



# Incidencia de la Orientación y Distribución de Fibras en el Comportamiento de Losas Elevadas Ejecutadas con HRFA

Proyecto de Investigación e Innovación en Ingeniería Estructural

Universidad de la República  
Facultad de Ingeniería  
Instituto de Estructuras y Transporte

Estudiantes:

Diego Martín González Franchi

Guzmán Rippe Correas

Viviana Elena Sfeir Olivera

Tutor:

Dr. Ing. Luis Segura

Mayo de 2020

Integrantes del tribunal de Defensa de Tesina

Dr. Ing. Atilio Morquio

Msc. Ing. Agustín Spalvier

Ing. Diego Figueredo

Dr. Ing. Ana Blanco

## AGRADECIMIENTOS

El desarrollo de la presente investigación fue posible gracias al apoyo de los siguientes organismos y empresas:

- Centro de Innovación e Ingeniería (Agencia Nacional de Investigación e Innovación – ANII -) cuyo instrumento Fondo de Fomento de Ingeniería financió el Proyecto.
- Abengoa-Teyma quien aportó parte de la financiación necesaria y se mostró a disposición de cualquier necesidad que surgiera en el desarrollo del trabajo, tanto para conseguir instalaciones, equipos, materiales y aportar soluciones técnicas.
- Grupo de Hormigón Estructural (UdelaR) cuyos integrantes se mantuvieron siempre a disposición del equipo, con su característica predisposición y atención.

Nos gustaría agradecer al equipo de Abengoa-Teyma, en particular, Mauricio Montaña, Ramiro Rodríguez e Ignacio Horta, que sin su ayuda no hubiera sido posible realizar el ensayo de la losa.

Al Instituto de Eléctrica (UdelaR) por la disposición a colaborar en el desarrollo de la Tesina, tanto en aspectos técnicos como de organización del trabajo.

A su vez, realizar una mención especial a los integrantes del grupo de investigación predecesor, Santiago Infante, Mauricio Porcelli y Agustín Silveira, quienes dieron el puntapié inicial y se mostraron muy receptivos de nuestro interés por continuar su investigación.

Por el Grupo de Hormigón Estructural, Enzo González, Diego Figueredo, Agustín Spalvier, Nicolás García, Cinthia Planchón, Alina Aulet, Marcelo Gancio y Andrés Clavijo, cuyo aporte fue indispensable en distintas etapas del proyecto.

A investigadores de distintas universidades extranjeras, en particular Sergio Cavalaro y Ricardo Pieralisi, cuyo aporte fue vital en la determinación del ensayo a flexión a realizar a los testigos extraídos de la losa.

A nuestra familia y amigos, por el apoyo brindado en el transcurso de la investigación.

Por último y más importante, a nuestro tutor, Luis Segura, quien potenció nuestro interés en las potestades del material para desarrollar en conjunto un estudio pionero en la región.

## RESUMEN

El Hormigón Reforzado con Fibras de Acero (HRFA) se utiliza hace más de 40 años a nivel mundial. Sin embargo, se trata de funciones que en la mayoría de los casos no tienen una gran exigencia estructural. En Uruguay sus aplicaciones se reducen a pavimentos, premoldeados de baja responsabilidad estructural o estabilización de taludes. En los últimos años ha tomado un protagonismo importante, avanzando en la dirección de la sustitución de armadura convencional por fibras, reduciendo así tiempos de ejecución. Las losas elevadas sobre pilares son uno de los elementos estructurales que se ven más favorecidos por las potestades del material, con un buen control de fisuración y un comportamiento estructural adecuado, en parte debido a su capacidad de redistribución de esfuerzos. Incluso, se ha probado que es posible eliminar por completo la armadura de refuerzo trabajando con una mezcla adecuada de HRFA. En el año 2018, el trabajo conjunto del Grupo de Hormigón Estructural (UdelaR) y Abengoa-Teyma, con el apoyo de la ANII, permitió erigir la primera losa elevada de Sudamérica construida únicamente con HRFA (losa). La presente investigación se basa en los resultados que surgen de ensayar dicha losa. En particular, se buscó determinar: a) la influencia de la orientación y distribución de fibras (parámetro  $K$ ) en la capacidad del elemento, y b) desarrollar un modelo computacional que permita evaluar el comportamiento del material en su Estado Límite Último (ELU) y Estado Límite de Servicio (ELS).

El material con el que se trabajó corresponde a un HRFA “5b” según la clasificación del Código Modelo que cuenta con una matriz de hormigón C60 autocompactamente y una dosificación de  $90 \text{ kg/m}^3$  de fibras rectas con gancho en sus extremos de 50 mm de largo y diámetro 0,77 mm (esbeltez: 65). Respecto a la losa, la misma cuenta con cuatro paños de  $3,1 \times 3,1 \text{ m}$ , espesor 13 cm y se encuentra apoyada sobre nueve pilares de hormigón armado convencional. Para la caracterización del material se realizó el ensayo de flexión normalizado por EN 14.651 a probetas llenadas a pie de losa.

El ensayo de losa consistió de ciclos de carga-descarga puntual en el centro de dos paños diagonalmente opuestos en intervenciones distintas, en los que se controló el patrón de fisuración y el descenso de puntos notables. Posterior al ensayo se extrajeron diecisiete testigos, de los que se ensayaron trece a flexión, mediante una carga puntual centrada, en tres sentidos distintos: posición original para determinar el comportamiento representativo del vano (tracción de fibras inferiores; *momento positivo*), invertidos para determinar el comportamiento representativo de los apoyos (tracción de fibras superiores; *momento negativo*) y de canto que representa un comportamiento promedio de los anteriores (*momento medio*). Para cuantificar la orientación y distribución de fibras, por un lado, se realizó el conteo de estas en todas las caras de los testigos, incluso en la sección de rotura luego del ensayo a flexión, y, por otro lado, se trabajó con un ensayo no destructivo (Ensayo *Inductivo*) para distintas secciones de los especímenes. A los resultados del conteo manual se le aplicó el test estadístico ANOVA. Por último, el modelo computacional se desarrolló en el software *Abaqus*, trabajando con sólidos para modelar los testigos y elementos superficiales para la losa. El HRFA se modeló con el método *Concrete Damaged Plasticity*, utilizando la ecuación constitutiva propuesta por el Código Modelo. Además, se determinó el parámetro de orientación,  $K$ , iterando hasta encontrar el de mejor ajuste.

Los resultados experimentales que se obtuvieron para los ensayos de losa, probetas y testigos arrojaron comportamientos cualitativamente similares en el diagrama fuerza – flecha: un primer tramo elástico-lineal hasta la primera fisura, seguido por un endurecimiento que da paso a una pérdida de capacidad portante después de que se alcanza el pico de fuerza. En particular, de los ensayos a la losa se obtienen cargas máximas de 212 y 156 kN asociados a desplazamiento de 30 y 20 mm respectivamente. Además, el desplazamiento máximo que se alcanzó fue de 64 mm (fuerza 188 kN) y 59 mm (fuerza 117 kN). Por otro lado, el patrón de fisuración resultante contiene fisuras circulares rodeando el paño de ensayo y pasando sobre los apoyos en la cara superior y fisuras principales radiales desde el punto de aplicación al centro entre dos apoyos contiguos en la cara inferior. Por su parte, el estudio de los testigos permitió identificar una tendencia: los ensayados a momento medio tienen mayor capacidad portante. En cuanto a los ensayados a momento positivo y negativo, no poseen diferencia en capacidad portante a pesar del resultado de un estudio estadístico que determinó que las fibras se concentran en la parte inferior del elemento (0,75

fibras/cm<sup>2</sup> en la franja superior, 1,00 fibras/cm<sup>2</sup> en la media y 1,21 fibras/cm<sup>2</sup> en la inferior). El mismo test realizado a partir del conteo en la sección de rotura muestra resultados distintos (0,85, 1,03 y 1,09 fibras/cm<sup>2</sup> respectivamente). La cantidad de fibras orientadas según ambos ejes principales de la losa es igual. Además, se identifica la influencia de los bordes del elemento, en la cercanía de estos las fibras tienden a orientarse paralelas a ellos. Se identificó una relación lineal entre la tensión residual de tracción de los testigos y la cantidad de fibras, tanto determinadas por conteo manual (con mejor precisión,  $R^2 = 0,60$ ) como por el Ensayo Inductivo ( $R^2 = 0,51$ ). El valor de los  $R^2$  indica que se debería seguir investigando los factores que influyen en estas relaciones.

De los resultados numéricos surge que, para representar el comportamiento experimental, se debe trabajar con valores de K distintos, siendo los promedios: 1,93 para losa, 1,60 para testigos ensayados a momento positivo y negativo y 1,35 para testigos ensayados de canto. Esto muestra que la orientación obtenida en probetas (K = 1,0) no es representativa de los demás elementos. Utilizando los resultados numéricos, se realizó un modelo teórico de una aplicación real, concluyéndose que es posible disminuir a 25 cm el espesor de una losa proyectada de 30 cm y, a su vez, quitar un emparrillado de refuerzo en los paños más comprometidos.

Palabras Claves:

Hormigón Reforzado con Fibras de Acero, Losa elevada, Patrón de Fisuración, Distribución y orientación de Fibras, Ensayo Inductivo, Ensayo de Flexión, Conteo de Fibras, Concrete Damaged Plasticity, ANOVA.

ABSTRACT

Fibre Reinforced Concrete (FRC) has been used worldwide for more than 40 years. However, its use is mainly non-structural. In Uruguay, its applications are basically pavements, small precast or slope stabilizations. In recent years, FRC started to be used as a substitute for conventional rebar, reducing the time of construction. Thanks to its cracking control, the good structural response, and also due to the stress redistribution, elevated slabs can be mentioned among the structural elements which take advantage of the use of fibres. Furthermore, it has been shown that it is possible to fully substitute the reinforcement if an adequate FRC mix is used. In 2018, the *Structural Concrete Group (Udelar)* and the company *Abengoa-Teyma*, with the support of ANII, constructed the first elevated slab in South America reinforced only with FRC. In this thesis, the studies performed in the mentioned slab are presented. The objectives were: a) assess the influence of the fibre orientation and distribution (K parameter) in the structural response of the element; and b) implement a computational model that allowed to assess the material and structural behaviour both in the ultimate (ULS) and the service limit state (SLS).

The material used was classified as "5B" according to the Model Code 2010, with a self-compacting C60 matrix. 90 kg/m<sup>3</sup> of straight fibres with hooked ends, 50 mm long, and 0,77 mm of diameter (slenderness: 65) were used in the mix. The experimental slab (without any conventional reinforcement), consisted of four continuous panels of 3.1 x 3.1 m<sup>2</sup> each, supported by nine columns of conventional reinforced concrete, two meters above ground. FRC characterization was performed by the EN14651 standard, over small beams cast at the same time that the slab. The slab were tested with load-unload cycles under punctual load in the centre of two diagonally opposed panels. Load value, displacement in several points and crack pattern was registered. After the structural tests, 17 cores were extracted from the slab. These were tested under flexural load in three different directions, in order to assess tensile stress in: the lower face of the slab, the upper face, and also an average of the previous two. Orientation and distribution of fibres was assessed by: a) manual fibre count in all the sides of the cores and in the face of rupture; and b) inductive test, a magnetic based non-destructive test. Results were analysed by a statistical analysis (ANOVA). The computational model was developed in the software Abaqus, working with solid elements for the core models, and superficial elements for the slab models. FRC was model by the *Concrete Damaged Plasticity* method, using the constitutive equations proposed by the Model Code 2010. Furthermore, the orientation factor K was determined by a iterative process, to adjust the experimental with the numerical results.

Experimental results obtained over testing beams, cores and the slab show qualitatively similar results in the force-displacement curves: first a linear-elastic behaviour up the first crack, then a hardening part followed by a drop in the force after peak load. Maximum loads of 212 kN and 156 kN, associated with displacements of 30 mm and 20 mm respectively, were obtained for both slab test. Maximum displacements of 64 mm and 59 mm were registered for both slabs when the test was stopped, with loads of 188 kN and 117 kN respectively at those displacements. The cracking pattern showed, in the upper surface, circular cracks around the load point of the tested panel, and passing over the immediate supports. In the lower surface, radial cracks starting from the load point were registered. The study over the extracted cores showed that the tensile capacity of the FRC in the upper and lower face of the slab have no significant difference, despite that it was shown that the fibres are concentrated in the bottom face of the slab (0,75 fibres/cm<sup>2</sup> in the upper band, 1,00 fibres/cm<sup>2</sup> in the medium band, and 1,21 fibres/cm<sup>2</sup> in the lower band of the slab). The counting of fibres in the cracked section after the load test of the cores show a slightly different fibre distribution (0,85; 1,03 and 1,09 fibres/cm<sup>2</sup> respectively).

The orientation of fibres towards both main directions in the slab is similar. Also, it could be seen the influence in the slab boundaries, as fibres near them tend to orient parallel to the boundaries. A linear correlation was found between residual tensile stress in the cores and the amount of fibres, determined both by manual counting (with better precision,  $R^2 = 0,60$ ) and by the inductive test ( $R^2 = 0,51$ ). Further research should be done to better understand the factors influencing these correlations. Numerical results showed that, to represent the experimental structural behaviour, different K values should be used, being their average: 1,93 for the slab, 1,60 for the cores assessing tensile stress in the lower and upper face of the slab, and 1,35 for the cores assessing average tensile stress. This shows that the fibre orientation obtained by beam casting is not representative of the rest of the structural elements. Through the numerical results, a model was developed to model a theoretical application. This showed that it is possible to reduce to 25 cm the slab thickness of a originally 30 cm wide slab.

Keywords:

Steel fibre reinforced concrete, elevated slab, crack pattern, fibre orientation and distribution, inductive test, flexure test, fibre counting, Concrete Damaged Plasticity, ANOVA.

## ÍNDICE

1	Introducción y planteamiento .....	12
1.1	Introducción.....	12
1.2	Objetivos .....	12
1.2.1	Objetivos generales.....	12
1.2.2	Objetivos específicos.....	13
2	Estado del arte .....	14
2.1	Disposiciones Normativas .....	14
2.1.1	Comportamiento a compresión.....	14
2.1.2	Comportamiento a tracción.....	14
2.1.3	Clasificación del material .....	15
2.1.4	Ecuación Constitutiva.....	16
2.1.5	Factores de seguridad .....	17
2.1.6	Factor de orientación.....	17
2.1.7	Llenado de probetas sugerido por la Recomendación Danesa.....	17
2.1.8	Principios de diseño .....	18
2.2	Experiencias previas.....	19
2.2.1	Experiencias internacionales.....	19
2.2.2	Experiencias en el medio .....	21
3	Metodología experimental .....	23
3.1	Descripción de la losa.....	23
3.2	Estructura portante.....	26
3.3	Hormigonado de elementos estructurales .....	27
3.4	Estudio de las probetas llenadas a pie de losa.....	30
3.5	Ensayos a los paños de losa .....	30
3.6	Extracción de testigos .....	34
3.7	Descripción de ensayos no-destruictivos de testigos .....	36
3.7.1	Dimensiones.....	36
3.7.2	Conteo de fibras.....	36
3.7.3	Determinación de la concentración de fibras mediante ANOVA .....	36
3.7.4	Ensayo Inductivo .....	37
3.7.5	Conteo de fibras en la sección de rotura .....	39
3.7.6	Estudio de la orientación de las fibras a partir del conteo .....	40
3.8	Ensayo de Flexión.....	40
3.8.1	Comparación comportamiento flexión de probetas y testigos .....	42
4	Modelado computacional .....	43
4.1	Modelado del HRFA .....	43

4.2	Modelos particulares .....	44
4.2.1	Modelado del sólido – testigos .....	44
4.2.2	Modelado del elemento de área – losa .....	44
5	Análisis de los resultados experimentales .....	46
5.1	Ensayo de flexión normalizado - Probetas llenadas a pie de losa .....	46
5.1.1	Análisis de los resultados .....	46
5.1.2	Clasificación según el Código Modelo.....	47
5.1.3	Ecuación constitutiva según el Código Modelo .....	48
5.2	Ensayo a la losa .....	49
5.3	Patrón de fisuración.....	51
5.4	Geometría de los Testigos.....	53
5.5	Distribución de las Fibras .....	54
5.6	Ensayo Inductivo .....	55
5.7	Ensayo de Flexión.....	56
5.7.1	Relación fuerza – flecha .....	56
5.7.2	Relación flecha – apertura de fisuras.....	57
5.7.3	Relación tensión – apertura de fisuras .....	58
5.7.4	Comportamiento en función de la altura de los testigos .....	58
5.8	Ensayo Flexión vs Ensayo Inductivo .....	60
5.9	Conteo de las fibras en la sección de rotura.....	60
5.10	Ensayo de flexión vs conteo de fibras en la sección de rotura .....	61
5.11	Cantidad de fibras - Conteo manual vs Ensayo Inductivo.....	63
5.12	Análisis de orientación de fibras .....	64
5.12.1	Resultados que surgen del conteo.....	64
5.12.2	Coeficiente de orientación experimental .....	64
5.13	Conclusiones parciales .....	65
6	Resultados del modelo computacional.....	67
6.1	Modelo de losa.....	67
6.2	Modelo de cuerpo sólido - testigos .....	69
6.2.1	Testigos representativos de momentos positivos y negativos .....	69
6.2.2	Testigos ensayados de canto .....	70
6.3	Conclusiones parciales .....	71
7	Análisis estructural.....	72
7.1	Planteo de la aplicación teórico .....	72
7.2	Verificación de ELU .....	73
7.3	Verificación de ELS .....	74
7.4	Conclusiones de la aplicación teórica .....	75
8	Conclusiones .....	76

8.1	Conclusiones generales.....	76
8.2	Conclusiones particulares .....	76
8.3	Líneas de investigación futuras.....	77
8.3.1	Modelo computacional.....	77
8.3.2	Resultados experimentales.....	77
8.3.3	Análisis estructural.....	78
9	Referencias Bibliográficas .....	79
10	Anexos.....	83
10.1	Calibración de gato hidráulico y dinamómetro .....	83
10.2	Conteo de fibras.....	85
10.2.1	Metodología de conteo.....	85
10.2.2	Nomenclatura de las cuadrículas.....	85
10.2.3	Resultados del conteo global .....	86
10.2.4	Resultado del conteo en sección de rotura .....	90
10.3	ANOVA de una vía.....	91
10.4	Procedimiento de ensayo inductivo .....	92
10.5	Resultados de ensayo de losa – Paño 3 .....	94
10.6	Resultados de ensayo de losa – Paño 2 .....	95
10.7	Resultados del test ANOVA.....	97
10.8	Dimensiones de los testigos.....	101
10.9	Resultados del ensayo Inductivo.....	101
10.10	Generación y propagación de fisuras en el ensayo a flexión.....	102
10.11	Curvas fuerza – flecha para el paño 2 de la losa.....	109

