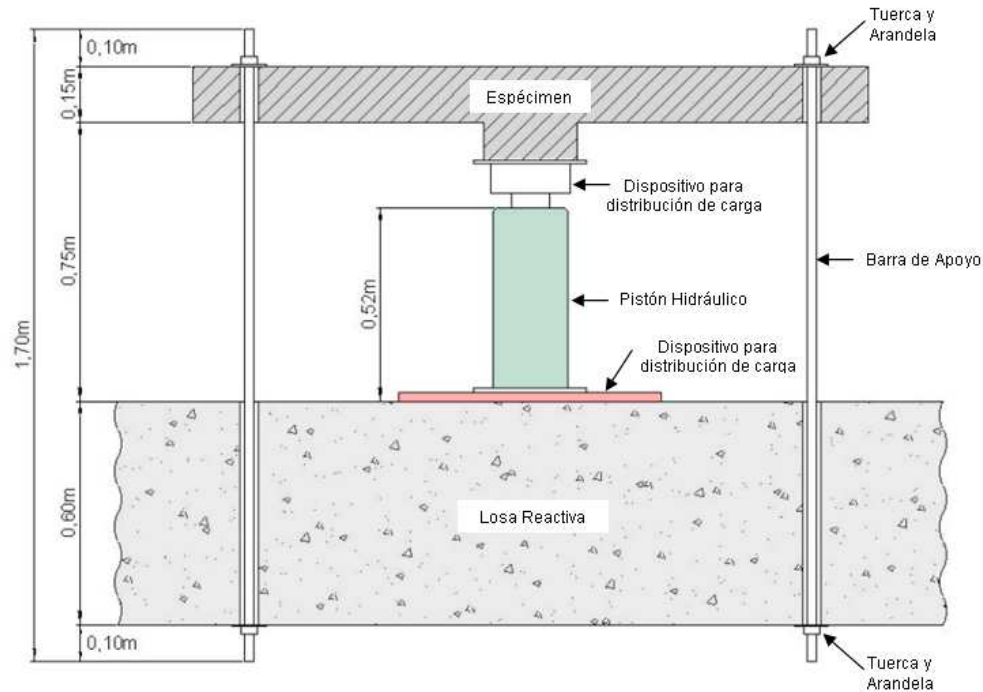


Figura 8 – Esquema del Ensayo Experimental



Figura 9 – Vista del prototipo y dispositivos de carga, apoyo y medición

4.3 MARCHA DEL ENSAYO

El ensayo consiste en llevar a la rotura el espécimen, registrando la variación de la carga aplicada, los desplazamientos correspondientes y todas las particularidades que se observen durante el ensayo.

Se aplicó una carga inicial de 100KN para acomodar los apoyos.

El registro de lecturas del instrumental de medición es automático y prácticamente instantáneo, debido al equipo de medición que se emplea. Además, permite el monitoreo de la evolución del ensayo desde una PC a través del software compatible con la tarjeta de adquisición de datos.

La carga aplicada registrada por el transductor de presión y mostrada en el visor del display, se controla en diferentes momentos del ensayo, con las lecturas del manómetro de la bomba del actuador hidráulico. Las lecturas del transductor de presión y del manómetro fueron aproximadamente iguales en el desarrollo del ensayo.

El ensayo duró aproximadamente 17 minutos, durante los cuales el instrumental registró toda variación de presión y desplazamiento por cada segundo transcurrido.

A medida que las fisuras se tornaban visibles, se fueron resaltando con un marcador el mapa de fisuración.

La Carga de Rotura experimental máxima obtenida resultó $P_{falla} = 477KN$

4.4 CURVA CARGA-DESPLAZAMIENTO

Con los valores obtenidos se construye la curva carga-desplazamiento. El desplazamiento (deflexión) del espécimen se calcula como la diferencia entre el desplazamiento (translación) central y el promedio de los desplazamientos (translación) del perímetro.

