

*Manifestaciones patológicas en las construcciones*

**Una experiencia de aula a escala real: El ensayo de punzonado a placas de hormigón armado y pretensado**

*A classroom experience scale: The trial of a plate punching reinforced and prestressed concrete*

Ángel Rico, Darío Vercesi, Guillermo Bevilaqua, Eduardo Bevilaqua, Marcos Blanc, Viviana Rourgier  
BECARIOS: Cotorruelo Ezequiel, Walbing Juan, Pagano Carla

*Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Concordia  
civil@frcon.utn.edu.ar*

**Resumen**

Una de las dificultades en la enseñanza de la Ingeniería Estructural en la Carrera de Ingeniería Civil es contar con posibilidades a escala real de realizar ensayos del comportamiento de los elementos estructurales. El Área Estructuras de la Regional contando con la colaboración de una planta hormigonera, y del Área Materiales se propuso realizar el ensayo de punzonado de una placa de hormigón armado y pretensado con los alumnos del curso de grado. Para ello se construyó un bastidor de ensayo, se dosificaron las mezclas de hormigón según proyecto. Se realizó el ensayo y se midieron las deformaciones en el tiempo. El resultado final logrado estuvo dentro del rango de lo proyectado.

Palabras clave: Hormigón-estructuras-punzonado-escala real

**Abstract**

One of the difficulties in teaching of Structural Engineering in Civil Engineering is to have real chance at testing the behavior of structural elements. The structures of the Regional Area with the collaboration of a concrete plant, and the area was proposed Materials Testing punching a concrete slab and prestressed with students of the degree course. This frame is built a test mixtures were dosed according project concrete. Test conducted and deformation were measured over time. The end result was achieved within the projected range.

Keywords: Concrete-structures-punching-full scale

## 1 Introducción

El peligro del punzonado se presenta en el caso de placas cargadas en forma puntual, el comportamiento bajo carga y el tipo de rotura, son tratados durante el dictado de clases.

En la actualidad existe muy poca teoría totalmente satisfactoria y aceptable para el cálculo de la carga de punzonado (1).

El mejor procedimiento de cálculo fue desarrollado por los Suecos S. Kinnunem y H. Nylander llamando teoría (N-K) en Estocolmo(2), sobre la base de innumerables ensayos, y fue adoptada por el Euro Código y el CEB (3) y los distintos reglamentos del mundo.

En la universidad de Stuttgart, H. Reimann (4) estudio el problema tratando de mejorar el procedimiento, pero posteriormente en Zurich el trabajo de w. Schaeidt, y M. Lander y A. Rosli (5), demostraron que los valores de H. Reimann, eran demasiado elevados y confirmaron el grado de validez de la teoría (N-K).

En la actualidad los nuevos reglamentos hacen referencia al estado de tensiones necesarias para que se verifiquen y no se produzca la falla de punzonado (6).

Existen además disposiciones de espesores mínimos reglamentarios, que en nuestro caso no han sido considerados a los efectos de que la falla se produzca con el equipamiento disponible en la Regional.

El punzonado consiste en un tipo de falla muy difícil de ver en obra, y en el caso de que ocurra, lleva al colapso de un grado importante de la estructura.

Durante el comportamiento de la falla se producen en la zona vecina a la carga momentos radiales y tangenciales, también se producen deformaciones específicas  $\delta_{\theta}$  tangenciales y  $\delta_r$  radiales.-Para valores cercanos a la falla aparecen fisuras circulares a partir de las cuales se genera un cono de falla de aproximadamente de 30 a 35°.

Al mismo tiempo, cerca de la zona de carga, se forma una zona cónica de compresión por flexión, en torno a la columna, para nuestro ejemplo el gato de carga, donde la placa queda solicitada en forma triaxial, por  $\sigma_r$  (radial),  $\sigma_t$  (tangencial) y  $\sigma_v$  (vertical).

Este estado de Tensiones Triaxial es el que lleva a la falla en forma de cono, a través de una sollicitación de corte por compresión radial.

Por tal motivo es de vital importancia para la formación del alumno ver, identificar, cuantificar, valores de carga y desplazamientos, formas de falla, proceso de comportamiento, fisuración y posterior rotura de las piezas a ensayar.

Esta experiencia no tiene la finalidad de llegar a valores teóricos, de carga de rotura, sino que se trata de un ensayo, meramente experimental desde el punto de vista de la Enseñanza, toma de datos para ser procesados y contrastados con valores teóricos por los mismos alumnos.-

## 2 Metodología y desarrollo

### 2.1 Parámetros de diseño

A) En el caso de las losas de Hormigón Armado, se trata de dos losas de  $L_x=L_y= 1,4$  m, con un espesor de  $d=9$  cm.