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Dispositivo de ensayo según EN 14.651 [17].	14
Figura 2 – Relación Fuerza – CMOD ilustrativa [17].	15
Figura 3 – Comportamiento de ablandamiento (a) y endurecimiento (b) [7].	15
Figura 4 – Diferentes comportamientos para elementos de HRFA [7].	16
Figura 5 – Ecuación constitutiva tri-lineal [7].	16
Figura 6 – Método de llenado de probetas sugerido por EN 14.651 [17].	17
Figura 7 – Procedimiento de llenado de las probetas a pie de losa. Medidas en milímetros. [18].	18
Figura 8 – $P - \delta$ arbitrario para elementos de HRFA. Adaptado del Código Modelo [7].	18
Figura 9 – Distintas modalidades de ensayo de losas elevadas.	19
Figura 10 – Rotación de las fibras en el flujo de hormigón [21].	20
Figura 11 – Patrón de fisuración para losa hiperestática [19].	20
Figura 12 – Ubicación del predio en el que se construyó la losa [12].	23
Figura 13 – Planta y corte de la losa proyectada.	24
Figura 14 – Fibras Ferrofiber AR65 [12].	25
Figura 15 – Esquema de los elementos estructurales involucrados. Extraído de [33].	26
Figura 16 – Detalle del inicio de los pilares.	27
Figura 17 – Hormigonado de la losa de fundación.	27
Figura 18 – Proceso de hormigonado; a) dosificación y b) ensayo de consistencia.	28
Figura 19 – Hormigonado de la losa elevada.	29
Figura 20 – Propuesta de secuencia de hormigonado.	29
Figura 21 – Seguimiento del hormigonado.	30
Figura 22 – Esquema del sistema de carga adoptado.	31
Figura 23 – Dispositivo de Ensayo.	32
Figura 24 – Posición de los comparadores.	33
Figura 25 – Dispositivos de medida e introducción de cargas.	33
Figura 26 – Extracción de Testigos.	35
Figura 27 – Ubicación de los testigos en la losa.	35
Figura 28 – Dispositivo de Ensayo de Inductancia [30].	37
Figura 29 – Secciones de lectura de la inductancia.	38
Figura 30 – Ensayo Inductivo.	38
Figura 31 – Ensayo Inductivo a testigo de espuma plast.	39
Figura 32 – Sección de rotura del testigo 10.	39
Figura 33 – Comportamiento seccional; a) ponderado; b) mismo peso todas las franjas.	40
Figura 34 – Esquema de la ubicación de LVDT y soportes.	41
Figura 35 – Dispositivo de ensayo.	41
Figura 36 – Esquema del dispositivo de carga.	42
Figura 37 – Mallado, condiciones de contorno e introducción de carga. Testigos.	44
Figura 38 – Mallado, condiciones de contorno e introducción de carga. Losa.	45
Figura 39 – Resultado del ensayo normalizado para probetas llenadas a pie de losa.	46
Figura 40 – Ecuación Constitutiva que propone el Código Modelo.	48
Figura 41 – Comparación de los resultados experimentales que surgen del ensayo a la losa.	49
Figura 42 – Carga – flecha; ensayo losa; paño 2.	50
Figura 43 – Desplazamiento de puntos notables respecto al punto medio.	51
Figura 44 – Patrón de fisuras en la cara inferior de la losa.	52
Figura 45 – Fisuras en el punto de aplicación de la carga. Paño inferior de la losa.	52
Figura 46 – Patrón de fisuras en la cara superior de la losa.	53
Figura 47 – Inductancia en el largo de los testigos.	55
Figura 48 – Fuerza – flecha; ensayo de flexión en testigos (Testigos 2, 5 y 14 se identifican con color negro).	56
Figura 49 – Flecha – suma de desplazamientos longitudinales; testigos ensayados a flexión.	57

Figura 50 – Tensión – Apertura de fisuras; ensayo de flexión a testigos. ....	58
Figura 51 – Fuerza – apertura de fisuras; a) h = 12,5 cm; b) h = 13,9 cm; c) h = 15,0 cm. ....	59
Figura 52 – Tensión residual – cantidad de fibras; Ensayo Inductivo. ....	60
Figura 53 – $f_{r3}$ – cantidad de fibras; a) global; b) por sentido de ensayo; c) por altura. ....	62
Figura 54 – $f_{r3}$ – cantidad de fibras ponderadas; a) global; b) por sentido de ensayo. ....	62
Figura 55 – Inductancia en sección media – conteo de fibras en sección de rotura. ....	63
Figura 56 – Orientación de las fibras. Valores en porcentaje de la totalidad de fibras contadas. ....	64
Figura 57 – Comparación de comportamiento probetas y testigos. ....	65
Figura 58 – Descenso de la losa registrado por el modelo computacional. ....	67
Figura 59 – Deformación en el elemento de losa en la iteración final. ....	67
Figura 60 – Fuerza – flecha; comparación numérico – experimental. ....	68
Figura 61 – Fuerza – flecha; numérico – experimental; distintos espesores. ....	68
Figura 62 – Desplazamientos que arroja el modelo numérico para testigos. ....	69
Figura 63 – Tensión normal por flexión de un testigo; modelo computacional. ....	69
Figura 64 – Testigos ensayados a momento positivo y negativo; numérico – experimental. ....	70
Figura 65 – Testigos ensayados de canto; numérico – experimental. ....	70
Figura 66 – Planta estructural de la investigación de referencia [9]. ....	72
Figura 67 – Ecuación constitutiva para la aplicación teórica. ....	73
Figura 68 – Mallado, condiciones de contorno e introducción de carga. Aplicación teórica. ....	73
Figura 69 – Desplazamiento vertical en función de la carga aplicada; aplicación teórica. ....	74
Figura 70 – Desplazamiento vertical bajo carga de servicio. ....	75
Figura 71 – Dispositivo de calibración. ....	83
Figura 72 – Relación entre la presión registrada por el manómetro digital y el analógico. ....	84
Figura 73 – Calibración del dinamómetro. ....	84
Figura 74 – Calibración del manómetro analógico. ....	84
Figura 75 – Representación gráfica de la nomenclatura considerada en el conteo. ....	86
Figura 76 – Patrón de fisuración del Testigo 1. ....	103
Figura 77 – Patrón de fisuración del Testigo 2. ....	103
Figura 78 – Patrón de fisuración del Testigo 3. ....	104
Figura 79 – Patrón de fisuración del Testigo 4. ....	104
Figura 80 – Patrón de fisuración del Testigo 5. ....	105
Figura 81 – Patrón de fisuración del Testigo 6. ....	105
Figura 82 – Patrón de fisuración del Testigo 7. ....	106
Figura 83 – Patrón de fisuración del Testigo 8. ....	106
Figura 84 – Patrón de fisuración del Testigo 9. ....	107
Figura 85 – Patrón de fisuración de Testigo 10. ....	107
Figura 86 – Patrón de fisuración del Testigo 11. ....	108
Figura 87 – Patrón de fisuración del Testigo 12. ....	108
Figura 88 – Patrón de fisuración del Testigo 14. ....	109

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 – Análisis de costos asociados [5]. ..... 22

Tabla 2 – Dosificación del hormigón utilizado [12]. ..... 23

Tabla 3 – Granulometría de áridos utilizados [12]. ..... 25

Tabla 4 – Fechas de ejecución de los trabajos..... 27

Tabla 5 – Parámetros del módulo CDP. .... 43

Tabla 6 – Valores de fuerza obtenidos con el ensayo normalizado. .... 46

Tabla 7 – Tensiones residuales para las probetas extraídas a pie de losa. .... 47

Tabla 8 – Resultado de las probetas cilíndricas ensayadas a compresión. .... 47

Tabla 9 – Geometría de los testigos. .... 53

Tabla 10 – Distribución de fibras en el espesor de la losa ..... 54

Tabla 11 – Resultado del estudio estadístico para cada testigo..... 55

Tabla 12 – Dispersión asociada al ensayo de flexión realizado. .... 58

Tabla 13 – Promedio de fibras por franja. .... 61

Tabla 14 – Cantidad de fibras por cm<sup>2</sup> ..... 64

Tabla 15 – Valores de K experimentales..... 65

Tabla 16 – Conteo de fibras; testigos 1, 2 y 3..... 87

Tabla 17 – Conteo de fibras; testigos 4, 5 y 6..... 88

Tabla 18 – Conteo de fibras; testigos 7, 8 y 9..... 89

Tabla 19 – Conteo de fibras; testigos 10, 11 y 12..... 90

Tabla 20 – Conteo en la sección de rotura. .... 91

Tabla 21 – Resultados de ensayo losa; paño 3; viernes. .... 94

Tabla 22 – Resultados de ensayo losa; paño 3; sábado. .... 95

Tabla 23 – Resultados de ensayo losa; paño 2. .... 96

Tabla 24 – Resultado del Test ANOVA para cinco discriminaciones. .... 98

Tabla 25 – Resultado del Test ANOVA para cada testigo. .... 99

Tabla 26 – Dimensiones de los testigos..... 101

Tabla 27 – Resultado del Ensayo Inductivo. .... 102

Tabla 28 – Resultado del Ensayo Inductivo. .... 102

# 1 Introducción y planteamiento

## 1.1 Introducción

El Hormigón Reforzado con Fibras de Acero (HRFA) es un material compuesto, el cuál combina en su matriz, fibras discretas de acero con los demás componentes de la mezcla de hormigón, dotando al material de una mayor capacidad, siendo incluso capaz de sustituir las varillas de acero conformado en algunas aplicaciones. La utilización del HRFA se encuentra en constante aumento debido a que la misma se asocia a numerosas ventajas entre las que se destaca: reducción de tiempos de ejecución al evitar la colocación de armaduras, mejor distribución de las fisuras que se generan en el material (asociada a una mayor durabilidad), aumento de la tenacidad del material y mejora ante la abrasión y el impacto; todas ellas asociadas a contribuir en la disminución de costos y la sostenibilidad de la Industria de la Construcción [1] [2] [3] [4].

Elementos estructurales superficiales (pavimentos, hormigón proyectado sobre túneles, paneles, losas) se ven favorecidos por la utilización de dicho material. El mayor control de las fisuras y la capacidad de redistribución son las funciones que más aportan. La utilización del material en losas elevadas cuenta con una importante responsabilidad estructural, esto lleva a que, de modo de aprovecharse de sus ventajas trabajando con seguridad, se hayan motivado un sinnúmero de investigaciones para caracterizar de forma completa el comportamiento resultante.

En junio del año 2018, siendo beneficiario del instrumento *Herramientas para la innovación* de la *Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII)*, el trabajo conjunto de *Abengoa-Teyma* y el *Grupo de Hormigón Estructural (GHE)* de la *Universidad de la República (Udelar)* propició la construcción de la primera losa elevada de Sudamérica ejecutada con HRFA [5]. El presente proyecto busca contribuir al trabajo que se inició años atrás en el país en relación al uso de HRFA en losas elevadas.

Normativas [6] y [7], reportes [8] y artículos científicos [9], [10] y [11] proponen relaciones entre los resultados que se obtienen de ensayos hechos al material con el comportamiento seccional de los elementos estructurales. De este modo se obtienen fórmulas simplificadas para el diseño, que si bien han demostrado ser seguras (hasta el momento no se conocen experiencias de colapso imprevisto de elementos de HRFA), no tienden a la optimización del uso del material. En particular, las fórmulas simplificadas son efectivas en la determinación del Estado Límite Último (ELU) asociado al colapso de la losa, pero no suelen tener la misma eficiencia en la determinación del comportamiento en servicio (ELS) de la pieza. Obtener una noción de la capacidad del material en servicio es una de las metas que se persiguen en esta investigación, para correr modelos de estructuras complejas y poder determinar la capacidad del material en aplicaciones reales, en las que se prescindan de armado convencional.

Por otro lado, en experiencias previas se trabajó con una simplificación respecto a la orientación y distribución de fibras, considerando que las mismas se orientan en todas las direcciones y no se generan concentraciones en el elemento [12]. Se ha determinado que esta hipótesis no se cumple, lo cual constituye un problema dado a que afecta la resistencia de la pieza [13] [14] [15] [16]. Se busca entonces, determinar el grado de cumplimiento de la hipótesis y la influencia de ello en el comportamiento de la losa.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivos generales

La investigación se enmarca en dos objetivos principales, por un lado, se busca determinar una ecuación constitutiva que sea capaz de modelar correctamente el comportamiento de la losa, por otro lado, se pretende determinar la orientación de las fibras en el plano de la losa y la distribución de estas en el espesor del elemento para asociarlo a la capacidad resistente del material.

## 1.2.2 Objetivos específicos

### Modelo numérico

- Desarrollar un modelo computacional que prediga el comportamiento experimental de losa y testigos prismáticos extraídos de losa.
- Determinar el valor del coeficiente de orientación,  $K$ , que propone el Código Modelo [7] para modelar el comportamiento real de elementos estructurales y así determinar la ecuación constitutiva del material.
- Verificar si el comportamiento del material es acorde para una aplicación estructural reportada en la bibliografía.

### Estudio experimental

- Verificar de forma experimental el comportamiento teórico de la losa ejecutada, en particular, carga máxima y ductilidad de la pieza y estudiar el patrón de fisuración.
- Determinar si existe una concentración desigual de fibras en el espesor de la losa y la influencia que tiene en el comportamiento a flexión.
- Estudiar la orientación de fibras y determinar su influencia en la resistencia de los elementos.
- Realizar un ensayo de flexión para estudiar el comportamiento de testigos de la losa.
- Evaluar la capacidad de testigos ensayados en sentidos diferentes de modo de evaluar el comportamiento asociado a distintas ubicaciones de la losa: tracción en fibras inferiores (vanos), tracción en fibras superiores (apoyos) y un promedio de ambos (medios).
- Determinar la relación entre la cantidad de fibras (evaluada a partir del conteo manual en sección de rotura y a partir del Ensayo Inductivo de la sección media) y la tensión residual de tracción

## 2 Estado del arte

### 2.1 Disposiciones Normativas

En la presente investigación se trabajó principalmente con las disposiciones del Código Modelo [7]. En esta sección se presentan aquellas consideraciones tenidas en cuenta.

#### 2.1.1 Comportamiento a compresión

El tramo a compresión del comportamiento para hormigón convencional también es válido para el HRFA. En casos de hormigón de alta y muy alta resistencia las fibras pueden aportar a la ductilidad en compresión.

#### 2.1.2 Comportamiento a tracción

El comportamiento a tracción es uno de los aspectos más importantes para el HRFA y existen diferentes métodos para su determinación. Los ensayos de tracción uniaxiales no se recomiendan, ya que los mismos son difíciles de realizar e interpretar. Los ensayos a flexión, en cambio, pueden llevarse a cabo con el objetivo de determinar la ecuación constitutiva del material. El método sugerido para determinar las propiedades de los materiales es mediante el ensayo a tres puntos de la norma EN 14.651 [17]. En la Figura 1 se puede ver el esquema del mencionado ensayo, el mismo cuenta con una carga centrada, dos apoyos simétricos y una entalla (indicada con un círculo).

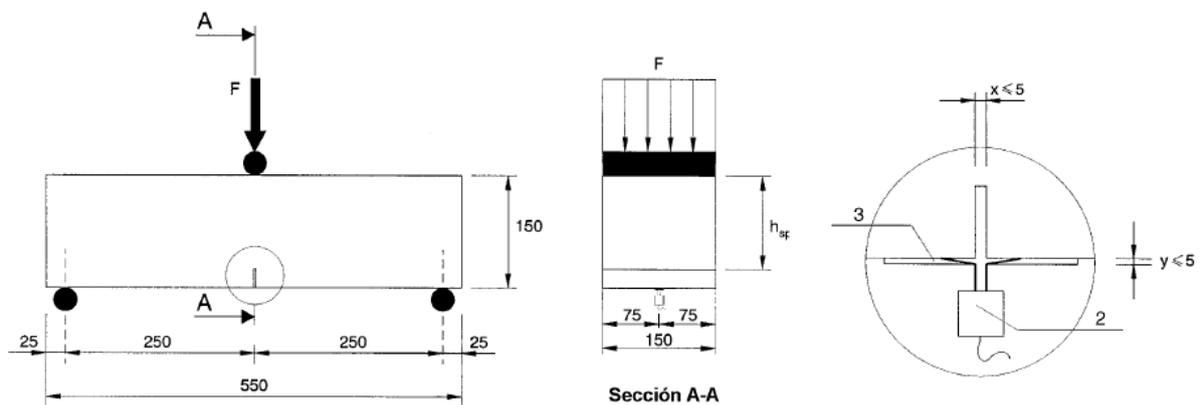


Figura 1 – Dispositivo de ensayo según EN 14.651 [17].

Dependiendo del instrumental con el que se cuente, los resultados del ensayo se reportan en la forma de diagramas fuerza – apertura de fisuras (F-CMOD por sus siglas en inglés) o fuerza – desplazamiento en el punto central del vano (F –  $\delta$ ). Los valores de tensión que se utilizan para determinar la ecuación constitutiva del material son  $f_{r1}$  y  $f_{r3}$  (Figura 2) que corresponden a un CMOD de 0,5 y 2,5 mm respectivamente ( $\delta = 0,47$  y 2,17 mm) (extraído de capítulo 9.1 “*equivalencia entre el CMOD y la flecha*” de EN 14.651 [17]). A su vez, de la curva se extraen valores de tensiones ( $f_L$ ,  $f_{r2}$  y  $f_{r4}$ ). En la Figura 2 se muestra una relación F-CMOD ilustrativa de modo de presentar los valores indicados previamente. Para obtener las tensiones a las que se hizo referencia se toman los valores de fuerza correspondientes y se los transforma con la siguiente ecuación (extraída de EN 14.651 [17]):

$$f_{r,j} = \frac{3F_j l}{2bh_{sp}^2}, \quad (1)$$

Donde:

- $f_{r,j}$  [MPa] tensión residual correspondiente a CMOD=CMODj
- $F_j$  [N] carga correspondiente a CMOD=CMODj
- $l$  [mm] longitud del testigo
- $b$  [mm] ancho del testigo

- $h_{sp}$  distancia entre el tope de la entalla y la parte superior del testigo

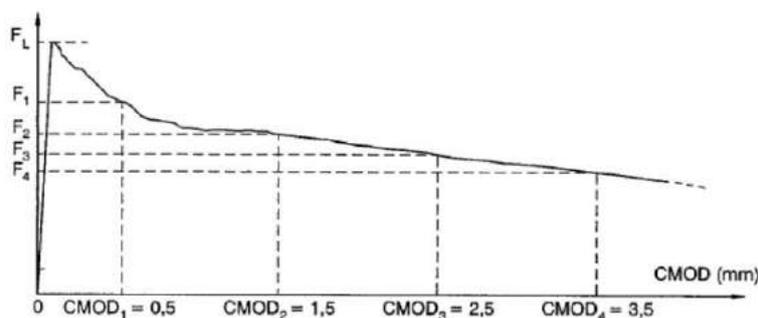


Figura 2 – Relación Fuerza – CMOD ilustrativa [17].

### 2.1.3 Clasificación del material

El Código Modelo propone una clasificación para el hormigón reforzado con fibras. La misma se encuentra asociada a los valores que surgen del ensayo de flexión a tres puntos: EN 14.651 [17].

El modo de clasificar requiere de dos parámetros característicos:  $f_{r1k}$  asociado al servicio de la pieza y  $f_{r3k}$  importante en condiciones de Estado Límite Último. En particular se describe el material resultante con un valor que representa el parámetro  $f_{r1k}$  y una letra que representa la relación entre  $f_{r3k}$  y  $f_{r1k}$ . El número, puede tomar los siguientes valores: 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 7,0; 8,0; ... (MPa). Por su parte, la letra se determina de la siguiente manera:

- "a"  $\leftrightarrow 0,5 \leq f_{r3k} / f_{r1k} < 0,7$
- "b"  $\leftrightarrow 0,7 \leq f_{r3k} / f_{r1k} < 0,9$
- "c"  $\leftrightarrow 0,9 \leq f_{r3k} / f_{r1k} < 1,1$
- "d"  $\leftrightarrow 1,1 \leq f_{r3k} / f_{r1k} < 1,3$
- "e"  $\leftrightarrow 1,3 \leq f_{r3k} / f_{r1k}$

La única información adicional que se debe presentar son las características de las fibras utilizadas.

El Código a su vez establece los siguientes límites a cumplir por el material para el caso en que se busque sustituir total o parcialmente la armadura convencional:

- $F_{r1k} / f_{Lk} > 0,4$
- $F_{r3k} / f_{r1k} > 0,5$

Por otro lado, cuando se realiza un ensayo de tracción directa a una probeta del material, se obtienen resultados tales como la relación "carga-alargamiento" esquemática de la Figura 3. El Código clasifica los elementos de hormigón reforzado con fibras en dos grandes categorías, aquellos que muestran comportamiento de "ablandamiento" (Figura 3a) y de "endurecimiento" (Figura 3b).

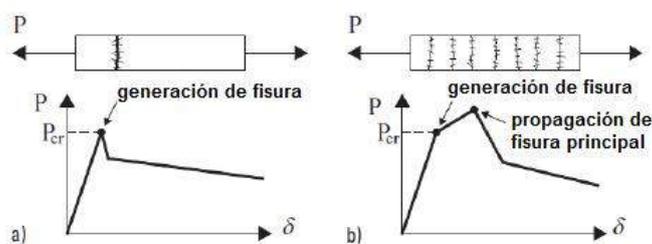


Figura 3 – Comportamiento de ablandamiento (a) y endurecimiento (b) [7].