Puede observarse en figura 10, la deformación elástica y la deformación plástica remanente correspondiente a la carga de 150KN. El comportamiento plástico del hormigón está íntimamente relacionado con la formación y propagación de fisuras, las cuales pueden o no ser visibles. Desde el inicio del ensayo se producen micro fisuras, las cuales se propagan (siempre que no se esté en las ramas de un proceso descarga-carga, comportamiento elástico) hasta formar una superficie de falla (este es el caso cuando la falla se debe al hormigón) y, en ese momento, se genera la rotura.

En este gráfico la línea roja representa las lecturas efectuadas. En los tramos entre el origen y el punto A (antes del proceso descarga-carga), y entre los puntos B y C, no se dispone de datos. Esto se debe a que el ensayo se efectuó con control de carga, que es el único posible con el equipo empleado. Al producirse la rotura, se agota la resistencia del espécimen que se opone al desplazamiento del pistón del actuador hidráulico, produciendo un gran desplazamiento del pistón y, por no haber restricción alguna a este desplazamiento, se genera una caída brusca de la carga. A modo orientativo se ilustra en el mismo gráfico en línea de trazo color azul, como sería la forma de la curva en estas zonas.

Para obtener la curva completa y poder registrar la rotura brusca en la relación carga-desplazamiento es necesario que el ensayo sea con control de desplazamiento.

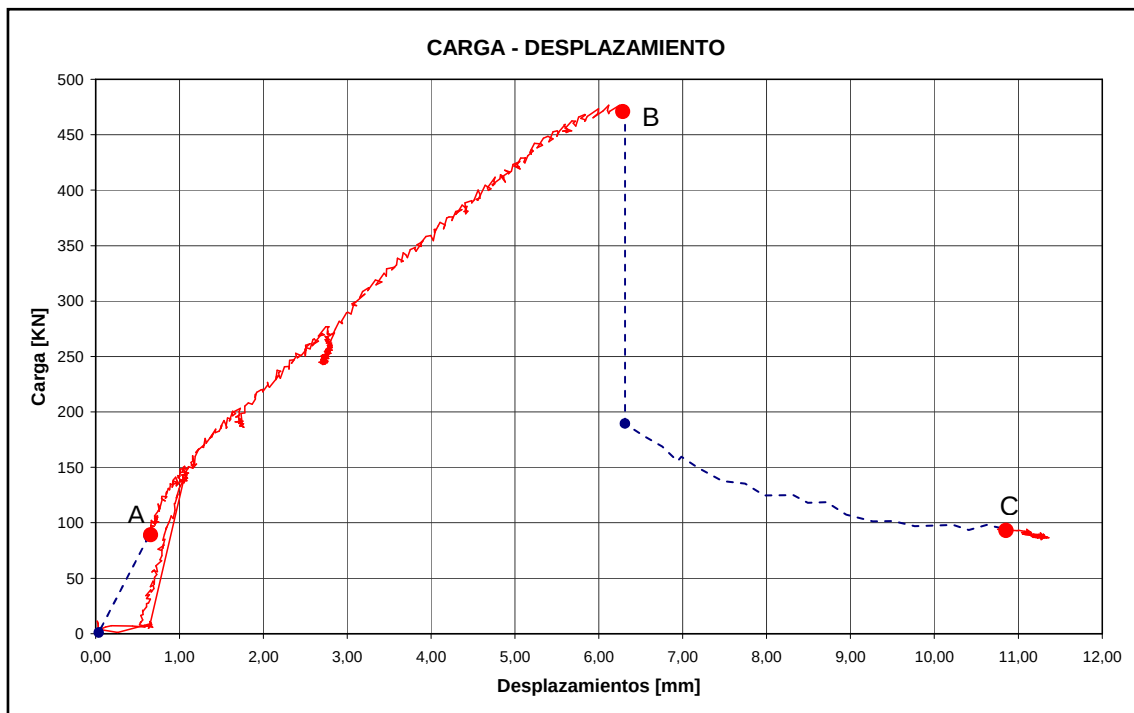


Figura 10 – Curva Carga - Desplazamiento

El mapa de fisuración resultante se muestra en figura 11. La distribución de fisuras no presenta uniformidad, esto se debe a una pequeña excentricidad en la aplicación de la carga. La misma se detectó analizando los videos del ensayo. La excentricidad se manifiesta por un pequeño desplazamiento horizontal del espécimen al producirse la falla.