Una de las losas ha sido armada con una armadura mínima en ambas direcciones, colocándose un  $\phi 6$  de 6 mm cada 20 cm.

Para el otro caso se ha reforzado en la zona central de la luz con 2  $\phi 6$  mm en ambas direcciones.

Para el colado de las placas se utilizo un hormigón H-13 y un Acero ADN 420 según la reglamentación vigente a la fecha.

Se pretende en ambos casos que la falla de produzca por rotura en al hormigón en la forma descripta.

Para la determinación de la carga de punzonado se utilizo la teoría de S. Kinnunem y H. Nylander con la siguiente expresión matemática.

$$P_u = 1,1 * \pi * k_s * h^2 * k_x * \frac{1 + \frac{2 * k_x}{k_s}}{1 + \frac{k_x}{k_s}} \sigma_K * f(\alpha) ;$$

$$k_s = 2 * \frac{r_s}{h}$$

para  $k_s \leq 2$

$$\sigma_K = 825 * (0.35 + 0.3 * \frac{\beta_s}{\beta_s}) * (1 - 0.22 * k_s)$$

donde  $\sigma_K$  es la tensión crítica al comienzo del punzonado.

$r_s$ =radio del gato de carga que simula la columna.

$k_x$ , indica la posición del eje neutro.

Y Donde  $f(\alpha)$  es función de  $\alpha$

Las placas fueron diseñadas para que los valores de rotura ronden el siguiente rango de carga:

Rango de Carga de Rotura: 2,10 a 3,50 toneladas para una impronta de carga de 10x10 cm.-

Valor Teórico de  $\delta u= 19,40$ cm.

Rango de Carga de Rotura: 3.4 a 4,20 toneladas para una impronta de carga de 10x10 cm.-.

Valor Teórico de  $\delta u = 26,92$  cm.

## 2.2 Zona tronco cónica solicitada en forma triaxial.

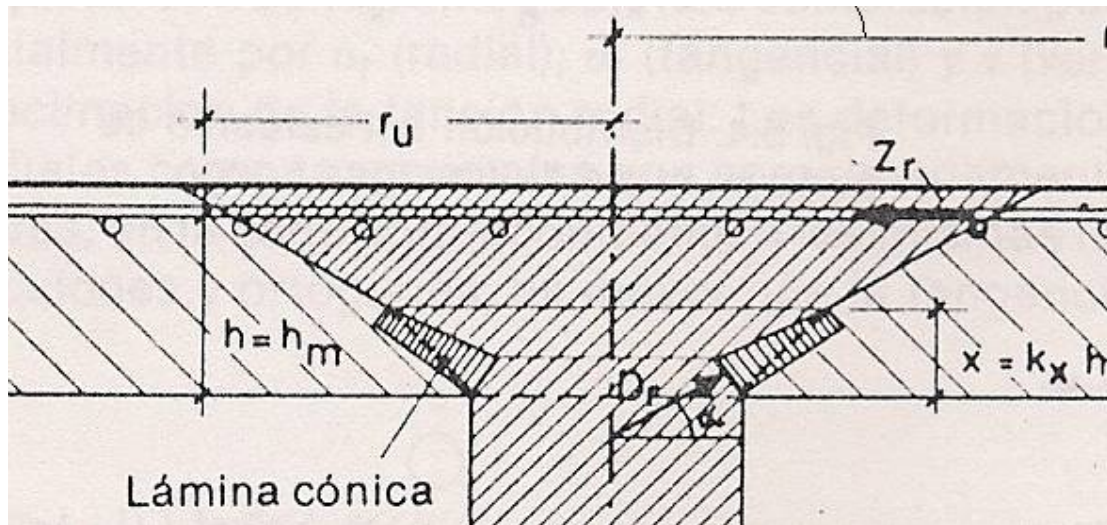


Figura 1 - Ejemplo de proceso de desarrollo de fisuras antes de la rotura.