El Código reporta en el primer caso, la formación y propagación de una única fisura que se asocia al comportamiento representado. En contraparte, la formación de varias fisuras en el segundo caso es la que

permite la variación en el comportamiento. Los dos puntos de inflexión mostrados en la Figura 3b representan el instante en el que se produce la primera fisura ( $P_{cr}$ ) y aquel en el que la deflexión toma como fisura principal una de ellas.

Adicionalmente, el Código indica las relaciones de comportamiento para un mismo material que se muestran en la Figura 4. Allí se establece que un elemento que presenta un comportamiento de ablandamiento en el ensayo de tracción uniaxial puede tener un comportamiento de endurecimiento o ablandamiento en el ensayo de flexión. A su vez, una probeta cuyo resultado del ensayo de flexión sea de ablandamiento, puede tener comportamiento de ablandamiento o endurecimiento al ser utilizado en una losa. Por lo contrario, si el material endurece al someterlo a tracción directa, su comportamiento frente a la flexión será de endurecimiento. Por último, hormigón que muestra endurecimiento en el ensayo a flexión, únicamente podrá experimentar endurecimiento cuando sea utilizado en una losa.

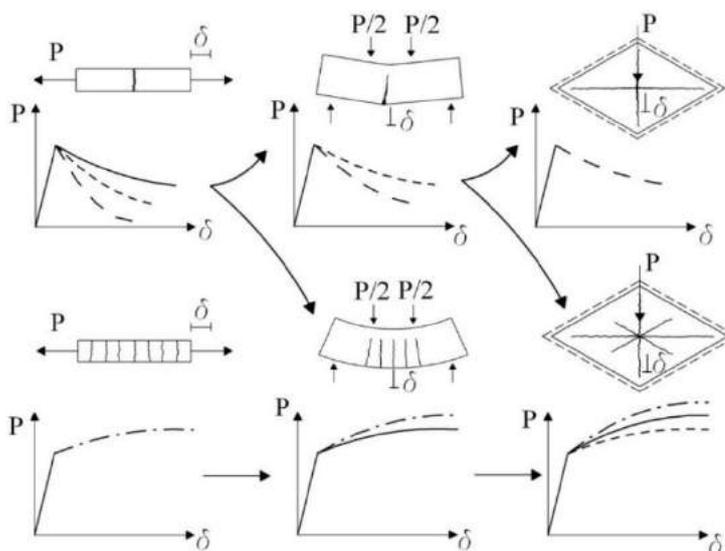


Figura 4 – Diferentes comportamientos para elementos de HRFA [7].

### 2.1.4 Ecuación Constitutiva

El Código Modelo propone distintas ecuaciones constitutivas según el nivel de detalle elegido por cada usuario. Es así como se puede trabajar con una ecuación constitutiva expresada por una única recta u optar por la ecuación tri-lineal, la cual a su vez puede tomar tres formas dependiendo de las tensiones que surgen del ensayo de flexión. La Figura 5 muestra las tres formas que dicha ecuación tri-lineal puede adoptar.

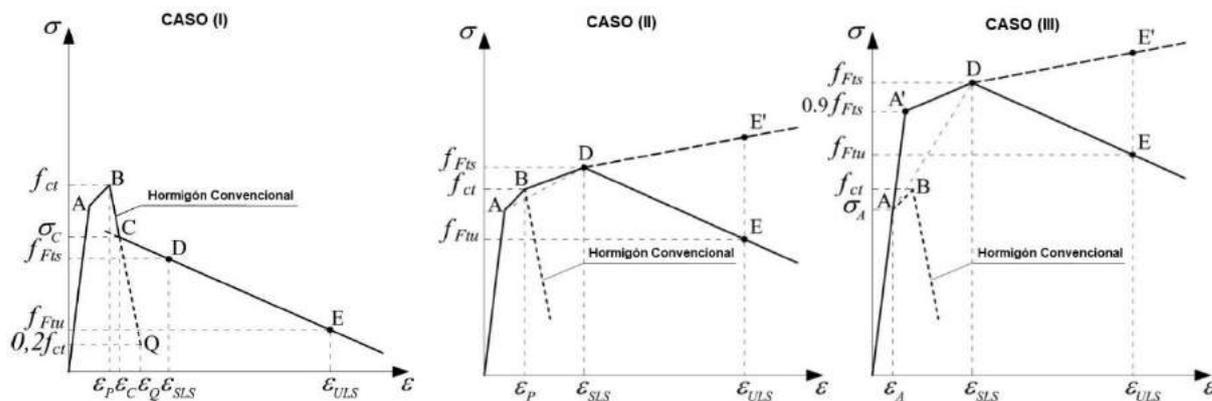


Figura 5 – Ecuación constitutiva tri-lineal [7].

El tramo elástico-lineal inicial está gobernado por el Módulo de Elasticidad del hormigón, para el cuál, el Código sugiere tomar:

$$E_{ci} = E_{c0} \cdot \alpha E \cdot \left( \frac{f_{ck} + \Delta f}{10} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

Donde:

- $E_{ci}$  – Módulo de elasticidad del hormigón a 28 días (MPa)
- $E_{c0} = 21500$  MPa
- $\alpha E = 1,0$  para el caso en que se trabaje con agregados de origen cuarcítico
- $\Delta f = 8$  MPa
- $f_{ck}$  – Resistencia característica a la compresión del hormigón a 28 días (MPa)

### 2.1.5 Factores de seguridad

El Código propone para el HRFA en Estado Límite Último los mismos coeficientes de seguridad que para un hormigón convencional, incluso en el caso de la resistencia residual a tracción, para la que considera un valor de 1,5. En el caso del Estado Límite de Servicio, se propone un factor de seguridad 1.

### 2.1.6 Factor de orientación

El parámetro K es presentado por el Código Modelo como factor de orientación. Dicha Norma explica que el comportamiento observado en los ensayos estándar puede desviarse sustancialmente (de forma favorable o no) del real comportamiento del elemento estudiado. Para evitar este error, se trabaja con este parámetro que corrige los resultados obtenidos. La Norma, a su vez, determina que el mismo se debe obtener para cada caso en particular, pero no sugiere métodos para hacerlo. El modo de utilización del parámetro K consiste en generar una ecuación constitutiva con valores de  $f_{rj}$  que surgen de dividir los valores originales entre K (la norma no prevé un cambio de nomenclatura para los parámetros  $f_{rj}$  cuando se divide a estos entre K). Se trabaja con un valor de K igual a 1,0, cuando la orientación de las probetas coincide con la de los elementos estructurales en cuestión. El parámetro toma un valor menor a 1,0, cuando la orientación se mejora respecto a la del espécimen de referencia. Por último, un valor de K mayor a 1,0 muestra que las probetas tienen una orientación más favorable que la del elemento estudiado.

### 2.1.7 Llenado de probetas sugerido por la Recomendación Danesa

El método de llenado de probetas, prismáticas de tamaño 150 mm de ancho y longitud L tal que  $550 \text{ mm} \leq L \leq 700 \text{ mm}$ , que sugiere la EN 14.651 [17] se muestra en la Figura 6. En dicha norma se indica que el hormigón se debe colar inicialmente en el centro de la probeta (1) y luego pasar a los extremos de esta (2). El molde debe rellenarse hasta aproximadamente el 90 % de la altura antes de la compactación, y debe completarse y enrasarse mientras se compacta (vibración externa). Con respecto al HRFA autocompactante se determina que el mismo no debe compactarse.

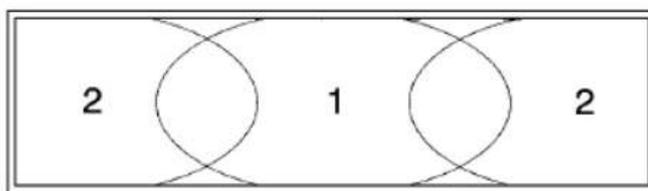


Figura 6 – Método de llenado de probetas sugerido por EN 14.651 [17].

La Recomendación Danesa [18] sí propone un procedimiento de llenado distinto para probetas de mezclas de HRFA autocompactante, el mismo se muestra en la Figura 7. Dadas las características del hormigón con el que se trabaja, no es necesario vibrar el mismo luego de colocado. Se trata de un procedimiento favorable para la orientación de las fibras por el efecto conjunto del flujo de material y los bordes. La Recomendación

indica que este método resulta en una mezcla con mayor cantidad de fibras orientadas según el eje longitudinal de la probeta que en los restantes.

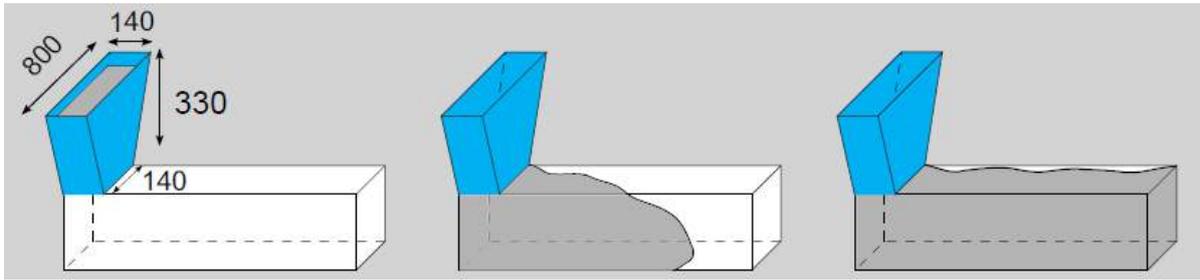


Figura 7 – Procedimiento de llenado de las probetas a pie de losa. Medidas en milímetros. [18].

### 2.1.8 Principios de diseño

El Código establece que en estructuras sin adición de armadura convencional mínima se debe satisfacer una de las siguientes condiciones para asegurar la ductilidad de la pieza:

- $\delta_u \geq 20 \delta_{SLS}$
- $\delta_{pico} \geq 5 \delta_{SLS}$

Donde:

- $\delta_u$  es el desplazamiento último al que se somete la estructura. Este valor suele relacionarse con la máxima deformación requerida por la estructura.
- $\delta_{pico}$  es el desplazamiento asociado a la fuerza máxima.
- $\delta_{SLS}$  es el desplazamiento para la carga máxima en servicio obtenida a partir de un análisis elástico-lineal considerando el material sin fisuras y utilizando el módulo de elasticidad inicial.

La Figura 8 muestra una curva  $P - \delta$  para un elemento de HRFA arbitrario, allí se indican gráficamente los parámetros definidos previamente. Además, se puede identificar que el valor de carga última,  $P_u$ , debe ser en todos los casos mayor a la carga de formación de fisuras,  $P_{cr}$ , y a la carga máxima de servicio,  $P_{SLS}$ .

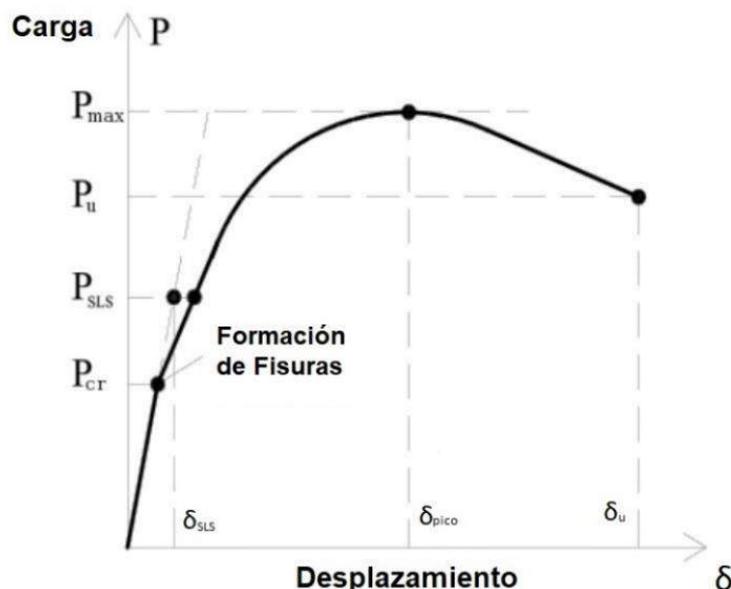


Figura 8 –  $P - \delta$  arbitrario para elementos de HRFA. Adaptado del Código Modelo [7].

El Código permite aumentar el valor de carga última cuando se trabaja con estructuras que cuentan con una significativa capacidad de redistribución de esfuerzos. En dicho caso se multiplica al valor de carga última por un factor  $K_{Rd}$ .

## 2.2 Experiencias previas

### 2.2.1 Experiencias internacionales

En la bibliografía se puede encontrar un gran número de artículos relacionados a la tecnología y aplicación del HRFA. Todas ellas comparten un objetivo común: contribuir en el desarrollo del material para que el mismo pueda ser elegido en aplicaciones de responsabilidad estructural significativa. En este caso particular se pone el foco en las investigaciones que trabajan con HRFA como único refuerzo de losas elevadas.

Se cuenta con registro de ensayos realizados a losas reales a escalas reducidas [19], prototipos creados especialmente para el estudio del comportamiento del material [20] [21] y losas de escala real [1] [9]. En dichos casos se opta por distintas configuraciones de contorno (apoyos lineales o sobre pilares) y distintas configuraciones de carga (puntuales o distribuidas). De este modo se cubre un abanico de situaciones que deben contemplarse en aplicaciones reales. La Figura 9 muestra ensayos realizados en distintas investigaciones (9a extraída de [1], 9b y 9c extraídas de [19], 9d extraída de [20] y 9e, 9f y 9g extraídas de [21]).

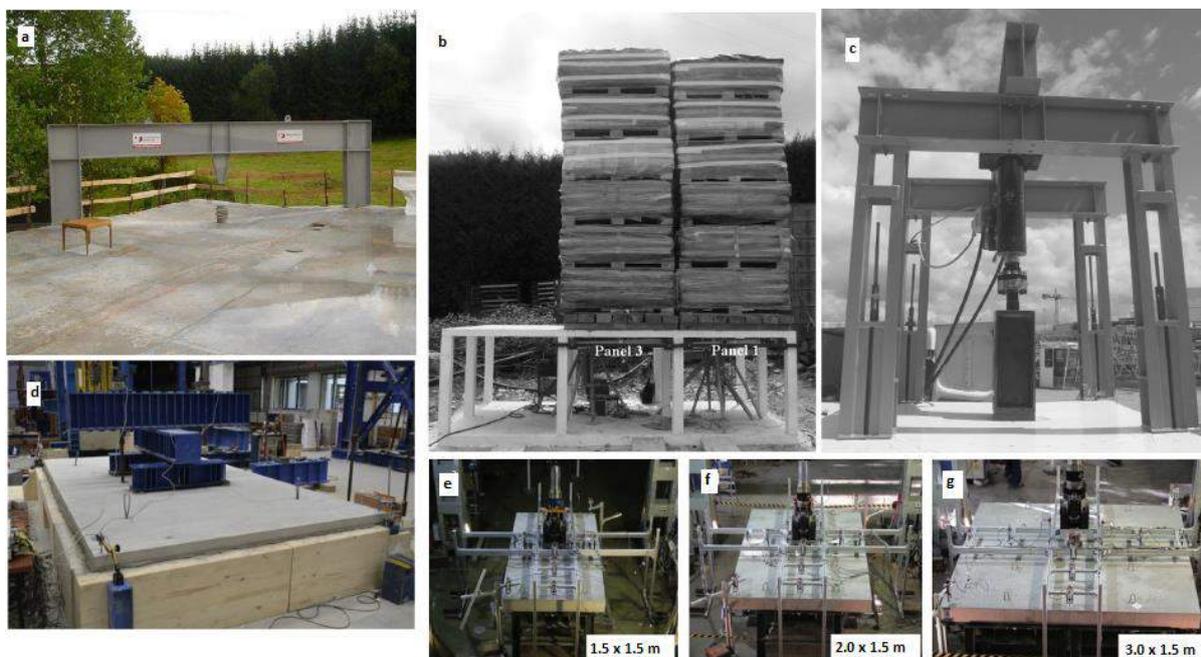


Figura 9 – Distintas modalidades de ensayo de losas elevadas.

Los métodos de hormigonado, las características del material y la dosificación de las fibras varían caso a caso; incluso algunas investigaciones se centran en determinar la influencia de cada uno de estos aspectos [10]. En todos los casos se busca ampararse en distintas normativas de cálculo para trabajar con un mayor grado de seguridad. Aplicaciones con hormigones muy fluidos [21], incluso autocompactantes [20], pueden encontrarse en la bibliografía. Distintas resistencias de la masa de hormigón también son objeto de estudio. También se experimenta con distintos tipos y dosificación de fibras, ya que la oferta de este material se encuentra en aumento. En cuanto a los métodos de hormigonado, algunos trabajos apuntan a encontrar el óptimo y, por sobre todo, poder asociarlo a una distribución dada de las fibras en la masa. Las fibras rotan en el flujo de hormigón (Figura 10) y los bordes del elemento influyen su orientación, colocándose paralelas a los mismos [22], [23] y [21].

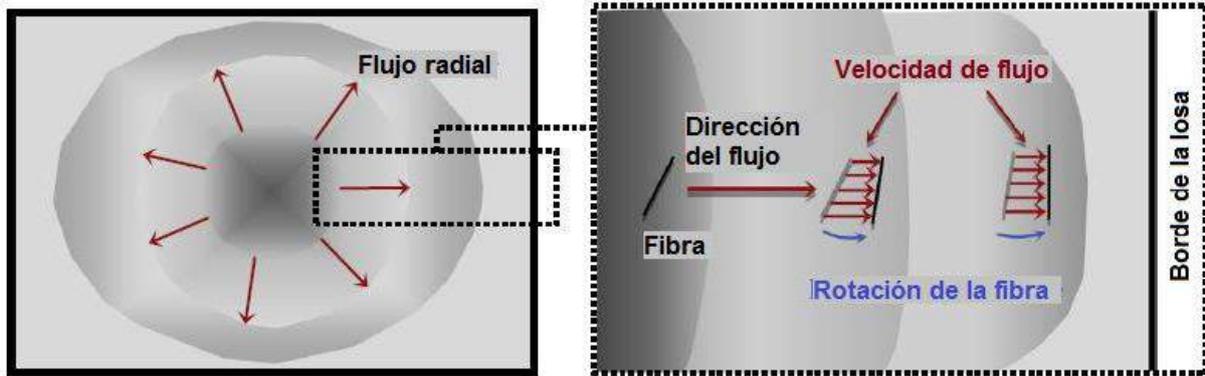


Figura 10 – Rotación de las fibras en el flujo de hormigón [21].

Algunos de los resultados que despiertan mayor interés se presentan a continuación. Uno de ellos es el diagrama carga-desplazamiento que surge de cada estudio de losa. De allí los investigadores obtienen la capacidad dúctil de las piezas y la carga máxima que el elemento es capaz de soportar. De este modo es posible extraer conclusiones acerca del comportamiento de la mezcla en ELS y ELU.

Por otro lado, el patrón de fisuración es otro aspecto de gran relevancia. Existe consenso ( [24] y [19] ) en que el patrón de fisuración asociado a paneles hiperestáticos de losas, apoyados sobre pilares y sometidos a cargas puntuales es distinto para la cara superior y la inferior. En la cara superior las fisuras forman una banda circular con un radio igual a la distancia desde el centro de aplicación de la carga hasta los pilares más cercanos (Figura 11a). En la cara inferior se generan fisuras radiales desde el centro del paño cargado hacia el perímetro de este (Figura 11b). Como corolario de un estudio de patrones de fisuración [21] se logró identificar que la cantidad de fisuras secundarias en un paño de losa se asocia a la capacidad de redistribución de esfuerzos del elemento estructural.