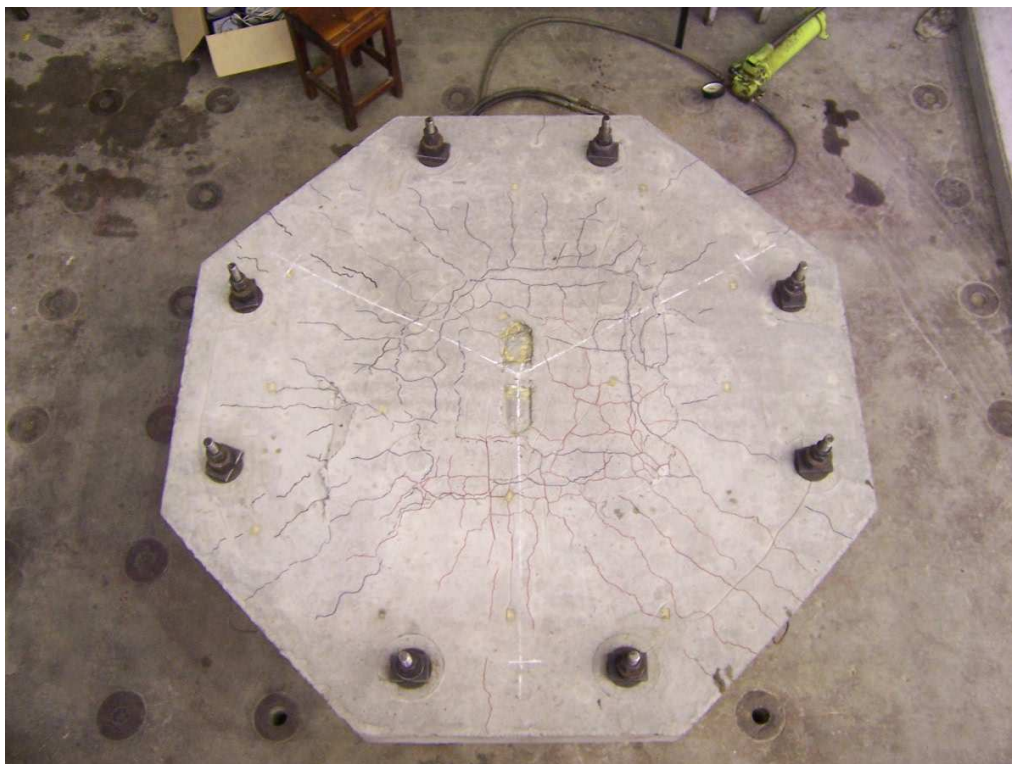


Figura 11 – Mapa de fisuración

Producida la rotura del espécimen, se procedió a retirar el instrumental y a extraer el cono de punzonado. Para ello fue necesario quitar el recubrimiento de la armadura alrededor del cono (Figura 12) y luego cortar las barras de acero.



Figura 12 – Cono de punzonado.

La inclinación del cono de punzonado, fue determinada empleando un goniómetro digital. Las mediciones se efectuaron en 4 zonas características, obteniendo como resultado inclinaciones entre 30° a 37°.

5. RESULTADOS DE CARGA DE FALLA

Para la predicción de la carga de falla según los diferentes modelos, se consideró la resistencia característica del hormigón H-21 en la etapa de proyecto. Teniendo en cuenta los resultados experimentales de las probetas de hormigón se incrementó la resistencia a rotura del hormigón al valor medio medido de $f'_{cm} = 37,2$ MPa.