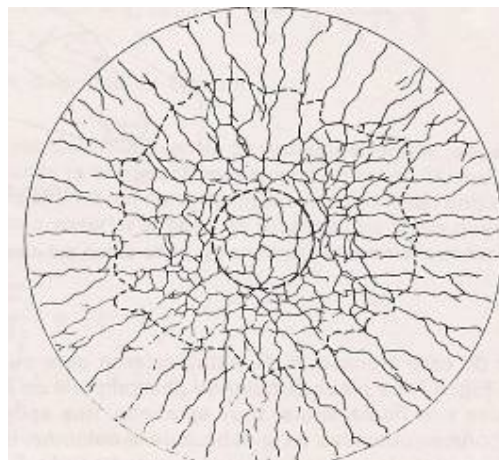
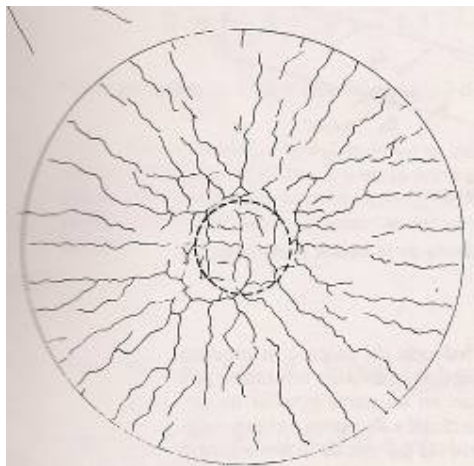


Figura 2 Comienzo de la fisuración.

Figura 3 Estado de fisuración en el momento próximo a la rotura.

En las Figura 1 se observa el esquema de la sollicitación triaxial en la zona tronco cónica.

En las Figuras 2 y 3 se esquematiza el comienzo de la fisuración inicial y en el momento próximo a la rotura

Es importante para el alumno, la comprensión del estado de sollicitación triaxial, en la zona de falla, mediante la combinación de las tensiones  $\sigma_r$  (radial),  $\sigma_t$  (tangencial) y  $\sigma_v$  (vertical), dado que junto a otros pocos casos, no se da habitualmente en las sollicitaciones a que son sometidas las estructuras de Hormigón Armado.