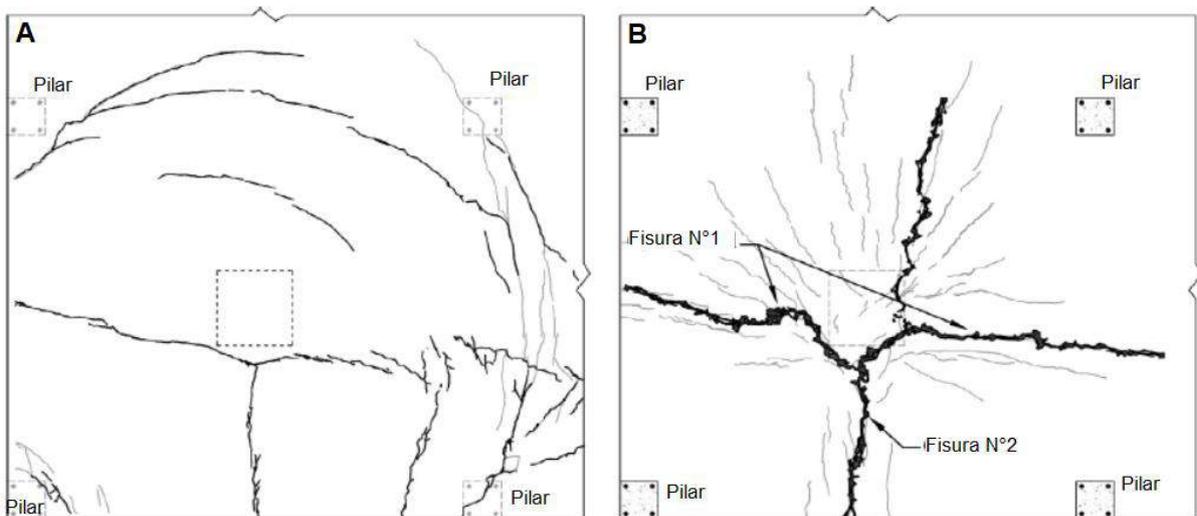


Figura 11 – Patrón de fisuración para losa hiperestática [19].

Culminando con las materias que despiertan mayor interés, la distribución de las fibras en la masa de hormigón es el tema central de un sinnúmero de investigaciones. Abrishambaf et al. (2013) trabaja con procesamiento de imágenes para determinar la distribución y reporta los siguientes métodos en otras investigaciones: tomografía de especímenes [16], procesamiento de imágenes [25], métodos que involucran rayos X y resistividad eléctrica [22], métodos que involucran consideraciones de ultrasonido y técnicas cuantitativas de emisión acústica [26] y métodos que trabajan con magnetismo [27].

La orientación de las fibras en la masa tiene una influencia determinante en la resistencia resultante del elemento estructural. No en vano, el Código Modelo cuenta con un parámetro específico para cuantificar

esta influencia, el parámetro de orientación  $K$ . Diversas investigaciones han procurado hallar este parámetro. Métodos iterativos con modelos computacionales [21] y relación de las direcciones de las fisuras con la orientación de las fibras [28] son algunos de los procedimientos que se identifican en la bibliografía. Se reporta una importante dispersión de valores  $K$  para las distintas mezclas, cantidad de fibras y dimensiones de los elementos estructurales. En ningún caso se trabaja con  $K = 1,0$ , lo que determina que el método de llenado y la influencia de los bordes hacen que la orientación de las fibras en una probeta normalizada [17] no sea representativa.

El campo de los modelos computacionales es uno de los que ha tenido mayores avances. El hecho de que las fibras sean las que dotan de capacidad a los elementos y que la distribución de ellas sea difícil de predecir lleva a que la variabilidad aumente respecto a otras aplicaciones del hormigón. Esto no ha desalentado a un número importante de investigadores que han probado distintas técnicas. Blanco et al. (2014) desarrollaron un modelo considerando la ecuación constitutiva del Código Modelo [7]. Con un adecuado parámetro de orientación de fibras se obtiene resultados que predicen correctamente los resultados experimentales, de todos modos, se sugiere que considerar distintos valores de  $K$  para  $f_{r1}$  y  $f_{r3}$  llevaría a resultados aún mejores. Salehian y Barros (2014) por su parte desarrollaron un método inverso para determinar la ecuación constitutiva del material. Dicho método consiste en minimizar la diferencia entre dos diagramas (por ejemplo, fuerza-desplazamiento) uno de ellos experimental y otro que resulte de un modelo numérico. Este proceso se desarrolla comparando las áreas debajo de las gráficas de cada uno de los diagramas. Los resultados que se obtienen pueden ser excelentes, pero tienen la contrapartida que pueden ser aplicados únicamente al caso de estudio particular.

Por último, se destaca algunos casos particulares en los que se ha optado por edificar con el material en cuestión. Estas primeras incursiones se asocian a interrogantes de cómo funcionará el material, o de si tendrá la durabilidad necesaria, entre otras, que la academia busca responder. Prueba de esto es el edificio que se reporta en Maturana et al. (2014). En dicho caso se trabajó con: una dosificación de fibras elevada ( $100 \text{ kg/m}^3$ ), un espesor de losa importante (30 cm) y fibras con esbeltez 38,5. De este modo se cubre la imprecisión de un diseño realizado con métodos plásticos a nivel de sección (momento plástico) y de estructura (líneas de rotura). Uno de los puntos críticos del trabajo con este material es la solución estructural de zonas irregulares como pueden ser los pases en una losa. Facconi y Minelli (2017) sugieren que en dichos casos se debe trabajar con un refuerzo de armaduras convencionales.

### 2.2.2 Experiencias en el medio

Respecto de las experiencias en el medio, se destacan las siguientes. En primer lugar, Fontans et al. (2012) reportan la experiencia de repavimentación de la Ruta Nacional 24 utilizando la tecnología de *whitetopping* que se hizo con el objetivo de adaptar la ruta a su nueva condición de servicio (principalmente transporte de camiones de la Industria Forestal) [29]. En ese caso se trabajó con fibras sintéticas en la masa de hormigón que permitieron trabajar con un espesor de 15 cm de pavimento y prescindir de barras en las juntas. Otros trabajos se enfocaron en el desarrollo del Ensayo Inductivo e implementación del Ensayo Montevideo, así como el estudio de las propiedades en estado fresco, en estado endurecido y de durabilidad de mezclas de hormigón reforzado con fibras (sintéticas y metálicas) autocompactante [30] [31]. Por su parte, Segura-Castillo et al. (2018) estudiaron el caso particular de paneles sándwich prefabricados concluyendo que es posible disminuir los costos asociados entre un 10-20% al modificar la malla estructural por la incorporación de fibras [32]. Por último, la experiencia más reciente corresponde a la reportada por Infante et al. (2019) y Segura-Castillo y Montaña (2018). Los primeros estudiaron la dosificación para el desarrollo de un HRFA autocompactante con  $90 \text{ kg/m}^3$  de fibras la cuál fue utilizada para ejecutar la losa que se investiga en el presente trabajo. A su vez, realizaron un estudio del comportamiento del material en ELU [12]. Los segundos hicieron un análisis de los costos asociados a trabajar con este material en lugar de hormigón armado convencional (HA), los resultados se presentan en la Tabla 1 (se toma como base de comparación, el costo asociado a la construcción de una losa convencional) [5].

Tabla 1 – Análisis de costos asociados [5].

Rubro	Ahorro
<b>Materiales</b>	-26%
<b>Mano de Obra</b>	45%
<b>Leyes Sociales (LLSS)</b>	45%
<b>Equipos</b>	18%
<b>Ahorro Total</b>	17%

Se puede ver que en rubro materiales la losa de HRFA tiene un costo de un 26% por encima de una de HA debido a que las fibras son más costosas que las barras de acero y el hormigón autocompactante es más costoso que el hormigón convencional. Por otro lado, en los demás rubros se obtienen grandes descensos en los costos debido a que se asocia a esta tecnología un menor consumo en mano de obra y equipos. El resultado final muestra un ahorro total del 17%. Este análisis es válido para los costos de la construcción del medio (Montevideo, Uruguay), teniendo en cuenta que se dispone de todos los insumos necesarios para el desarrollo. A su vez, trabajar con este tipo de soluciones en proyectos a gran escala puede llevar a reducciones más importantes de los costos asociados.

### 3 Metodología experimental

#### 3.1 Descripción de la losa

La losa que se estudia en la presente investigación fue construida y ensayada en un predio de la Guardia Republicana sobre la Avenida José Pedro Varela en la ciudad de Montevideo, Uruguay. El predio concedido no cuenta con limitaciones respecto a la geometría, esto puede verse en la Figura 12, que muestra la ubicación de este.



Figura 12 – Ubicación del predio en el que se construyó la losa [12].

La geometría de la losa se presenta en la Figura 13 y cuenta con las siguientes dimensiones: 6,20 m x 6,20 m x 0,13 m. La misma está apoyada en nueve pilares cuadrados de 0,20 m de lado y 2 m de altura, representados con una sección de color gris. La estructura queda dividida en cuatro paños de 3,10 m x 3,10 m x 0,13 m, con el objetivo de poder ensayar dos de ellos de forma independiente. En el centro de los dos paños a ensayar se colocaron dos pases. Los mismos consisten en caños de PVC de diámetro exterior 63 mm por los que es posible pasar el dispositivo de carga, sin interferir de gran manera en el esquema resistente del elemento.

Para la losa se trabajó con un hormigón autocompactante con la dosificación que se indica en la Tabla 2. La misma incluye cantidades relativas de cada uno de los componentes de la mezcla, así como el porcentaje que representa cada uno de los áridos en el total. El porcentaje de dosificación del aditivo utilizado respecto al peso del cemento es del 1,7 % (levemente superior al recomendado por el fabricante). El peso de cemento utilizado responde a la necesidad de aumentar la cantidad de finos sin contar con componentes del tipo filler, por ello, se supera el valor de 500 kg/m<sup>3</sup> sugerido por Norma. Tal como se indicó previamente, la investigación asociada a la dosificación fue realizada por Infante et al. (2019).

Tabla 2 – Dosificación del hormigón utilizado [12].

	Cant.	% Total Áridos
<b>Relación agua/cemento</b>	0,28	
<b>Arena fina (kg/m<sup>3</sup>)</b>	795	48,0%
<b>Arena gruesa (kg/m<sup>3</sup>)</b>	256	15,4%
<b>Gravillín (kg/m<sup>3</sup>)</b>	402	24,4%
<b>Pedregullo (kg/m<sup>3</sup>)</b>	201	12,2%
<b>Agua (kg/m<sup>3</sup>)</b>	151	
<b>Cemento (kg/m<sup>3</sup>)</b>	531	
<b>Aditivo superplastificante (kg/m<sup>3</sup>)</b>	9	

Fibras metálicas (kg/m <sup>3</sup> )	90
---------------------------------------	----

Cartel de Referencia

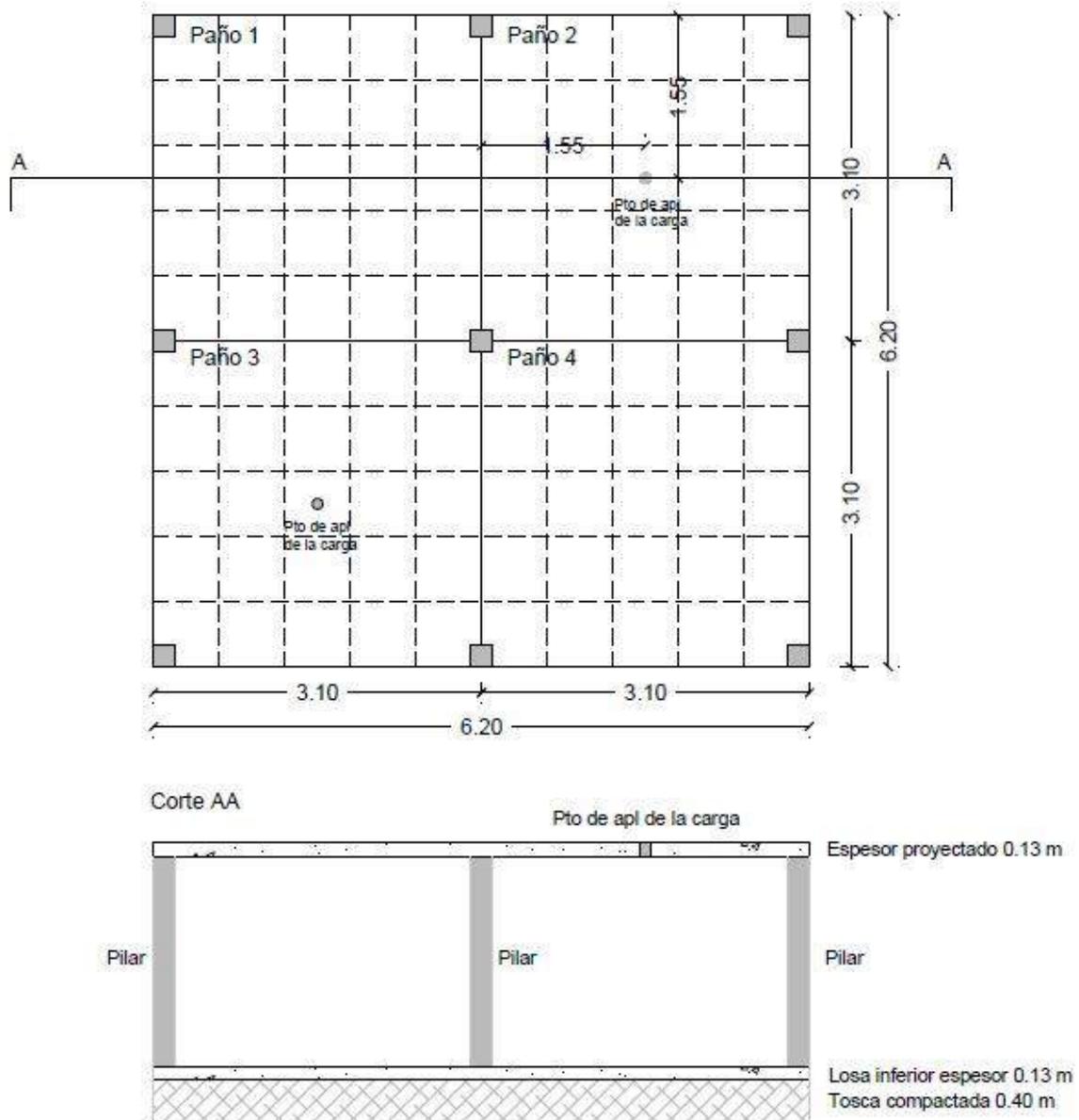


Figura 13 – Planta y corte de la losa proyectada.

Los áridos utilizados en la investigación son de los orígenes que se indican a continuación. La Arena Fina se trajo de la Ruta Nacional 1, km 32. La Arena Gruesa proviene de “Paso Pache”, Departamento de Canelones. El pedregullo es de la Cantera La Paz y el Gravillín de Cantera Melilla. La granulometría de los áridos aparece en la Tabla 3.

En cuanto al cemento, se utilizó el CPN40 comercializado por ANCAP. Se trata de un cemento CEM I, que es el utilizado en la mayoría de las obras realizadas en el medio. El agua utilizada es potable proveniente del suministro de Obras Sanitarias del Estado (OSE). Se utilizó a su vez el aditivo superplastificante con el objetivo de aumentar la trabajabilidad de la mezcla y dotarla de características autocompactantes.

Tabla 3 – Granulometría de áridos utilizados [12].

n° Tamiz	Apertura de Tamiz (mm)	Agregado Fino		Agregado Grueso	
		Arena Fina	Arena Gruesa	Gravillín	Pedregullo
1"	25,00	100	100	100	100
3/4"	19,00	100	100	100	95
1/2"	12,50	100	100	99	73
3/8"	9,50	99	98	99	53
1/4"	6,30	99	96	94	25
#4	4,75	98	92	72	14
#8	2,36	96	76	31	5
#16	1,18	85	50	10	3
#30	0,60	37	22	5	2
#50	0,30	17	2	3	1
#100	0,15	5	1	1	1
#200	0,07	1	0	0	0
Fondo	0,00	0	0	0	0

Las fibras utilizadas fueron las *Ferrofiber AR65* provistas por la empresa *Ferrocement*, quien las comercializa en el medio en bolsas de 20 kg. Las mismas se encuentran encoladas en grupos de 20 fibras, lo que facilita su manipulación y evita la formación de erizos (cúmulos de fibras). La cola que las une se disuelve con el agua de mezclado, lo que permite una distribución homogénea de las fibras en la masa de hormigón. La Figura 14 muestra la forma de las fibras y el formato de comercialización. Se trata de fibras rectas con gancho en sus extremos, lo que influye principalmente en las condiciones de anclaje y por consiguiente en la adherencia con el hormigón. En cuanto a su geometría, cuentan con un largo de 50 mm y un diámetro de 0,77 mm, teniendo por lo tanto, una esbeltez de 65.



Figura 14 – Fibras Ferrofiber AR65 [12].

El parámetro que se verificó en particular es el largo de las fibras,  $l_f$ , ya que, trabajando con fibras muy largas, la manipulación se dificulta y aparecen poros dentro de la masa de hormigón. Por el contrario, fibras cortas no desarrollan un buen anclaje, necesario para la transferencia de esfuerzos. La relación por verificar se indica a continuación y se ve que al trabajar con áridos de tamaño máximo 19 mm (TMA), se cumple con los requisitos.

$$\frac{l_f}{2} > TMA \rightarrow \frac{50 \text{ mm}}{2} = 25 \text{ mm} > 19 \text{ mm} \tag{3}$$

La cuantía de fibras utilizada es de  $90 \text{ kg/m}^3$ . Se trata de una cuantía elevada, que cae dentro de la recomendación de ACI Committee 544 [8] (entre  $80$  y  $100 \text{ kg/m}^3$ ) para obtener losas de gran capacidad de redistribución de esfuerzos y, por lo tanto, una importante ductilidad.

### 3.2 Estructura portante

Previo a la construcción de la losa, se debió trabajar en los elementos que permiten transmitir los esfuerzos a la fundación. El esquema de la Figura 15 permite comprender la transmisión de esfuerzos al suelo. Tal como allí se identifica se trabaja con cuatro tipos de elementos estructurales: losa de fundación, cruces de San Andrés, pilares y losa elevada.

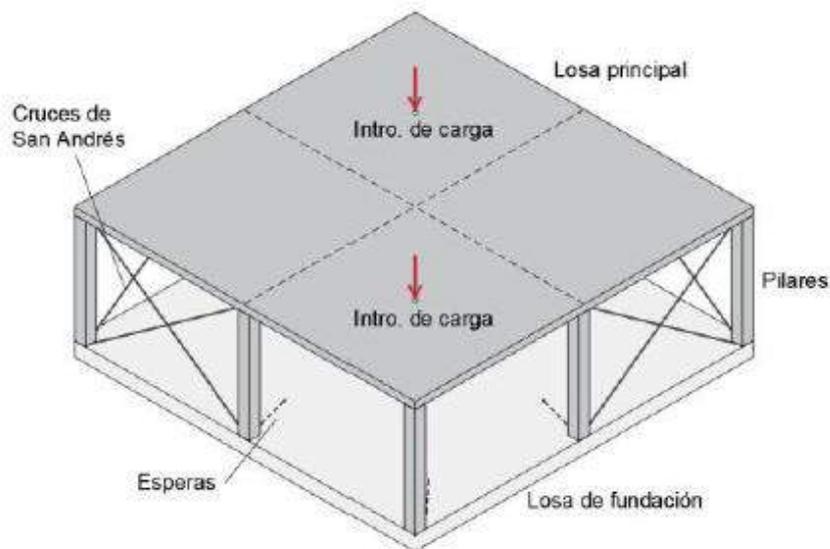


Figura 15 – Esquema de los elementos estructurales involucrados. Extraído de [33].

Previo al colado de la losa de fundación, que cumple las funciones de soporte y de prueba del procedimiento de hormigonado de la losa elevada, se realizó un paquete de  $40 \text{ cm}$  de tosca compactada, de modo de generar un asiento homogéneo. También se previeron las esperas para cada uno de los nueve pilares, para la unión de las lingas necesarias para el ensayo y de las cruces de San Andrés. Los pilares fueron ejecutados con hormigón convencional, armado con varillas de acero conformado ( $4\phi 12$  longitudinal y estribos  $\phi 6/.20$ ). De modo de generar la vinculación pilares-losa elevada, se debió prever en los primeros un empalme con el elemento superior.