PREDICCIÓN DE CARGA DE FALLA [KN]			VALOR EXPERIMENTAL
Etapas	ACI 318-02 ⁶	Menétrey ⁷	
Proyecto: $f'_c = 21$ MPa	167	315	477
Ensayo: $f'_{cm} = 37,2$ MPa	237	423	

Tabla 3 – Comparación de Cargas de Falla

6. OBSERVACIONES Y CONCLUSIONES

- Se ha comprobado que la falla por punzonado corresponde a una rotura tipo frágil. Siendo la causa principal el agotamiento de resistencia del hormigón.
- El cono de falla por punzonado tiene una inclinación de 30° aproximadamente.
- Las primeras fisuras en aparecer son las radiales y luego las circunferenciales.
- La carga de falla por punzonado, estimada según el modelo analítico propuesto por Menétrey, difiere en un 51% de la carga real de falla obtenida experimentalmente.
- La carga de falla por punzonado estimada según ACI 318-02, difiere en un 185% de la carga real de falla.

La diferencia porcentual de las predicciones de carga de falla, se estimó como la diferencia entre la carga real experimental y la predicción, dividida en la predicción y multiplicada por 100.

Estos resultados, no indican que los modelos analíticos son deficientes, si no, que ponen en evidencia el gran inconveniente de poder valorar la resistencia del hormigón durante la etapa de proyecto.

Si en los modelos analíticos, se introduce la resistencia del hormigón, correspondiente a la edad en que se produce la falla, los resultados obtenidos predicen la carga de falla con diferencias aceptables.

Tomando los resultados de las predicciones de carga de falla, obtenidos a través de la consideración de la resistencia media de rotura del hormigón, lo cual, puede asimilarse, como la resistencia del hormigón a la edad en que se producirá la falla, el error entre estos resultados y el resultado experimental, será el siguiente:

Modelo de Menétrey → Error 13%

ACI 318-02 → Error 101%

- El resultado obtenido con el ACI 318-02, refleja un criterio bastante conservador en la verificación al punzonado, al no tener en cuenta la influencia de la cuantía de acero conduce a un sobredimensionado de los elementos estructurales, con las consecuencias económicas correspondientes. Esto se manifiesta para cuantías de armadura de flexión, superiores a 0,5%. En el caso del ensayo presentado es de 1,26%.
- Como objetivos para futuros ensayos deberá considerarse la realización de ensayos de especímenes con diferentes cuantías de armadura de flexión.

7. AGRADECIMIENTOS

Cabe destacarse que este estudio se realizó en el marco del Proyecto de Investigación: "Estudio Teórico Numérico Experimental de la falla del hormigón en modo mixto" 26/E313, desarrollado en el Instituto de Estructuras de la UNT y financiado por el Consejo de Investigaciones de la UNT (CIUNT).

8. REFERENCIAS

- ¹ Xiao R.Y. Finite-element analysis of tested concrete connections. Computers & Structures 78 (2000): 247-255.
- ² Hallaren Mikael. Non-linear finite element analyses of punching shear failure of column footings . Cement & Concrete Composites 24 (2002): 491-496
- ³ Rüdiger Beutel. The effect of anchorage on the effectiveness of the shear reinforcement in the punching zone. Cement & Concrete Composites 24 (2002): 539-549.
- ⁴ Kankan C.K. Babadua reinforced concrete two-way slabs subjected to concentrated loading. Construction and Building Materials 20 (2006): 279-285.
- ⁵ Isla Caderón F.A. Estudio Analítico y Experimental de Punzonado. Proyecto Final de la Carrera de Ingeniería Civil. Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, U.N.T. (2008)
- ⁶ Código ACI 318 - 02, Chap. 16 - Shear in Slabs.
- ⁷ Menétrey Ph. Synthesis of punching failure in reinforced concrete. Cement & Concrete Composites 24 (2002): 497-507.