### 2.3 Esquema de Armado. (Figura 4)

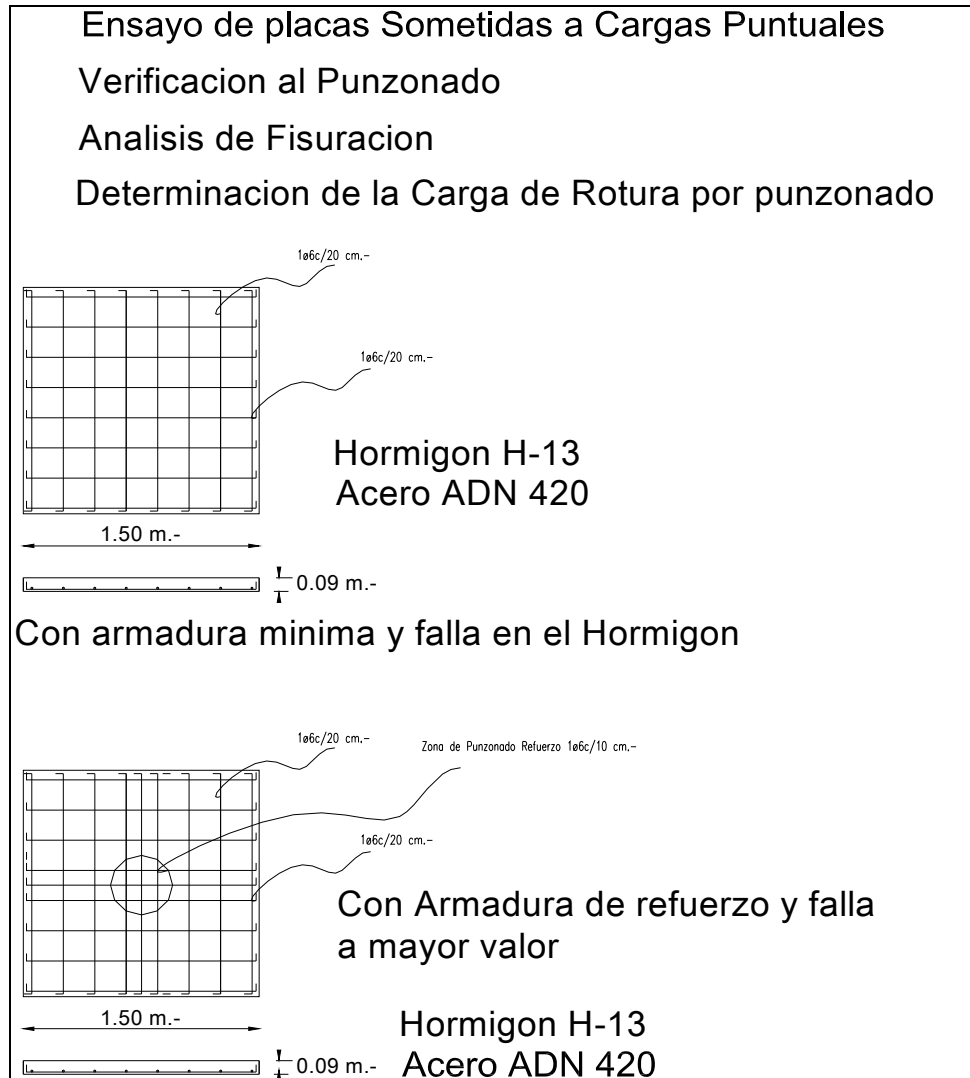


Figura 4

## 2.4 Posición de Flexímetros y Grafica de Deformaciones en dos planos, para la Placa sin Armadura de Punzonado.-

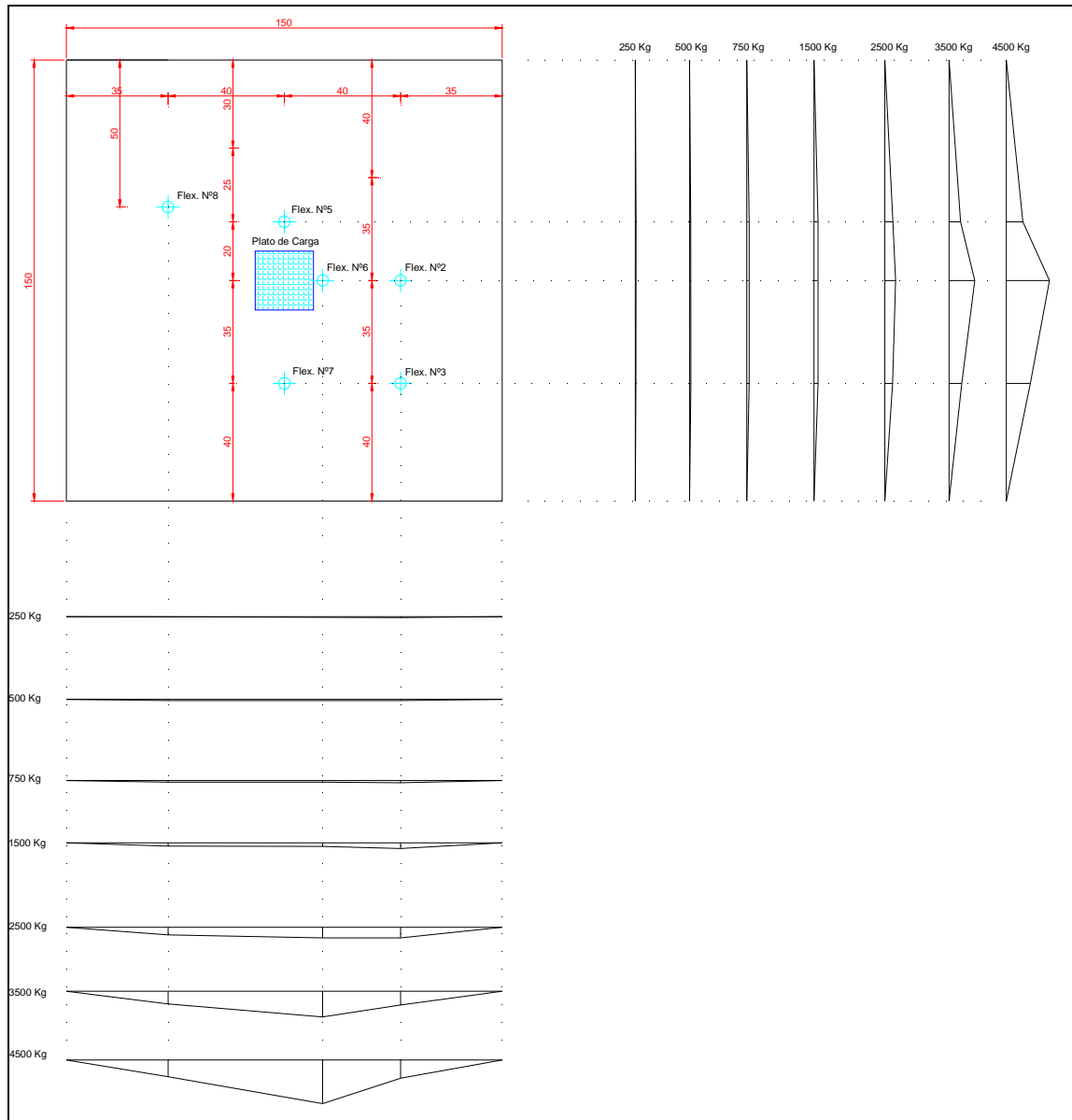


Figura 5

Se puede ver que en los primeros escalones de carga la deformación es prácticamente inapreciable (Figura 5), a partir de los 1000 kg comienza a notarse el descenso de los puntos centrales de la losa.