La losa de fundación se delimitó con tablonés. Además, se realizó el replanteo de la ubicación de los pilares para prever las esperas de estos, de las cruces de San Andrés y de los dispositivos de carga (la Figura 16 muestra el caso particular del pilar de esquina en el paño número 2). El encofrado de la losa elevada se realizó con tablas, tablonés y chapones en una jornada de trabajo (ver Figura 19).



Figura 16 – Detalle del inicio de los pilares.

### 3.3 Hormigonado de elementos estructurales

La Tabla 4 indica las fechas en las que se llevaron a cabo las tareas proyectadas. Todas las instancias indicadas allí fueron llevadas a cabo previo al inicio de la investigación que se desarrolla en este documento, de todos modos, con la intención de permitir la repetitividad de los resultados, se muestran aquí algunos aspectos que se consideran importantes.

Tabla 4 – Fechas de ejecución de los trabajos.

Proceso	Fecha
Preparación del asiento	27/5/2018
Hormigonado de losa fundación	29/5/2018
Hormigonado de pilares	7/6/2018
Hormigonado de losa elevada	21/6/2018

En la Figura 17 se logra identificar el procedimiento de colado de la losa de fundación. En la Figura 17a es posible identificar la base de asiento, el encofrado, las esperas de los distintos elementos estructurales y una cantidad importante de moldes para probetas cilíndricas y prismáticas que se extrajeron en esa instancia. Por su parte, en la Figura 17b, se muestra el procedimiento de hormigonado propiamente dicho, en una etapa cercana al final. Allí es posible identificar que se involucró únicamente un operario y la bomba.



Figura 17 – Hormigonado de la losa de fundación.

La instancia más importante en la construcción de la losa fue la desarrollada el día 21/06/2018, es decir, el hormigonado de la losa elevada. Ese día, la estación meteorológica del Prado (la más cercana al predio) reportó los siguientes datos del tiempo:

- Temperatura media (°C): 12,7
- Temperatura máxima (°C): 13,2
- Temperatura mínima (°C): 11,7
- Humedad relativa media: 66%
- Precipitación (mm): 6.6 – esta no se dio en el momento de hormigonado
- Velocidad media del viento (km/h): 21,3
- Velocidad máxima sostenida del viento (km/h): 27,8

El procedimiento comienza con la producción del hormigón premezclado en la planta que la empresa Abengoa-Teyma tenía instalada en una obra cercana. En la Figura 18a se muestra la dosificación de las fibras. La misma se realiza colocando la cantidad oportuna de bolsas directamente en la boca del mixer. Las fibras son el último componente que se agrega a la mezcla, una vez que se comprobó las características autocompactantes de la mezcla de hormigón.

El tiempo de mezclado es una variable importante y en este caso se trabaja con el mínimo para lograr una distribución homogénea de áridos y fibras dentro de la masa. La recomendación tomada consiste en no prolongar el mezclado de forma innecesaria ya que esto puede llevar a la formación de erizos, patología que no se dio en el caso de estudio.

De modo de controlar la calidad del hormigón se realizó el ensayo del cono invertido tal como lo indica la Norma EN 12350-8 [34] y el control visual según ASTM C1611 [35]. En la Figura 18b se identifica el resultado del cono invertido. De modo de obtener el resultado que se muestra en la figura se debieron hacer pequeñas modificaciones de dosificación a pie de obra.

El metraje de las dimensiones de la losa determina que para llenarla eran necesarios 5 m<sup>3</sup> de hormigón. Se solicitaron de todos modos 6 m<sup>3</sup> de modo de cubrir ciertas contingencias que en este caso no eran aceptables, como pueden ser: trabajar con hormigones de distintas canchadas para cubrir posible falta de material. A su vez, se previó que sería necesario considerar un desperdicio en la manguera de la bomba y todos los elementos que se extrajeron para hacer ensayos adicionales.

La Figura 19 muestra el proceso de hormigonado de la losa elevada. Tanto en la Figura 19a como en la Figura 19b se puede ver el dispositivo montado previo al inicio del hormigonado. Allí se identifica el procedimiento indicado en la cara superior del encofrado con números del 1 al 4 y flechas indicando el sentido de vertido. La Figura 19c muestra un instante de hormigonado donde se puede ver la fluidez de la mezcla.

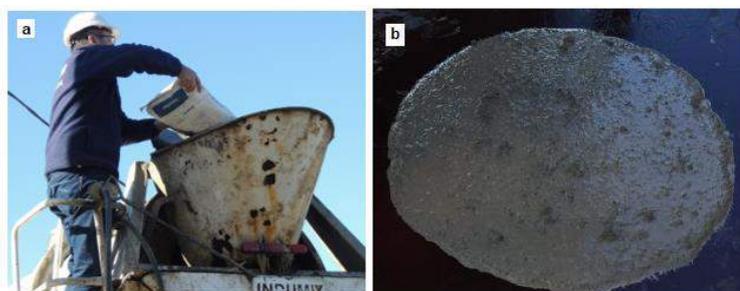


Figura 18 – Proceso de hormigonado; a) dosificación y b) ensayo de consistencia.

El procedimiento de hormigonado que se buscó realizar responde a distribuciones teóricas de fibras. En la Figura 20 se puede ver las dos secuencias de hormigonado, comenzando por el centro de los paños y luego pasando sobre los apoyos y la distribución asociada al mismo. Allí se identifica que realizando el

procedimiento tal como se indica, se logra cubrir las zonas teóricamente más débiles en relación a la geometría proyectada.



Figura 19 – Hormigonado de la losa elevada.

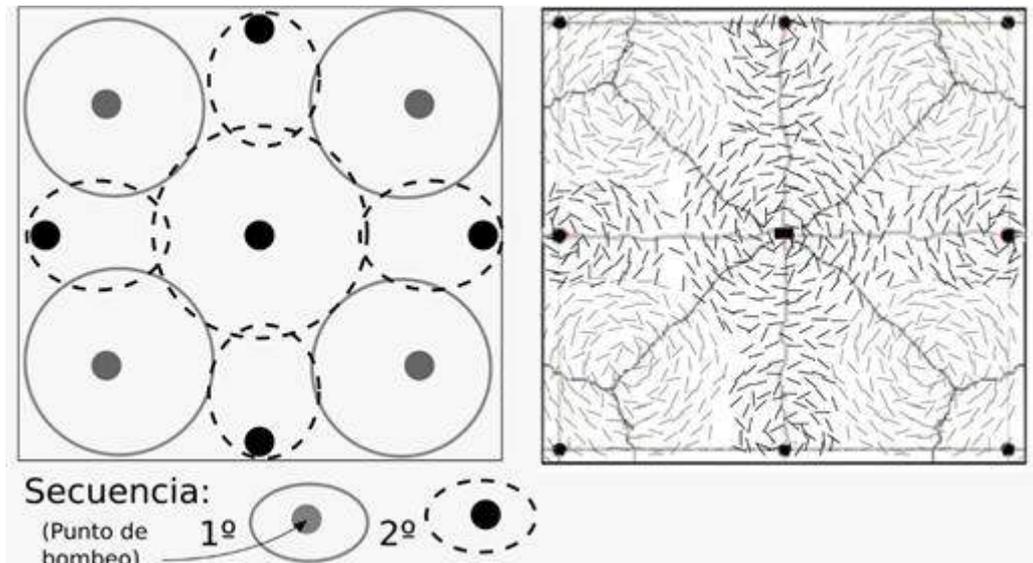


Figura 20 – Propuesta de secuencia de hormigonado.

El procedimiento completo de hormigonado fue llevado a cabo por dos operarios únicamente, en un tiempo de 4' 38". La Figura 21 muestra el recorrido realizado por los operarios que manipularon la manguera en el momento de colado. En la misma se muestra la posición adoptada por el operario cada 5" de tiempo transcurrido. El recorrido comienza en el punto marcado con inicio y continúa en orden numérico creciente hasta el punto final.

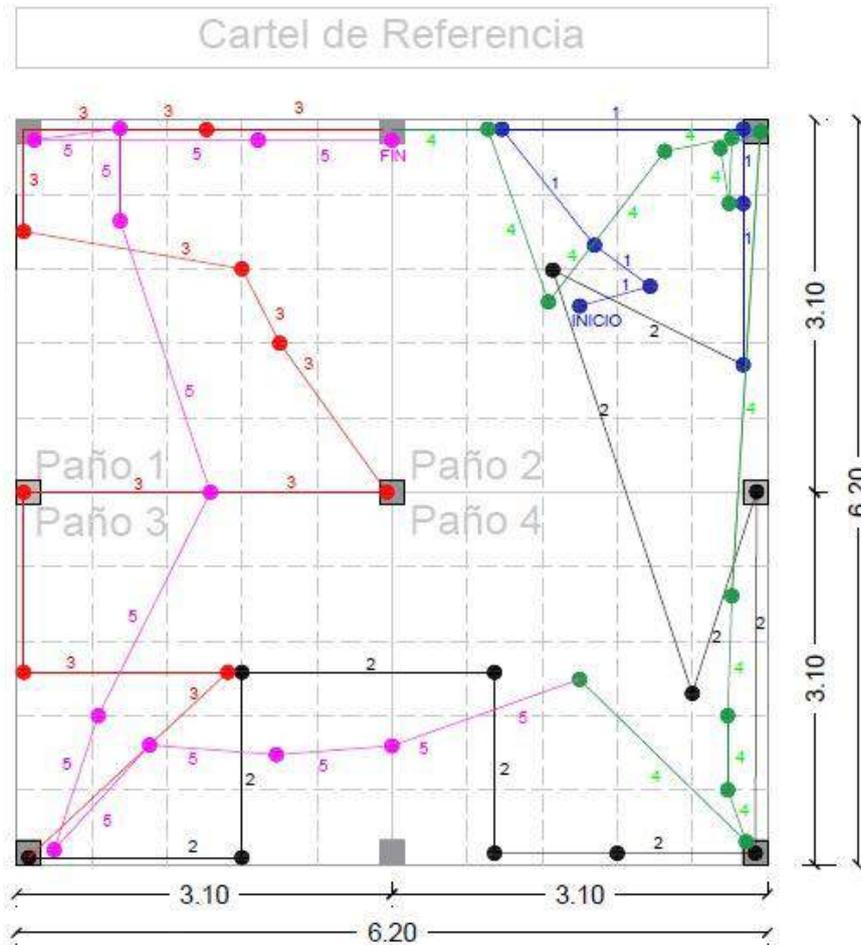


Figura 21 – Seguimiento del hormigonado.

Cabe destacar que la losa fue curada con agua en los 5 días posteriores al hormigonado, de todos modos, la demora en el inicio del curado (aproximadamente 3 horas) llevaron a la formación de fisuras por retracción en el secado.

### 3.4 Estudio de las probetas llenadas a pie de losa

En el momento del hormigonado de la losa, se llenaron cinco probetas (*Losa\_L\_1*, *Losa\_L\_2*, *Losa\_L\_3*, *Losa\_L\_5* y *Losa\_L\_7*) normalizadas según EN 14.651 [17], utilizando fracciones del hormigón del mixer. El llenado de estas imita lo propuesto por la Recomendación Danesa [18] (Ver Sección “2.1.7. Llenado de probetas sugerido por la Recomendación Danesa”), con la salvedad de que no se contaba con el embudo. Todas las probetas fueron ensayadas a flexión según el procedimiento indicado por EN 14.651 [17]. En el transcurso del ensayo fueron recabados valores de la fuerza aplicada a la probeta en función de la deflexión que experimenta el punto medio de la misma. La propia Norma permite utilizar este parámetro para determinar la apertura de fisura.

### 3.5 Ensayos a los paños de losa

El ensayo desarrollado consiste en aplicar una carga puntual en el centro de uno de los cuatro paños de la losa. Los paños de ensayo son diametralmente opuestos entre sí, de modo de preservar la integridad del segundo paño a ensayar cuando se realiza el primer ensayo. Esto es consistente con los patrones de fisuras que se reportan en la Bibliografía (Ver Sección “2.2.1. Experiencias internacionales”).

Los ensayos del elemento estructural fueron desfasados en el tiempo, realizándose en dos etapas las cuales se indica la fecha a continuación (ver Figura 22 para identificar la posición de los paños):

- viernes 17/05/2019 y sábado 18/05/2019 - paño 3
- viernes 23/08/2019 - paño 2

Previo a ensayar, se realizaron diferentes actividades para asegurar que el procedimiento fuera el correcto. Todos los dispositivos fueron calibrados tal como se indica en el Anexo "10.1. Calibración de gato hidráulico y dinamómetro". A su vez, para el segundo ensayo se adecuó la pieza de modo de mejorar la visualización de fisuras, pintando la superficie de color blanco y marcando cuadrículas.

La Figura 22 es un esquema del dispositivo de ensayo. En la Figura 23 se muestra el dispositivo montado para el ensayo del paño número 3, que luego se imitó para el ensayo del paño número 2. En ellas se identifican los perfiles que se utilizaron para ubicar los comparadores (de modo de obtener un valor de flecha relativo a los apoyos – pilares -), el dinamómetro sobre la losa, las lingas de las que tira el dispositivo, los malacates para posicionamiento y los comparadores en sí.

El dispositivo de carga consiste entonces de cuatro lingas ancladas al suelo en uno de sus extremos, y en el otro conectadas a un tornillo que se encarga de transmitir la carga del gato hidráulico a las mismas y así cargar la losa en dicho punto (punto medio del paño). Entre el anclaje al terreno y el extremo de una de las lingas se coloca un malacate, con el fin de poder realizar un acomodamiento del sistema para lograr que el tornillo esté ubicado en una correcta posición y poder realizar un previo tensionado de las lingas.

Con el objetivo de minimizar riesgos en el caso de una posible rotura de las lingas, para el segundo ensayo se colocó además una cuerda unida a las mismas. Estas se dimensionaron para resistir la acción de la posible rotura de estos elementos. La cuerda no se aprecia en la Figura 23 debido a que este sistema preventivo no se había implementado aún.

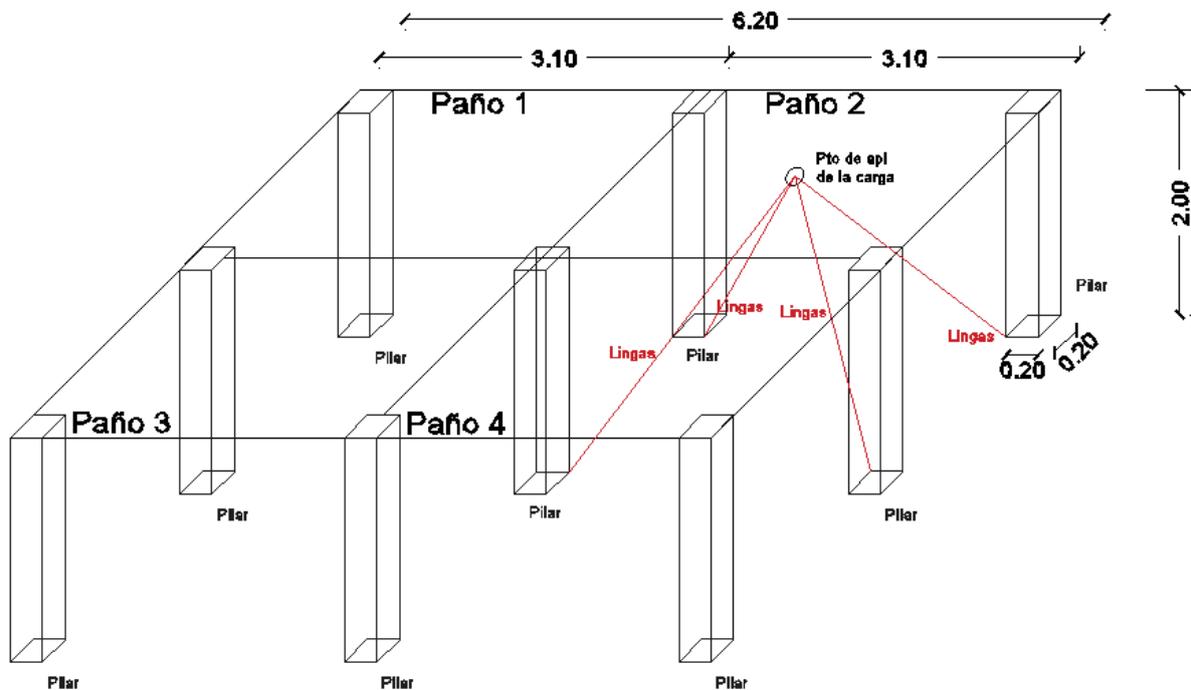


Figura 22 – Esquema del sistema de carga adoptado.



Figura 23 – Dispositivo de Ensayo.

Para registrar medidas de los descensos en diferentes puntos de la losa se trabajó en cada caso con siete comparadores posicionados de la forma que se indica en la Figura 24 (identificar que la nomenclatura tiene una pequeña variación en cada caso). La posición de cada uno fue elegida de forma tal de registrar el comportamiento de puntos representativos de la losa. El caso de la ubicación de los comparadores en el punto medio de los paños es particular, debido a que idealmente se busca que se encuentre en el punto de aplicación de las cargas. Esta disposición es imposible desde el punto de vista de la ejecución, por lo que se lo ubicó en un punto de la diagonal, lo más cercano posible.

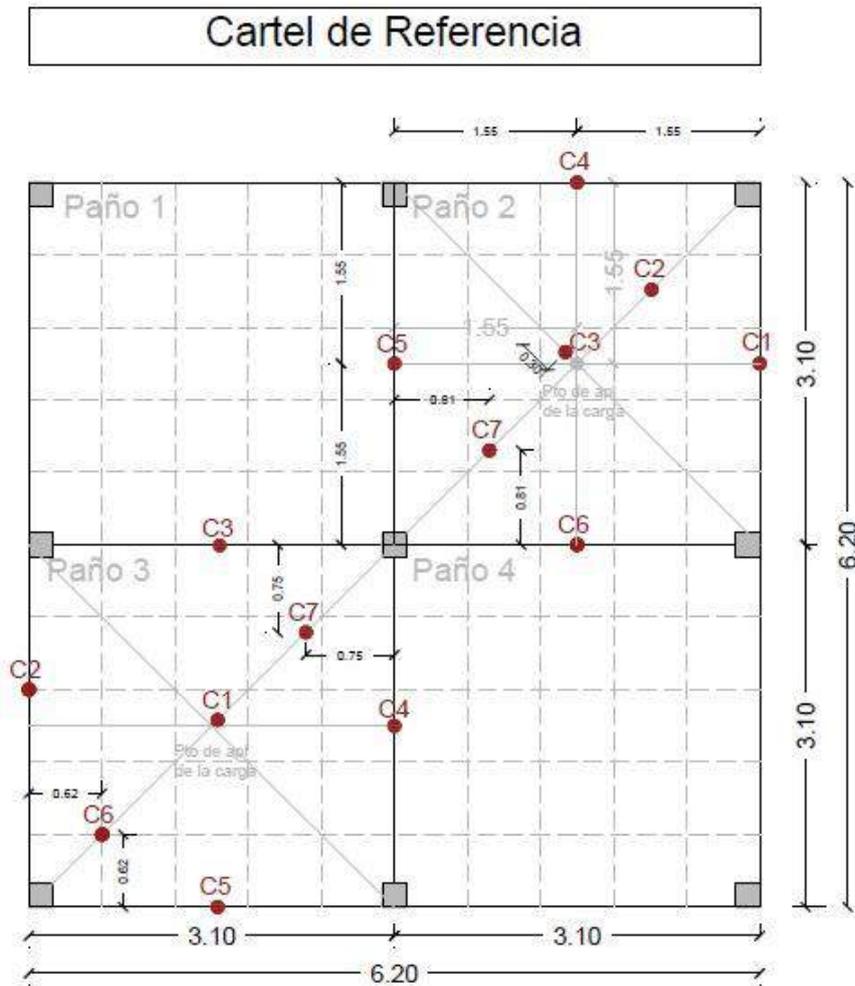


Figura 24 – Posición de los comparadores.

En la Figura 25 se muestran algunos de los dispositivos utilizados para el desarrollo y registro del ensayo. En la Figura 25a se identifica el Puente de Wheastone, utilizado para controlar indirectamente la fuerza que el dinamómetro aplica a la losa en cada instante. En la Figura 25b, se ven el dinamómetro y el gato hidráulico que se utilizaron para la introducción de cargas. En la Figura 25c, aparece la bomba manual de incremento de presión y el manómetro utilizado para controlar las cargas aplicadas. Por último, la Figura 25d muestra uno de los comparadores utilizados para registrar la flecha en posiciones particulares.



Figura 25 – Dispositivos de medida e introducción de cargas.

El procedimiento de ensayo consistió en someter a la losa a distintos escalones de carga - descarga. Los primeros escalones, previo a alcanzar la carga máxima que soporta el elemento, se controlaron por la fuerza

aplicada. Posterior a alcanzar dicha carga, se continúa analizando el comportamiento de la losa controlando los escalones por las deformaciones generadas. Se identificó la carga máxima en aquel instante en que la losa se continuó deformando sin necesidad de un incremento en las cargas.

El primer ensayo realizado a la losa se separó en dos días, debido a la falta de luz para poder finalizar el procedimiento. Los escalones de carga-descarga realizados por control de fuerzas comenzaron en 18 kN (correspondientes a una presión hidráulica en el gato de 200 psi). Entre un escalón y el siguiente se realizó un incremento de 18 kN (200 psi). Así se llegó hasta una carga de 162 kN (1800 psi) con control de fuerzas. Posterior a ello, se realizaron lecturas controlando los desplazamientos, en particular tres lecturas con 180 kN (2000 psi) de carga. El segundo día se realizaron siete escalones adicionales de carga, todos ellos controlados por desplazamientos, ya que se buscó estudiar la ductilidad de la pieza. En el segundo ensayo, los escalones de carga-descarga realizados por control de fuerzas se realizaron comenzando por 18 kN (200 psi) y luego con un incremento de 9 kN (100 psi). En ambos casos, para los escalones controlados por desplazamientos, se tomó en cuenta la medida registrada por el comparador más cercano al centro del paño. Finalizado cada escalón de carga o descarga, se dejaba el sistema en pausa para tomar las medidas de flecha en cada uno de los comparadores y relevar fisuras generadas o extendidas en el escalón correspondiente.

### **3.6 Extracción de testigos**

Luego de realizado el segundo ensayo a la losa se trabajó en determinar cuáles eran las ubicaciones de las que se extraerían los testigos de modo de obtener resultados representativos aprovechando de la forma más eficiente los recursos disponibles. Para ello se tuvo en cuenta que no fuera una zona en la que el material se encontrara visualmente afectado por las intervenciones anteriores, es decir, que no se identifiquen fisuras producto de los ensayos realizados a la losa. A su vez, se procuró obtener testigos con orientaciones distintas respecto de los bordes de la losa y lograr que alguno de los testigos pueda ser representativo de la condición de borde. En la Figura 27 se identifica las posiciones de las que se extrajeron los testigos: siete testigos del paño 1 y diez del paño 4. A su vez, se indican los ejes determinados para el estudio de orientación y se representa con un rayado los testigos que no fueron ensayados en esta instancia.

La preparación de las zonas de extracción fue la siguiente: se marcó la zona a intervenir con el número de identificación de cada uno de los testigos en la cara superior de la losa y se indicó con una flecha, la dirección en la cual se encuentra el cartel de referencia. De este modo es posible identificar en el laboratorio cuál era la orientación que ocupaba el testigo en su posición original. En la Figura 26a se puede ver cómo quedó el paño 4 luego de la intervención. En la Figura 26b, se identifica el canto de la losa luego de extraído un testigo. En la Figura 26c y d se identifica el corte del primer testigo previo y posterior al cortado.

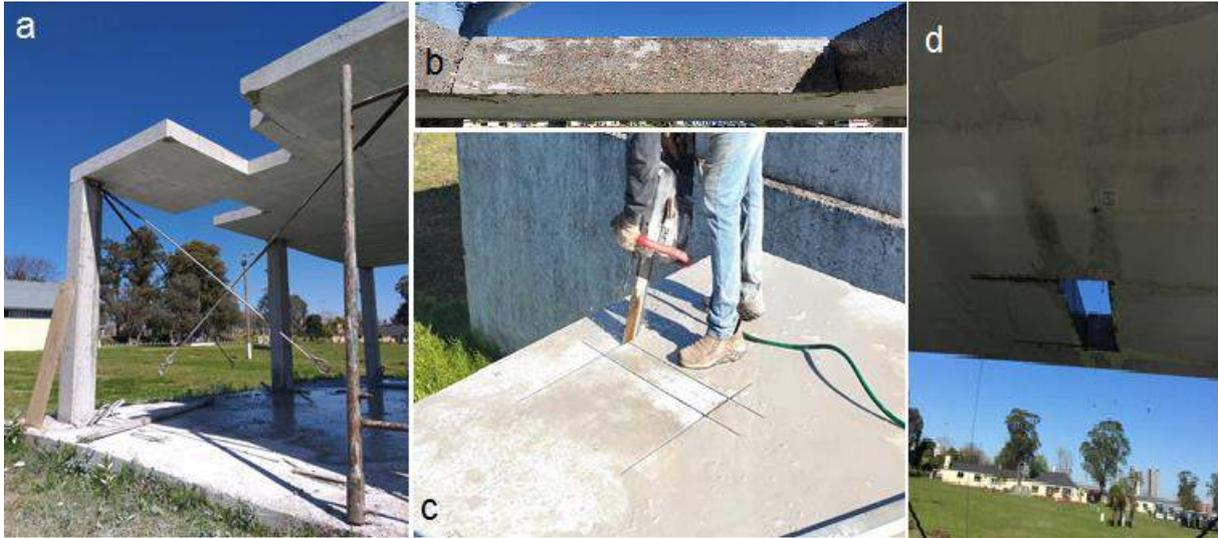


Figura 26 – Extracción de Testigos.

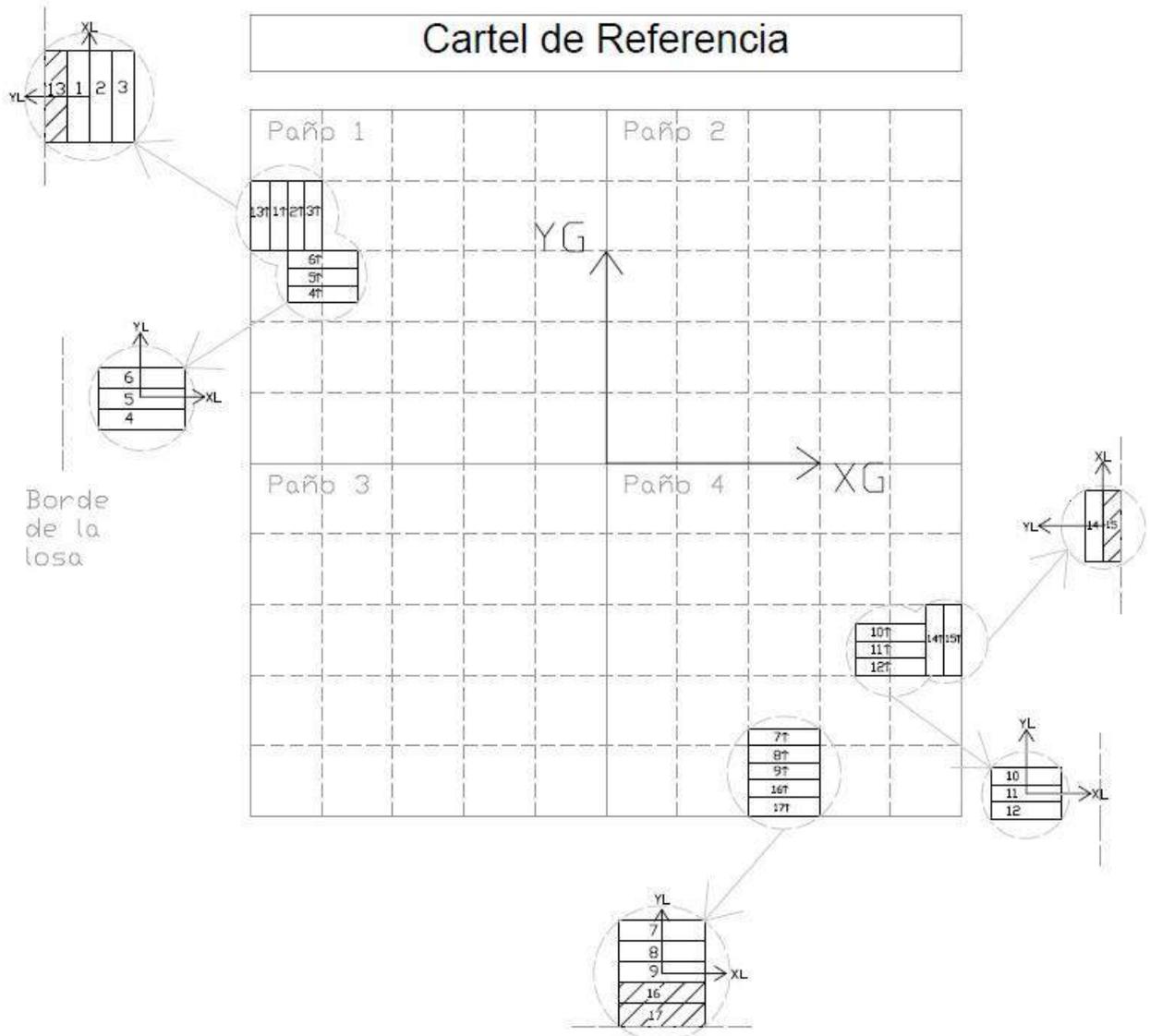


Figura 27 – Ubicación de los testigos en la losa.

## 3.7 Descripción de ensayos no-destructivos de testigos

### 3.7.1 Dimensiones

Las dimensiones proyectadas de los testigos fueron tales de obtener vigas de 13 cm x 15 cm x 60 cm, siendo 13 cm el espesor proyectado de la losa. Dado a que no se trata de un procedimiento del todo preciso, las dimensiones de los testigos distan de ser regulares, por lo que se tomaron las siguientes medidas. Para determinar el largo de las vigas, se tomaron cinco medidas y se promediaron entre sí. En cuanto al espesor y ancho, se tomaron tres medidas y también se promediaron. Las dimensiones de los testigos extraídos se encuentran en el Anexo "10.8 Dimensiones de los testigos".

### 3.7.2 Conteo de fibras

Se realizó un conteo visual de fibras en las caras de los testigos, en particular se cuenta las fibras que se identifican con sección circular, ya que las mismas son las que "cosen" la superficie de corte y por tanto contribuyen a la resistencia del hormigón en la dirección perpendicular a la cara.

Dicho proceso tiene etapas distintas que se indican a continuación.

1. Conteo de fibras en las caras de las vigas.
2. Conteo de las fibras en la sección central de la viga (después de realizado el ensayo a flexión en tres puntos).

El procedimiento se describe con más detalle en el Anexo "10.2 Conteo de fibras".

### 3.7.3 Determinación de la concentración de fibras mediante ANOVA

Para determinar si las fibras tienden a concentrarse en algún sector del espesor de la losa, se trabajó con un test estadístico. Para ello se categorizó la ubicación de estas en tres franjas: superior, media e inferior; la primera de las franjas corresponde a la más próxima a la cara superior original de la losa.

Para cada uno de los 12 testigos considerados (del 1 al 12 en la Figura 27), se contaron 72 cuadrados:

- 54 de ellos en las caras laterales (aprox. 15 x 60 cm); 27 en cada una.
- 18 de ellos en las caras frontales (aprox. 15 x 15 cm); 9 en cada una.

El test estadístico elegido fue el de Análisis de Varianza (de aquí en más ANOVA). La totalidad de la información acerca del test estadístico fue extraída del artículo de Ferrero [36]. Dicha información se encuentra en el Anexo "10.3. ANOVA de una vía" junto con la justificación para utilizar este test.

El ANOVA de una vía se utiliza para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias de tres o más grupos. Luego de realizado el ANOVA, si existen diferencias entre los grupos, se puede identificar cuál de ellos presenta una diferencia con otro, trabajando con pruebas de comparación múltiple post-hoc (o a posteriori). En este caso particular, se quiere determinar si existe una diferencia entre la cantidad de fibras contadas en cada una de las franjas antedichas.

El modo de llevar a cabo el estudio fue el siguiente:

1. Se determinaron 5 métodos en los que se realizaría el test, modificándose de un método al otro, el parámetro considerado para discriminar. Estas categorías son:
  - a. Utilizando todos los valores juntos. 864 valores, 288 correspondiente a cada franja.
  - b. Generando grupos según orientación. Se trabajó con los testigos 1 a 3, 4 a 6, 7 a 9 y 10 a 12 por separado.
  - c. Generando grupos según su orientación respecto al borde más cercano. Es así que se tiene 2 subgrupos: paralelos al borde más cercano (1 a 3 y 7 a 9) y, por otro lado, perpendiculares al borde más cercano (4 a 6 y 10 a 12).
  - d. Generando grupos según la orientación en que se realizó el ensayo de flexión:

- i. Posición original (*momento positivo*): testigos 1, 5, 9 y 10
  - ii. De canto (*momento medio*): testigos 2, 6, 8 y 11
  - iii. Invertidos (*momento negativo*): testigos 3, 4, 7 y 12
- e. Considerando cada uno de los testigos individualmente
- 2. Para cada uno de los subgrupos considerados correr el ANOVA de una vía de la aplicación [37]. El código de la mencionada web corre simultáneamente el Test post-hoc de Turkey, que determina cuáles son los grupos entre los que la diferencia de varianzas es estadísticamente significativa.
  - a. Si el test determina que la falta de normalidad puede influir negativamente en los resultados o si las varianzas no son homogéneas, se corre los Test de Kruskal-Wallis [38] y el ANOVA de Welch [39]. El Test extraído de la web [39], realiza a su vez el Test de Games-Howell para determinar cuáles son los grupos entre los que existe diferencia estadísticamente significativa.

Un comentario que resulta importante respecto de la forma elegida para discriminar está relacionado con el proceso identificado por la letra “d”. Es claro que los sentidos de ensayo de los testigos no deberían influir en los resultados, pero se busca determinar si casualmente se agruparon testigos con propiedades similares para ensayar los diferentes comportamientos, debido a que la elección del sentido de ensayo se determinó de forma aleatoria.

### 3.7.4 Ensayo Inductivo

El Ensayo inductivo consiste en determinar la inductancia de piezas de HRFA de modo de inferir la cantidad de fibras orientadas en distintos sentidos. El mismo fue desarrollado por Cañette Cal et al. (2017). En dicho caso se determinó la cantidad de fibras orientadas según los tres ejes principales de un cubo de HRFA. La Figura 28 muestra la totalidad del dispositivo de ensayo: bobinas, conductores, dispositivo de medida de la inductancia y piezas cúbicas a ensayar.

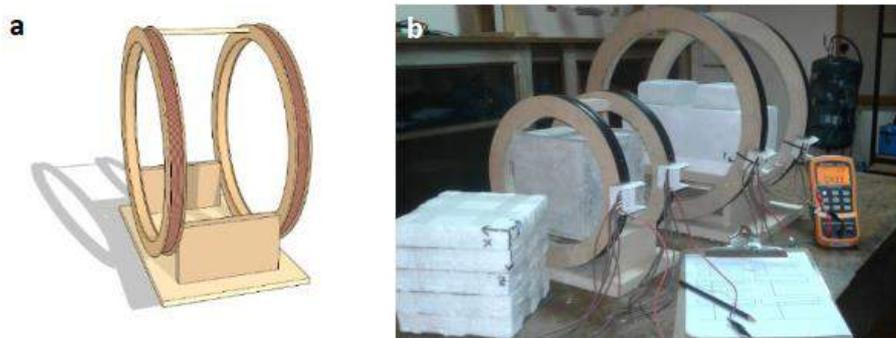


Figura 28 – Dispositivo de Ensayo de Inductancia [30].

En la presente investigación se debió adaptar el ensayo para determinar las fibras orientadas según la dirección longitudinal de los testigos (se contaba con testigos de forma rectangular y no cúbica). El procedimiento adaptado consiste de los siguientes pasos:

1. Tomar una medida inicial de la inductancia. Posterior a ello, cerar el dispositivo de medida.
2. Llevar las bobinas a la sección que se quiere registrar y aguardar a que la lectura se estabilice (se consideró estabilizada cuando no se identificó variaciones en 10 segundos).

En todos los pasos se debe tener la precaución de no colocar elementos metálicos en la cercanía de los dispositivos ya que eso puede alterar la lectura. La medida inicial se debe tomar cada vez que se trabaja con un nuevo testigo. Respecto a la sección de medida, en cada uno de los testigos se determinaron doce lecturas. Estas se identifican en la Figura 29, allí se observan con el mismo número aquellas secciones simétricas entre sí. Las secciones más extremas se encuentran a 7,5 cm del borde exterior de los testigos y las lecturas II, IV, V y VI se realizan cada 5 cm a ambos lados del testigo. Adicionalmente se realizan dos lecturas en las secciones III, estas se encuentran a 15 cm del borde de los testigos.

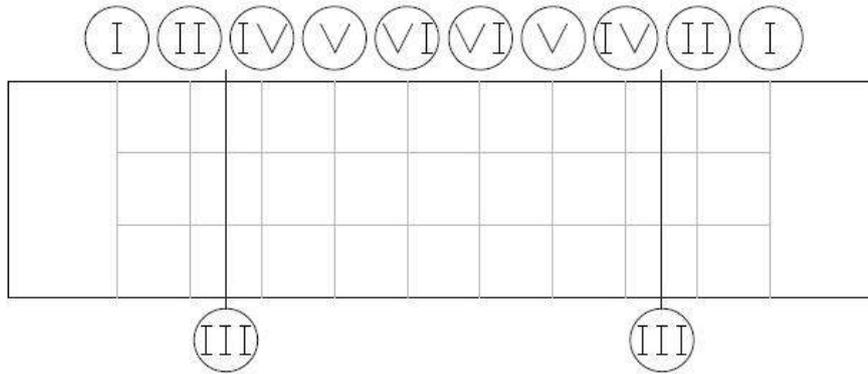


Figura 29 – Secciones de lectura de la inductancia.

El procedimiento de ensayo se identifica en la Figura 30. En la Figura 30a se muestran los diferentes elementos utilizados en el ensayo y la disposición adoptada. En la Figura 30b se muestra el procedimiento de modificación de sección considerada. Tal como allí se identifica, se optó por modificar la posición de la bobina y no el testigo por cuestiones prácticas. El procedimiento de conexión de los dispositivos se encuentra en el Anexo “10.4. Procedimiento de ensayo inductivo”.



Figura 30 – Ensayo Inductivo.

### **Desarrollo del patrón de comparación**

De modo de obtener un patrón con el cuál comparar los resultados que surgen del Ensayo Inductivo aplicado a los testigos de la losa, en la Figura 31 se muestra el proceso de fabricación de un “testigo” de espuma plast. El objetivo es lograr una distribución uniforme en todo el elemento de modo de obtener una lectura “ideal” cuando se realice el ensayo. De este modo, comparando con testigos reales, se puede identificar si las lecturas en cada sección indican más o menos fibras de lo proyectado.

El proceso de la Figura 31 comienza con el pesaje de las fibras, luego se colocan las mismas distribuidas en trozos de espuma plast, 3 x 15 cm, y estos se juntan para formar cuatro cubos de 15 x 15 cm. Finalmente los cubos se unen para generar la viga de 60 x 15 cm. En el proceso se toman medidas de Inductancia las cuales sirven de patrón para los testigos reales.



Figura 31 – Ensayo Inductivo a testigo de espuma plast.