En las Figuras 6 y 7 se vuelcan las deformaciones medidas por cada Flexímetro y su correspondiente curva Carga-Deformación: No figuran registros del Flexímetro N°4 por defectos en el aparato al momento del ensayo.

Flexímetro Nº 1			
Carga	Manómetro	Deformación	Deformación
kg	kg/cm <sup>2</sup>	div	mm
250	4,35	42	0,42
500	12,24	61	0,61
750	20,12	85	0,85
1000	28,00	127	1,27
1250	35,88	154	1,54
1500	43,76	245	2,45
1750	51,64	320	3,20
2000	59,52	395	3,95
2250	67,40	488	4,88
2500	75,29	528	5,28
2750	83,17	578	5,78
3000	91,05	715	7,15
3250	98,93	834	8,34
3500	106,81	950	9,50
3750	114,69	1156	11,56

Flexímetro Nº 2			
Carga	Manómetro	Deformación	Deformación
kg	kg/cm <sup>2</sup>	div	mm
250	4,35	28	0,28
500	12,24	33	0,33
750	20,12	78	0,78
1000	28,00	113	1,13
1250	35,88	140	1,40
1500	43,76	188	1,88
1750	51,64	238	2,38
2000	59,52	286	2,86
2250	67,40	333	3,33
2500	75,29	359	3,59
2750	83,17	383	3,83
3000	91,05	413	4,13
3250	98,93	463	4,63
3500	106,81	448	4,48
3750	114,69	510	5,10
4000	122,57	535	5,35
4250	130,45	559	5,59

Flexímetro Nº 3			
Carga	Manómetro	Deformación	Deformación
kg	kg/cm <sup>2</sup>	div	mm
250	4,35	21	0,21
500	12,24	41	0,41
750	20,12	61	0,61
1000	28,00	81	0,81
1250	35,88	97	0,97
1500	43,76	121	1,21
1750	51,64	145	1,45
2000	59,52	195	1,95
2250	67,40	235	2,35
2500	75,29	274	2,74
2750	83,17	310	3,10
3000	91,05	342	3,42
3250	98,93	362,5	3,63
3500	106,81	397	3,97
3750	114,69	441,5	4,42
4000	122,57	501	5,01
4250	130,45	561	5,61
4500	138,33	572	5,72

Flexímetro Nº 5			
Carga	Manómetro	Deformación	Deformación
kg	kg/cm <sup>2</sup>	div	mm
250	4,35	25	0,25
500	12,24	44	0,44
750	20,12	72	0,72
1000	28,00	94	0,94
1250	35,88	130	1,30
1500	43,76	160	1,60
1750	51,64	201	2,01
2000	59,52	270	2,70
2250	67,40	340	3,40
2500	75,29	410	4,10
2750	83,17	490	4,90
3000	91,05	582	5,82
3250	98,93	634	6,34
3500	106,81	718	7,18
3750	114,69	817	8,17
4000	122,57	930	9,30
4250	130,45	1020	10,20

Figura 6 – Deformaciones medidas por los flexímetros

Flexímetro Nº 6			
Carga	Manómetro	Deformación	Deformación
kg	kg/cm <sup>2</sup>	div	mm
250	4,35		0,00
500	12,24		0,00
750	20,12	55	0,55
1000	28,00	78	0,78
1250	35,88	95	0,95
1500	43,76	116	1,16
1750	51,64	155	1,55
2000	59,52	197	1,97
2250	67,40	265	2,65
2500	75,29	365	3,65
2750	83,17	480	4,80
3000	91,05	580	5,80
3250	98,93	730	7,30
3500	106,81	880	8,80
3750	114,69	1020	10,20
4000	122,57	1180	11,80
4250	130,45	1317	13,17
4500	138,33	1490	14,90