### 3.7.5 Conteo de fibras en la sección de rotura

Si bien este procedimiento se lleva a cabo posterior a la extracción y ensayo de los testigos, se trata de un ensayo no destructivo. El proceso es totalmente análogo al indicado en la Sección “3.7.2. Conteo de fibras” y el Anexo “10.2 Conteo de fibras”. La única diferencia registrada reside en que para la sección de rotura se deben contar ambas caras generadas y sumar las cantidades que corresponde a un mismo cuadrado. La Figura 32 muestra un ejemplo particular de sección de rotura.



Figura 32 – Sección de rotura del testigo 10.

Un estudio particular que se realiza a partir de este conteo es determinar la cantidad de fibras en la sección de rotura ponderada por la ubicación que las mismas ocupan en ella. El mismo consiste en dotar a las fibras de un peso relativo dependiendo de si las mismas ocupan la franja inferior, media o superior en el momento de hacer el ensayo a flexión. El procedimiento comienza por identificar cuáles son las tres franjas en cada uno de los ensayos (si se ensaya a momento positivo, las franjas son las originales; si se ensaya a momento negativo, se invierten las franjas; si se ensaya a momento medio, se debe determinar hacia qué lado se rotó el testigo para ensayar). La determinación de la cantidad de fibras ponderadas se realiza con la siguiente ecuación:

$$np = \frac{nfs \cdot \frac{e}{6} + nfm \cdot \frac{3e}{6} + nfi \cdot \frac{5e}{6}}{\frac{e}{2}} \quad (4)$$

Donde:

- $np$ : cantidad de fibras ponderada por la ubicación en la sección de rotura
- $nfs$ : cantidad de fibras en la franja superior
- $nfm$ : cantidad de fibras en la franja media
- $nfi$ : cantidad de fibras en la franja inferior
- $e$ : espesor del testigo

En la Ecuación (4) se determina que el peso relativo de una fibra en la franja inferior es de  $5/6 e$ , de una en la franja media es de  $3/6 e$  y de una fibra en la franja superior es de  $1/6 e$ . Esto se relaciona con el brazo de par hasta el borde superior de la probeta cuando la sección se encuentra totalmente plastificada. En la Figura 33 se explica gráficamente el concepto.

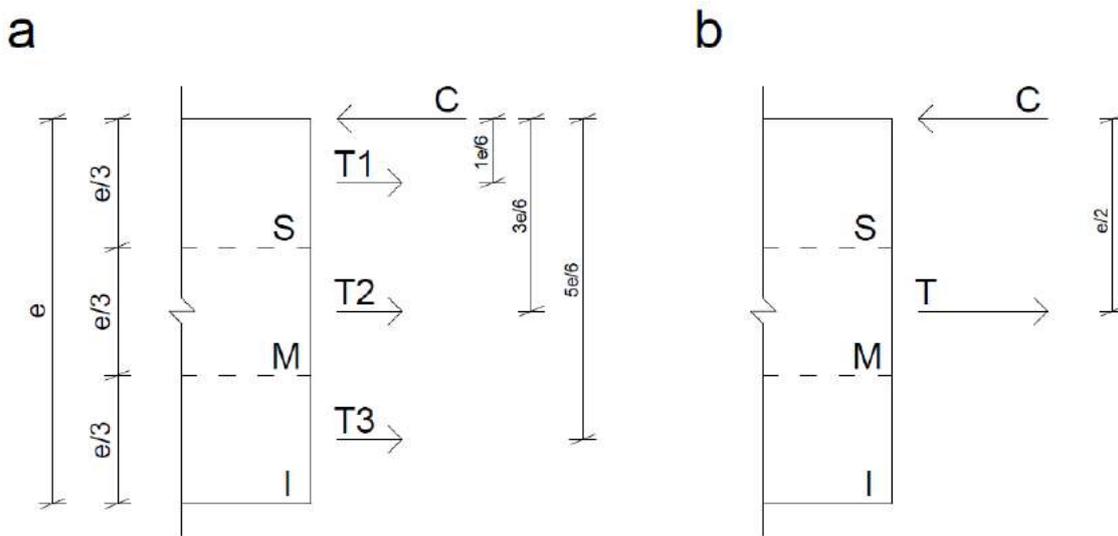


Figura 33 – Comportamiento seccional; a) ponderado; b) mismo peso todas las franjas.

### 3.7.6 Estudio de la orientación de las fibras a partir del conteo

Utilizando los resultados del conteo de fibras, es posible realizar un análisis de la orientación de estas en la losa. La Figura 27 muestra los ejes globales ( $X_G$  e  $Y_G$ ) y los locales de cada testigo. Para el análisis se trabaja con dos clasificaciones distintas. En un primer caso, se tomaron todos los testigos juntos. En un segundo caso, se separaron en cuatro subgrupos: testigos 1, 2 y 3 ( $SG_1$ ), testigos 4, 5 y 6 ( $SG_2$ ), testigos 7, 8 y 9 ( $SG_3$ ) y testigos 10, 11 y 12 ( $SG_4$ ). Para todos estos subgrupos, se identifica la orientación del borde más cercano. Para los subgrupos 1, 2 y 4 el borde más cercano tiene orientación  $Y_G$ , mientras que para el subgrupo 3, el borde más cercano tiene orientación  $X_G$ . El modo de procesar la cantidad de fibras será entonces en la dirección paralela al borde más cercano (de aquí en más  $d_{||}$ ) y en la dirección perpendicular al mismo (de aquí en más  $d_{\perp}$ ).

## 3.8 Ensayo de Flexión

Se desarrolló el mencionado ensayo de modo de obtener los valores de resistencia residual para los testigos extraídos de la losa. En una primera instancia se discutió sobre la metodología de ensayo a seguir, esto implica adecuación de testigos, elección de sistema de carga, etc. Haciendo énfasis en ventajas y desventajas de las diferentes opciones se seleccionó la que se consideró más acertada. Como desventaja se puede identificar: no poder utilizar metodología y cálculos normalizados, debido a la geometría que presentan los especímenes. Además, la imposibilidad de realizar entalla incide en que el testigo puede elegir por dónde fisurar, introduciendo gran variabilidad a los resultados. La ventaja más importante se asocia a la posibilidad de trabajar con las piezas extraídas de la losa sin realizar ningún tipo de adecuación geométrica. A su vez, colocar una entalla a un espécimen de espesor reducido podría llevar a resultados poco representativos.

Se optó así, por ensayar probetas sin entalla, con carga centrada, y apoyadas a 25 cm del centro en cada lado. Los dispositivos de ensayo se muestran en la Figura 34, Figura 35 y Figura 36. Aquí se muestra que se utilizaron cuatro LVDT. Dos de ellos, el número 2 y 3, se ubicaron en la parte inferior de sus respectivas caras de forma tal de poder medir el estiramiento longitudinal total de la cara inferior. Cuando la sección fisura, este estiramiento incluye la deformación unitaria y el espesor de las fisuras que se generan. Para la etapa fisurada, el término de deformación elástica es despreciable frente a la apertura de las fisuras. Los otros,

número 4 y 5, se colocaron para poder obtener el valor de la flecha de cada probeta. En cuanto a la introducción de carga se utilizó una doble rótula.

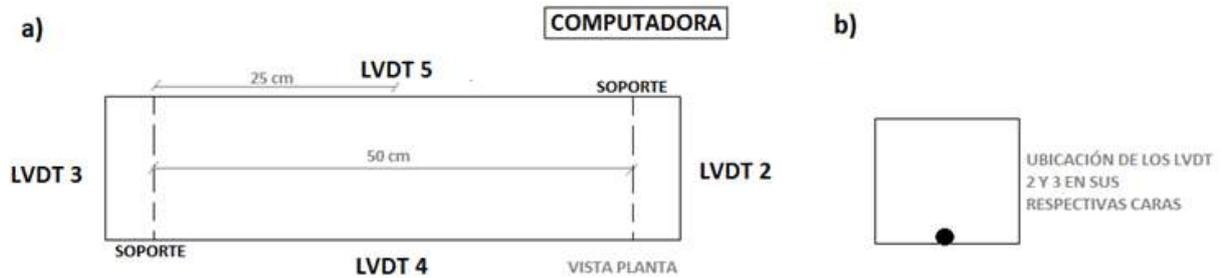


Figura 34 – Esquema de la ubicación de LVDT y soportes.

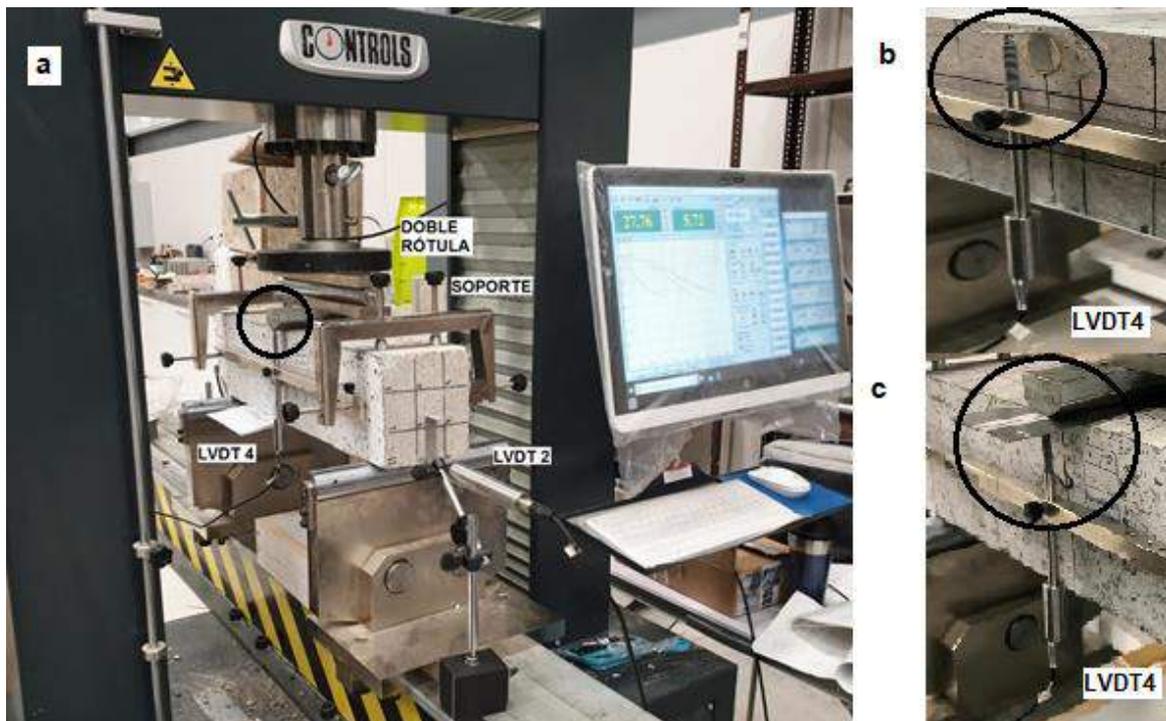


Figura 35 – Dispositivo de ensayo.

Se trabajó con dos sistemas de medición alternativos: LVDT 4 y 5 apoyados en una chapa sobre la que apoya la doble rótula (Figura 35c – sistema alternativo) y apoyo en una chapa con forma de L solidaria al área lateral del testigo y sin contacto con la doble rótula (Figura 35b – sistema oficial). Los testigos 14, 2 y 5 fueron los ensayados con el primero de los sistemas indicados, siendo todo el resto de los testigos ensayados con el restante. Por otro lado, de modo de extraer más información de los ensayos, se registró el procedimiento completo en videos, colocando un dispositivo debajo de la cara inferior con esta finalidad.

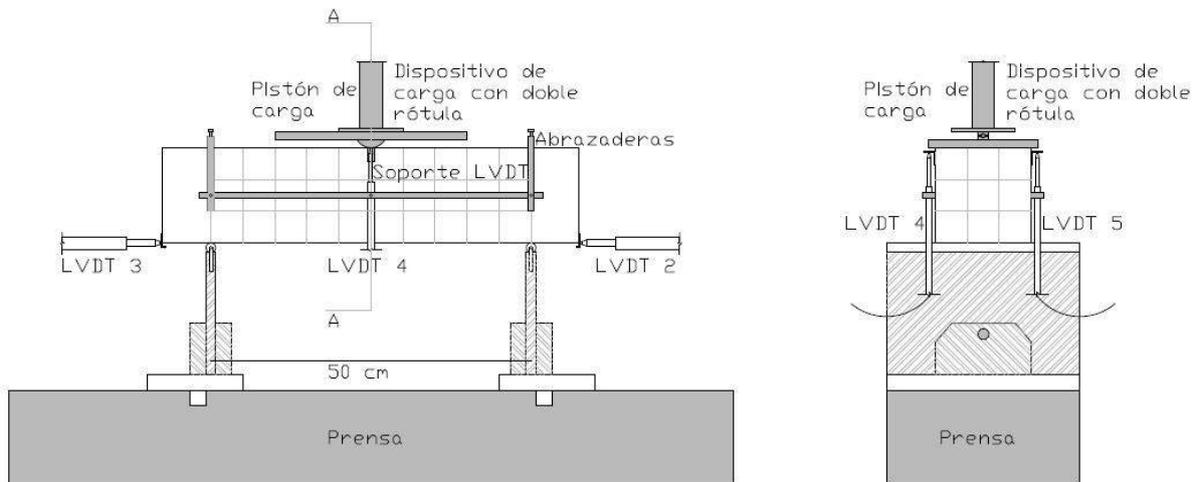


Figura 36 – Esquema del dispositivo de carga.

De modo de analizar el comportamiento general del elemento, se optó por ensayar las probetas en tres sentidos diferentes. La primera de ellas corresponde a la posición real del testigo en la losa, por lo tanto, será la franja inferior la más traccionada. Como segunda posición se trabaja con el testigo invertido, de forma que la franja originalmente superior será la más solicitada a tracción. Esto es más representativo de las secciones cercanas a los pilares (donde el momento es negativo). Por último, se ensaya los testigos de canto, de forma tal de analizar un comportamiento promedio. La nomenclatura elegida para los tres modos de ensayo es positivo, negativo y medio, respectivamente.

En cuanto al procedimiento en sí, previo al ensayo de cada uno de los testigos se procedió al marcado para poder apoyarlos en la correcta posición. A su vez, se marcaron los puntos en los que se acondicionaron chapas de apoyo de los respectivos LVDT. Por otro lado, de modo de mejorar las características del video, se pintó la cara inferior de cada ensayo, con una capa de pintura blanca (Látex Exterior) y pequeñas marcas de color negro. Hecho esto, se procede a colocar el testigo en posición de ensayo, haciendo coincidir las marcas con los apoyos. Posteriormente, se disponen adecuadamente los LVDT y se cera su lectura inicial.

El ensayo propiamente dicho comienza con una precarga. El control de la prensa se realiza mediante desplazamientos, trabajando con una velocidad de 0,04 mm/s en la etapa previa a la fisura y 0,16 mm/s posterior a la misma. El modo de identificación de la fisura es mediante las gráficas que automáticamente la computadora realiza. Allí se visualiza el desarrollo de las distintas variables en función de la fuerza aplicada. El instante en el que la pieza fisura coincide en que la fuerza tiene una caída repentina o un cambio brusco en la pendiente que describe.

El ensayo se mantiene hasta que la flecha toma valores superiores a los 4 mm, así como la suma de las lecturas de los LVDT 2 y 3 supera ese mismo valor. Una vez finalizado el ensayo se quitan todos los dispositivos de medida y se procede a cargar el testigo de la misma forma hasta lograr su rotura. Así se obtienen dos tramos de cada testigo y se procede al conteo de las fibras que cosen la sección de fallo.

### 3.8.1 Comparación comportamiento flexión de probetas y testigos

La comparación directa de los resultados que se obtienen del ensayo de flexión a las probetas y los testigos no son directamente comparables debido a que cuentan con dimensiones distintas, salvo por el caso de los testigos extraídos del paño 4 que no se ensayan de canto. Estos testigos cuentan con una geometría aproximada de 12,5 cm de altura y 15,0 cm de ancho, lo que coincide con la sección media de las probetas que se someten al ensayo normalizado (estas cuentan con una entalla de 2,5 cm en su altura de 15,0 cm). Para este caso, se pueden comparar los resultados y obtener así un valor K experimental.

## 4 Modelado computacional

En el transcurso de la investigación se trabajó con el software ABAQUS/CAE2017 (Abaqus) con el objetivo de comparar resultados experimentales con los arrojados por el programa utilizando la ecuación constitutiva que sugiere el Código Modelo [7]. De este modo se busca, de forma indirecta, validar la propuesta de la mencionada normativa. Se utilizó el software en dos instancias. En un primer caso se comparó el resultado experimental de los testigos con lo arrojado por el software para un cuerpo sólido de las dimensiones de estos. En el segundo caso, se comparó el resultado experimental para la losa con el resultado del software para un elemento de área. En la presente sección se incluyen los parámetros que se deben tener en cuenta de modo de reproducir los resultados que se obtienen en la investigación.

### 4.1 Modelado del HRFA

Tanto para la aplicación en el modelo de los testigos, como en el de la losa, se eligió representar el material de estudio con el Módulo “Concrete Damaged Plasticity” (CDP) que el software ofrece. El modo de representación del comportamiento mecánico de la mezcla utilizando el CDP se basa en una serie de parámetros que deben ser definidos. Como primera hipótesis importante, el módulo trabaja con la suposición de isotropía en el plano, que se valida con ensayos realizados en el transcurso de la investigación. En segundo lugar, previo a la fisuración (tanto en compresión como en tracción) el material se modela como elástico-lineal con un Módulo de Young de 41316,5 MPa y un coeficiente de Poisson de 0,2 [40]. Estos parámetros se definen a partir de lo propuesto por el Código Modelo [7]. A su vez, se considera una densidad de 2500 kg/m<sup>3</sup> para el material de referencia.

Respecto a los límites de la capacidad a tracción y compresión, así como su comportamiento posterior a la fisura, se consideró en la presente investigación los modelos sugeridos por el Código Modelo [7]. En tracción, el comportamiento varía dependiendo del valor adoptado para el factor de orientación, K. El mismo modifica la ecuación constitutiva utilizada, que se presenta en la sección “5.1.3. Ecuación constitutiva según el Código Modelo”. En compresión, se utiliza el comportamiento sugerido por el Código en todos los modelos desarrollados, sin ninguna modificación adicional. Es importante indicar que el software trabaja con una ecuación constitutiva plástica, por lo tanto, de modo de representar correctamente el comportamiento del material, se debe ingresar a la herramienta únicamente los tramos post-fisuración.

El módulo CDP trabaja con parámetros adicionales que se definen a continuación. En primer lugar, se define la relación entre la tensión de fluencia para compresión biaxial y para compresión uniaxial ( $f_{b0}/f_{c0}$ ). Para hormigón convencional, este valor varía entre 1,10 y 1,16 [41]. Se adopta el valor por defecto que toma el programa, 1,16 [42], dado a que el Código Modelo [7] indica que las fibras no influyen en el comportamiento a compresión de la pieza. En segundo lugar, se decide tomar otros dos valores de parámetros por defecto. Estos son: el coeficiente que determina la forma de la sección desviatoria ( $K_c = 0,667$ ) y la excentricidad (excentricidad potencial de flujo = 0,1). Estos parámetros tienen una definición que dista de ser trivial y que no tiene una influencia importante en los resultados que se obtienen [43]. Los parámetros que mayor influencia tienen, y que deben ser definidos para cada caso particular de modo de obtener valores realistas, son el ángulo de dilatación y el parámetro de viscosidad [43]. El primero de estos parámetros corresponde al ángulo de fricción interna del material, el cual se tomó como 36° siguiendo estudios previos [42]. Por su parte, el parámetro de viscosidad se toma igual a 0,0001, valor recomendado por Szczecina y Winnicki (2015). Para determinarlo se probaron distintos valores de viscosidad y se optó por el que arroja resultados cualitativamente más acordes. Un resumen de los parámetros utilizados se indica en la Tabla 5.

Tabla 5 – Parámetros del módulo CDP.