Flexímetro Nº 7			
Carga	Manómetro	Deformación	Deformación
kg	kg/cm <sup>2</sup>	div	mm
250	4,35	15	0,15
500	12,24	45	0,45
750	20,12	75	0,75
1000	28,00	90	0,90
1250	35,88	113	1,13
1500	43,76	135	1,35
1750	51,64	155	1,55
2000	59,52	193	1,93
2250	67,40	225	2,25
2500	75,29	265	2,65
2750	83,17	303	3,03
3000	91,05	354	3,54
3250	98,93	382	3,82
3500	106,81	435	4,35
3750	114,69	486	4,86
4000	122,57	546	5,46
4250	130,45	697	6,97
4500	138,33	825	8,25

Flexímetro Nº 8			
Carga	Manómetro	Deformación	Deformación
kg	kg/cm <sup>2</sup>	div	mm
250	4,35	9	0,09
500	12,24	40	0,40
750	20,12	55	0,55
1000	28,00	67	0,67
1250	35,88	83	0,83
1500	43,76	107	1,07
1750	51,64	125	1,25
2000	59,52	165	1,65
2250	67,40	221	2,21
2500	75,29	260	2,60
2750	83,17	295	2,95
3000	91,05	335	3,35
3250	98,93	390	3,90
3500	106,81	435	4,35
3750	114,69	496	4,96
4000	122,57	542	5,42
4250	130,45	562	5,62

Flexímetro Nº 9			
Carga	Manómetro	Deformación	Deformación
kg	kg/cm <sup>2</sup>	div	mm
250	4,35	32	0,32
500	12,24	45	0,45
750	20,12	60	0,60
1000	28,00	65	0,65
1250	35,88	75	0,75
1500	43,76	100	1,00
1750	51,64	120	1,20
2000	59,52	140	1,40
2250	67,40	170	1,70
2500	75,29	195	1,95
2750	83,17	230	2,30
3000	91,05	253	2,53
3250	98,93	280	2,80
3500	106,81	323	3,23
3750	114,69	440	4,40
4000	122,57	565	5,65
4250	130,45	717	7,17

Figura 7 – Deformaciones medidas por los flexímetros



Como ejemplo se grafica la curva Tensión Deformación del Flexímetro N° 5 (Figura 4)

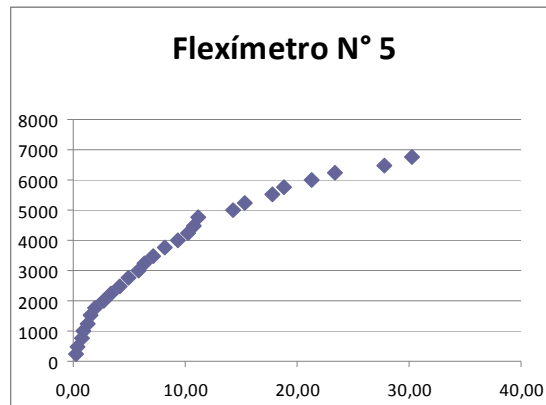


Figura 4

Los resultados obtenidos permitieron determinar la carga de rotura que alcanzo en este caso el valor de 4250 kg, siendo el valor teórico esperado de 3850 a 4200 kg.

La deformación y fisuración (radial y tangencial), fue similar al graficado en la bibliografía, con la cual el alumno pudo observar y comprender la falla por punzonado.

Secuencia fotográfica de armado, fisuración y falla de la placa con armadura minima y falla en el hormigón.(Fotos 1 a 5)



Foto 1



Foto 2



Foto 3



Foto 4



Foto 5

En el caso de la losa de hormigón pretensado, el modelo a ensayar tiene una luz total de 1.50m x 1.50m, luz entre apoyos 1.40m x 1.40m y un espesor de 0.06m, en hormigón calidad H30. La armadura de pretensado son dos trenzas de 3x2.25mm cada una, acero tipo C 1950, en ambas direcciones, en la zona central y separada 0.10m. Como armadura mínima se utilizó una malla de acero tipo AM500 (4mm – 0.15m x 0.15m) discontinuada en la zona central para no interferir con el acero de pretensado.

La carga última estimada teórica es de 6478kg.

## 2.5 Esquema de Armado – Figura 6

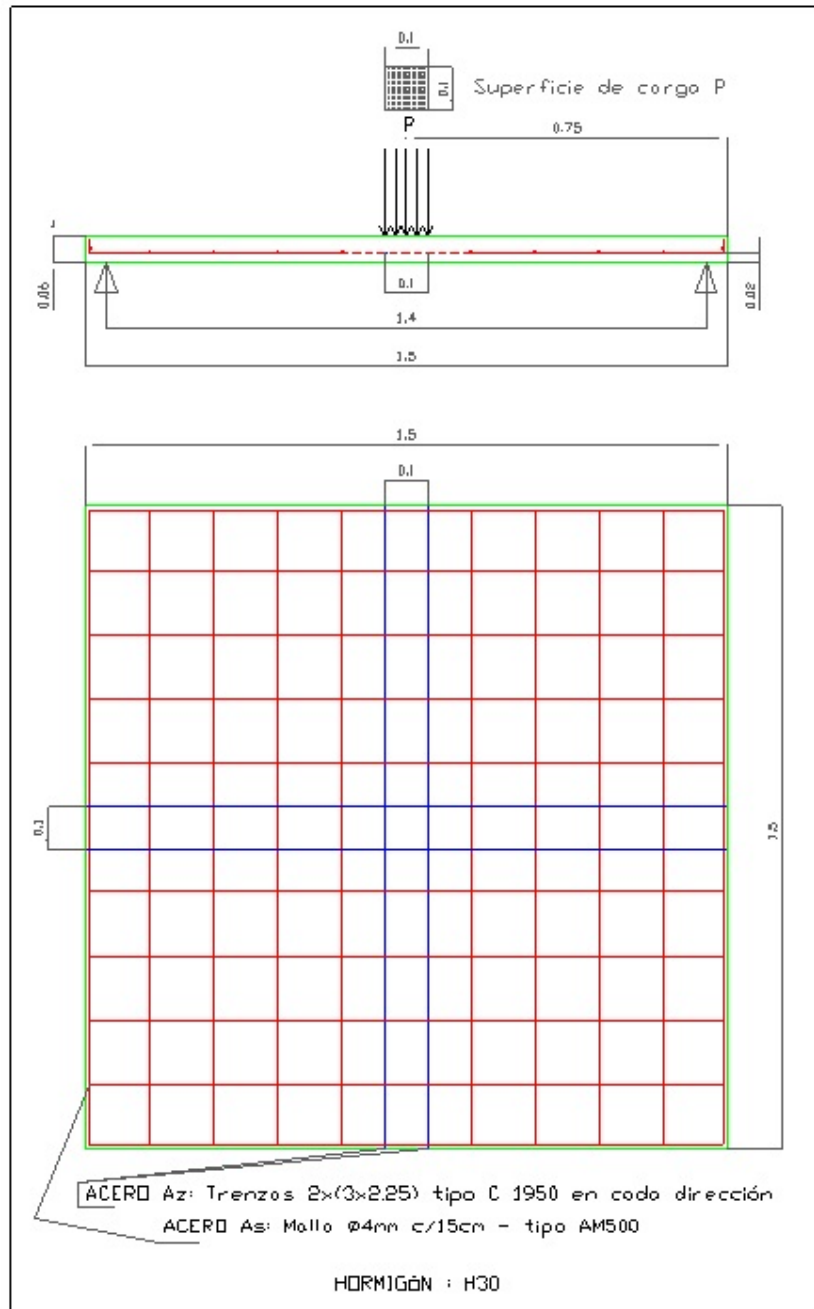


Figura 6

## 3 Análisis de resultados

De las lecturas de los flexímetros se observó que a partir de una carga de 1500kg las deformaciones se incrementaron significativamente sin mayor aumento de la misma, coincidiendo con el deslizamiento, hacia el interior de la losa, de las trenzas debido a falla del

anclaje por adherencia. Si bien no se pudo corroborar la carga última, el tipo de fisuras radiales y tangenciales se produjo en concordancia con la teoría.

Para el flexímetro Nº 5 el gráfico carga-deformación se observa en la Figura 7.

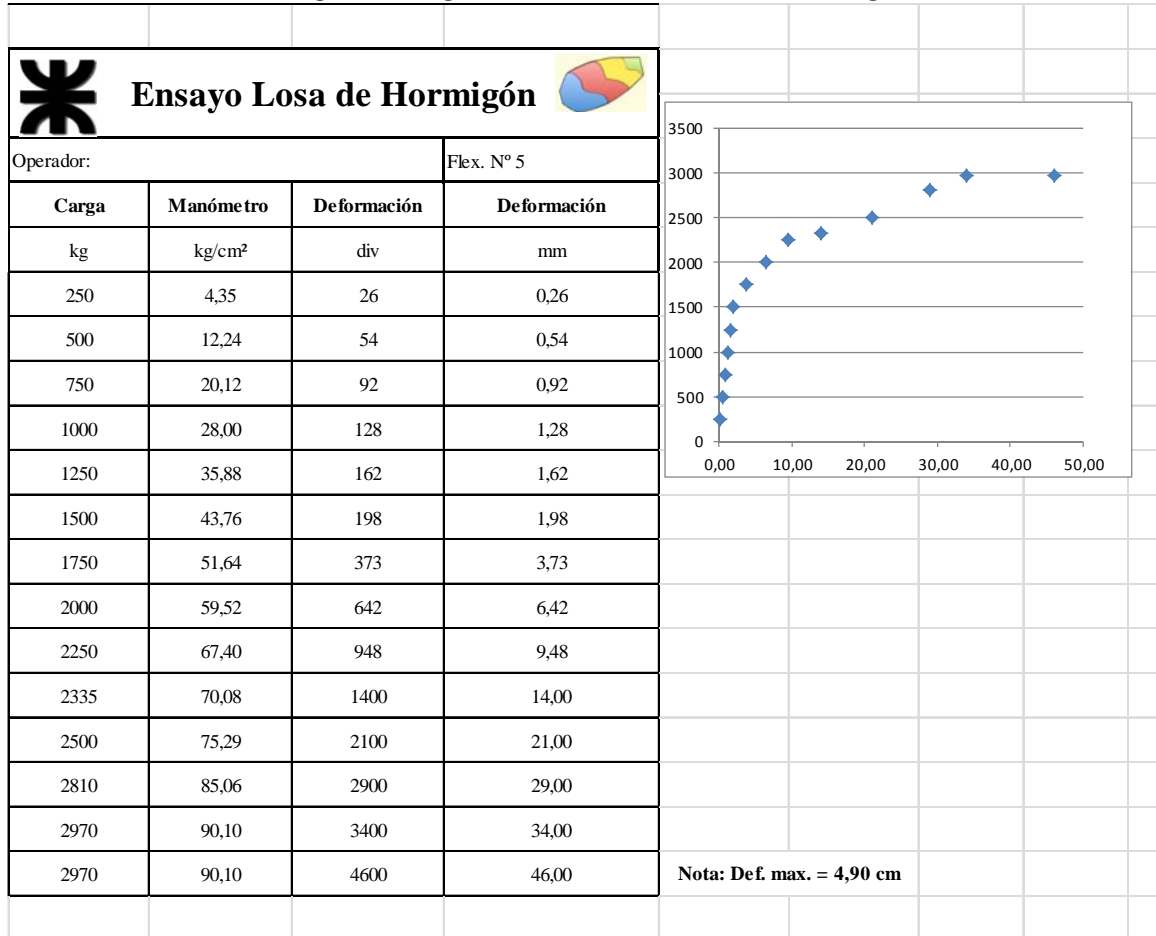


Figura 7

#### 4 Consideraciones Finales

El ensayo de punzonado en escala real, facilita la comprensión del comportamiento de la pieza estructural frente a esta sollicitación.

Esto quedo confirmado con la evaluación de los alumnos con posterioridad al ensayo.

Si bien esta experiencia suma a las conclusiones de mejor conocimiento por parte de los alumnos de la respuesta de los elementos estructurales a sus sollicitaciones, sería necesario generar nuevas posibilidades de ensayos de este tipo a escala real.

## **5 Agradecimientos**

Los autores agradecen a la Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Concordia, a la Empresa COINAR SRL por el apoyo y colaboraciones aportadas a la realización de esta experiencia.

## **6 Bibliografía**

- [1] Fritz Leonhardt - Eduard Mönnig: Estructuras de Hormigón Armado y pretensado tomo I al V. Editorial Librería El Ateneo.
- [2] Hallgren, M. - Kinnunen, S. - Nylander, B. "Punching shear tests on column footings" NORDIC CONCRETE RESEARCH – PUBLICATION N° 21 (1/98)
- [3] CÓDIGO MODELO CEB-FIP - PARA HORMIGÓN ESTRUCTURAL. GEHO-CEB, ATEP - 1995
- [4] Reimann, H.: Zur Bemessung von dünnen Plattendecken auf Stützen ohne Kopf gegen Durchstanzen. Diss. TH Stuttgart, 1963
- [5] Schaeidt, W; Ladner, M.; Rösli, A: Berechnung von Flachdecken auf Durchstanzen. Techn. Forschg.-u. Beratungsstelle d. Schweiz. Zementindustrie, Wildegg, Lizenz: Beton-Verlag, 1970.
- [6] Reglamento CIRSOC 201 - "Proyecto, Calculo y Ejecución de Estructuras de Hormigón Armado y Pretensado" Edición Julio 1982.