$f_{b0}/f_{c0}$	$K_c$	Excentricidad	$\phi$	Viscosidad
1,16	0,667	0,1	36 °	0,0001

El módulo CDP tiene la posibilidad de involucrar un parámetro de daño para la capacidad portante del material cuando se alcanza un determinado estado de tensiones, tanto a compresión como a tracción. Vale aclarar que en el transcurso de esta investigación no se consideró este parámetro de daño.

## 4.2 Modelos particulares

### 4.2.1 Modelado del sólido – testigos

El modelo de los testigos en Abaqus se genera considerando los siguientes parámetros. Se modela a los testigos como sólidos, siendo las geometrías aquellas que se presentan en la Tabla 9. La parte se genera a través de la extrusión de una superficie. De modo de definir los planos en los que colocar las cargas y los apoyos, se generan tres particiones a la pieza. La sección con la que se trabaja es un sólido homogéneo con las características del HRFA que se indican en la sección previa. Por último, se modela uno de los apoyos como fijo, mientras que el restante se modela deslizante. La carga se introduce en una recta, controlando allí los desplazamientos.

Se definió emplear una malla de elementos cúbicos y se trabajó en determinar cuál era la dimensión adecuada para estos, optándose por utilizar la décima parte del lado más pequeño de cada testigo. Esto se debió a que, trabajando con elementos más pequeños, el tiempo de resolución de los modelos es muy largo (en el entorno de una hora y media).

En la Figura 37a se muestra el mallado para el sólido que se modela. En la Figura 37b se muestra las condiciones de contorno (apoyo fijo en una de las líneas y deslizante en la restante) y la introducción de cargas en el centro del vano.

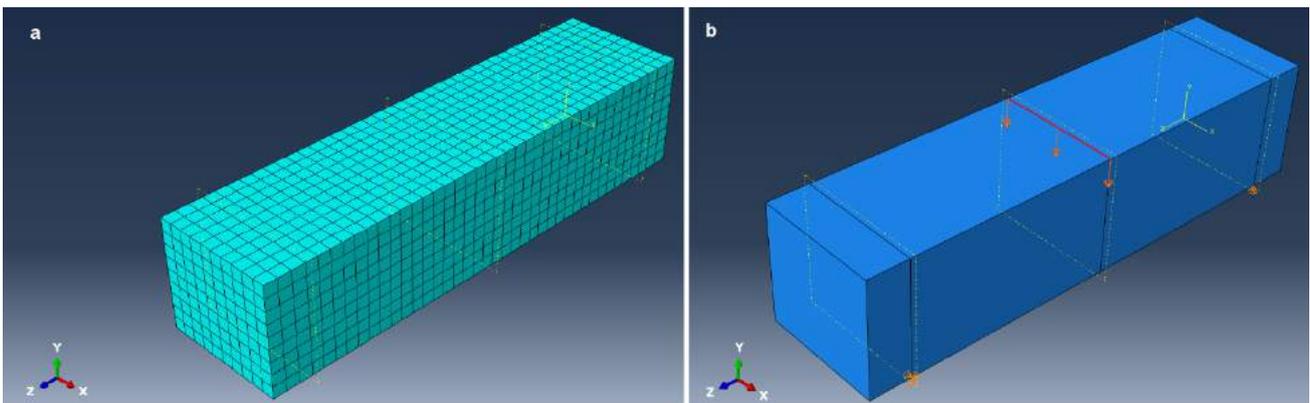


Figura 37 – Mallado, condiciones de contorno e introducción de carga. Testigos.

Previo a correr el modelo, se debe solicitar al software los puntos en los cuales se desea recabar información y cuál información es la que se desea. En este caso, se solicitó la flecha y la fuerza aplicada en una franja de puntos, que coincide con el centro de los testigos (este es el punto en el que se aplica la carga y que por tanto cuenta con el valor más importante de flecha). Una vez que se corre el programa se debe consultar el *monitor de resultados*. En caso de que se reporte un error, el programa indica qué es lo que falló y se procede a solucionarlo. Se debe prestar particular atención a la cantidad de iteraciones límite y el incremento mínimo que se permite hacer en una iteración, ya que de ese modo se puede sortear problemas de resolución.

### 4.2.2 Modelado del elemento de área – losa

Para el modelado de la losa, con fines de comparación con la relación carga-flecha experimental, se utilizan elementos de área homogéneos que el software nombra “Shell, homogeneous”. La geometría ingresada al software coincide con aquella de la Figura 13. En cuanto al material, se modela el HRFA tal como se indica en la Sección “4.1. Modelado del HRFA”. Todos los apoyos en pilares se modelan como fijos y se introduce la carga con control de desplazamientos. La malla utilizada corresponde a elementos cuadrados de lado 10 cm,

lo cual resulta menor a lo aconsejado para una losa de hormigón armado (para la que se suele trabajar con elementos cuadrados del doble del espesor de la losa; en este caso sería 26 cm). Se realizaron pruebas para determinar si este era el tamaño adecuado para los elementos de la malla, obteniéndose que al refinar la misma la losa toma cargas menores. De todos modos, se optó por proceder con el tamaño antedicho dado a que trabajar con elementos más pequeños lleva a que el modelo se complejice y los tiempos de resolución rondan las dos horas.

En la Figura 38a se muestra el mallado para la losa. En la Figura 38b se muestra las condiciones de contorno (apoyos fijos en todos los pilares) y la introducción de carga en el centro de uno de los paños.

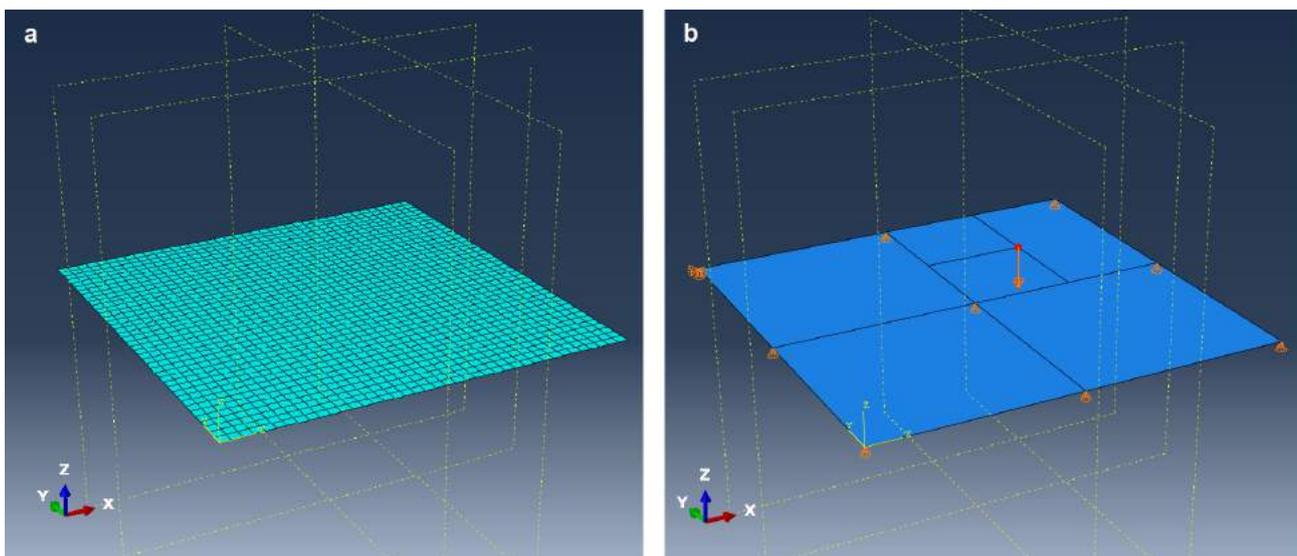


Figura 38 – Mallado, condiciones de contorno e introducción de carga. Losa.

Tal como se indica en la sección “4.2.1 Modelado del sólido – testigos” para que el software logre correr el modelo en su totalidad, se debe controlar el *monitor de resultados* y trabajar con un número adecuado de iteraciones e incrementos mínimos.

## 5 Análisis de los resultados experimentales

### 5.1 Ensayo de flexión normalizado - Probetas llenadas a pie de losa

#### 5.1.1 Análisis de los resultados

La Figura 39 muestra los valores recabados de fuerza aplicada en función de la flecha experimentada para cada una de las cinco probetas llenadas a pie de losa. A su vez, las líneas verticales representan los valores de flecha utilizados por la normativa [17] para determinar las tensiones residuales de cálculo.

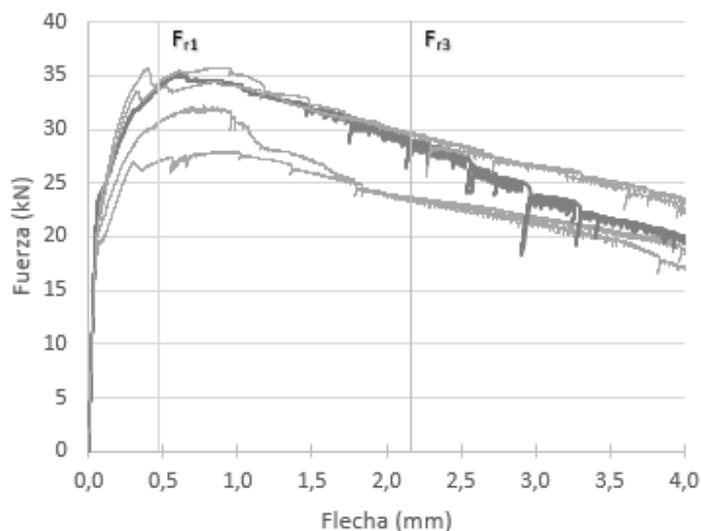


Figura 39 – Resultado del ensayo normalizado para probetas llenadas a pie de losa.

Los diagramas de cada uno de los testigos son cualitativamente similares. Se puede identificar un tramo elástico-lineal en el inicio de la carga, que luego se transforma en plástico. Todas las probetas muestran un comportamiento de endurecimiento luego de la fisura que se registra para una flecha aproximada de 0,08 mm. Alcanzada la fuerza pico, la capacidad disminuye; las probetas se siguen deformando, aunque se apliquen cargas menores.

Si bien se trata de probetas todas iguales entre sí, los gráficos ploteados en la Figura 39 muestran la gran variabilidad con la que se trabaja. Esto será corroborado a continuación con la comparación de los números crudos. Es claro que el trabajo con este material aumenta la dispersión. Por otro lado, no está demás resaltar el ruido con el que se trabaja a partir de los resultados obtenidos. En particular el gráfico de la probeta L\_3 (resaltada con un gris más fuerte y trazado más grueso en la Figura 39).

Se presenta en la Tabla 6 los valores de fuerza representativos del comportamiento de las probetas. Utilizando la Ecuación (1) (Sección “2.1.2. Comportamiento a tracción”) se transforman en tensiones (Tabla 7).

Tabla 6 – Valores de fuerza obtenidos con el ensayo normalizado.

Posición	Flecha (mm)	CMOD (mm)	Probetas ensayadas					
			Fuerzas	L_1	L_2	L_3	L_5	L_7
L	0,08	0,05	$F_L$ (kN)	19,5	21,0	23,8	23,2	22,1
1	0,47	0,5	$F_1$ (kN)	27,0	30,6	33,9	34,4	33,9
2	1,32	1,5	$F_2$ (kN)	26,9	27,9	32,6	32,6	33,2
3	2,17	2,5	$F_3$ (kN)	23,7	23,6	28,4	29,6	29,7

4	3,02	3,5	<b>F<sub>4</sub> (kN)</b>	21,8	21,4	23,8	26,7	26,6
---	------	-----	---------------------------	------	------	------	------	------

Tabla 7 – Tensiones residuales para las probetas extraídas a pie de losa.

	L_1	L_2	L_3	L_5	L_7	Promedio	Desv. Est.	CV	Característico	Diseño
<b>f<sub>L</sub> (MPa)</b>	6,2	6,7	7,6	7,4	7,1	7,0	0,6	8%	6,1	4,1
<b>f<sub>R1</sub> (MPa)</b>	8,7	9,8	10,8	11,0	10,9	10,2	1,0	10%	8,6	5,7
<b>f<sub>R2</sub> (MPa)</b>	8,6	8,9	10,4	10,5	10,6	9,8	1,0	10%	8,2	5,5
<b>f<sub>R3</sub> (MPa)</b>	7,6	7,5	9,1	9,5	9,5	8,6	1,0	12%	7,0	4,7
<b>f<sub>R4</sub> (MPa)</b>	7,0	6,8	7,6	8,5	8,5	7,7	0,8	10%	6,4	4,2

Comparando la desviación estándar y el parámetro CV para los distintos escalones (f<sub>L</sub>, f<sub>R1</sub>, f<sub>R2</sub>, f<sub>R3</sub> y f<sub>R4</sub>) se identifica que las diferencias se van acrecentando a medida que aumenta la flecha. Los valores de f<sub>L</sub> dependen de la matriz de hormigón, por lo tanto, se debería esperar poca variabilidad en este parámetro. A medida que aumenta la flecha las fibras van tomando un mayor protagonismo y la distribución de estas se transforma en un parámetro clave. Por otro lado, la variabilidad asociada atenta contra los valores que se pueden considerar en el diseño de los elementos. En el peor de los casos, se pierde el 19% del promedio para el parámetro en el pasaje de este valor al característico.

El estudio de las probetas llenadas a pie de losa se completa con ensayos a compresión en probetas cilíndricas de 30 cm de altura y 15 cm de diámetro. Los resultados de este ensayo se presentan en la Tabla 8. De aquí se extrae que el trabajo con la dosificación previamente indicada genera un hormigón de alta resistencia, ya que el valor de f<sub>ck</sub> supera los 60 MPa.

Tabla 8 – Resultado de las probetas cilíndricas ensayadas a compresión.

	P1	P2	P3	Prom.	Desv. Est.	CV	f <sub>ck</sub>
<b>Resistencia (MPa)</b>	64,0	67,2	65,7	65,6	1,6	2,5%	63,0

Resulta interesante comparar el CV que surge de las probetas ensayadas a compresión con aquellas ensayadas a flexión. Se muestra que el ensayo de flexión, tanto por características intrínsecas como propiedades del material que se ensaya, está relacionado a una gran variabilidad. Además, tal como se indicó previamente, las probetas fueron realizadas utilizando el mismo hormigón con el que se llenó la losa, por lo tanto, también cuenta con fibras en su matriz. El hecho de que el parámetro CV no difiera en gran medida con uno de probetas de hormigón convencional muestra que el contenido de fibras no tiene un gran efecto en la variabilidad de los resultados de compresión.

### 5.1.2 Clasificación según el Código Modelo

Los valores para la clasificación del HRFA según el Código Modelo [7] fueron presentados en la Tabla 7.

El material utilizado es un “5b” lo que establece que:

- f<sub>R1k</sub> pertenece al intervalo de 5 y 6 MPa
- $0,7 \leq f_{R3k} / f_{R1k} = 0,82 \leq 0,9$

Esta información se complementa con los datos de las fibras incluidos en secciones anteriores para determinar el tipo de hormigón con el que se trabaja.

Aparte de la clasificación indicada, debido a que en esta investigación se trabajó con la premisa de HRFA para sustituir totalmente la armadura convencional, es importante demostrar el cumplimiento de los límites establecidos por norma:

- $f_{R1k} / f_{Lk} = 1,4 > 0,4$
- $f_{R3k} / f_{R1k} = 0,8 > 0,5$

### 5.1.3 Ecuación constitutiva según el Código Modelo

En la Figura 40 se presenta la Ecuación Constitutiva propuesta por el Código Modelo [7] para el hormigón de la losa, que se obtiene trabajando con los valores promedio de las tensiones residuales de la Tabla 7. Allí se muestra únicamente el tramo de tracción del material ya que el Código de referencia sugiere para la compresión el mismo comportamiento que el hormigón convencional. La ampliación de la gráfica hasta la deformación 1 % muestra el tramo elástico-lineal del comportamiento, gobernado por un valor de Módulo de Elasticidad:  $E = 41,3 \text{ GPa}$  ("2.1.4. Ecuación Constitutiva"; Ecuación (2)). Las curvas que se representan para distintos valores de K no son las únicas que se utilizan en el desarrollo de la investigación.

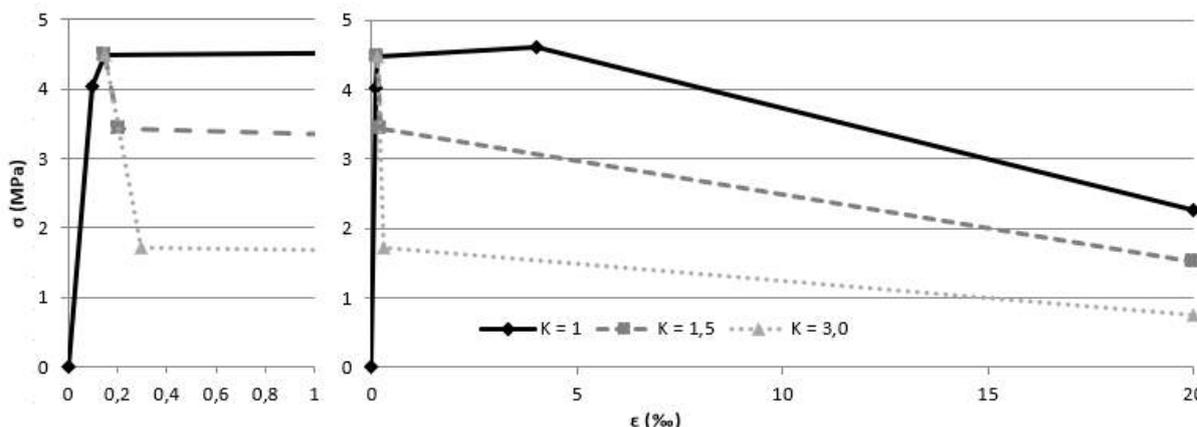


Figura 40 – Ecuación Constitutiva que propone el Código Modelo.

El valor de longitud característica ( $l_c$ ) utilizado en la presente investigación es de 12,5 cm, tanto para los modelos de losa y testigos, como para el ejercicio teórico que se desarrolla más adelante. Blanco et al. (2014) indican que los valores recomendados para este parámetro varían entre la mitad y el doble de la altura del elemento que se modele. A su vez, se indica en dicha investigación que la influencia de la modificación del parámetro no es notoria. Es así como trabajar con el valor indicado para  $l_c$  en todos los modelos resulta coherente.

El comportamiento sugerido por el Código para  $K = 1,0$  es de endurecimiento. Se reporta una relación lineal inicial entre tensión y deformaciones hasta que el material toma valores de deformación de 0,1 %. La primera fisura se genera a un valor de 0,1 % de deformación y 4,0 MPa de tensión. Entre los 0,1 y 4,0 % de deformación, se genera la propagación de fisuras. Por último, a partir del 4,0 % de deformación y 4,6 MPa de tensión, la deformación se localiza en la fisura principal y el elemento empieza a perder capacidad portante.

Interpretando las sugerencias de Blanco et al. (2014), de modo de obtener mejores resultados de los modelos computacionales, la ecuación constitutiva utilizada no se consideró únicamente hasta el quinto punto representado en la Figura 40 sino que se creó un último tramo. Este tramo consiste en un decaimiento

lineal de la relación, manteniendo la misma pendiente del tramo entre los dos últimos puntos graficados. De este modo, el último punto de la ecuación constitutiva utilizada es (35,6 ‰; 0,0).

## 5.2 Ensayo a la losa

La Figura 41 muestra la relación carga – flecha experimental para el ensayo a cada uno de los paños de losa. Se cuenta, además, con una ampliación de los primeros 10 mm de flecha para identificar el primer tramo de comportamiento. Ambas curvas tienen formas cualitativamente similares: un primer tramo elástico-lineal, seguido de un endurecimiento plástico hasta alcanzar la carga máxima y luego un ablandamiento hacia el final del ensayo.

En ambos paños el tramo lineal se mantiene hasta los 80 kN de carga aproximadamente, valor para la cual se identifica la formación de la primera fisura. Este resultado es lógico debido a que en esta primera etapa la matriz resistente es la de hormigón. Los ensayos se frenan para un valor de flecha en el centro del paño entre 2 y 3 veces mayor al desplazamiento en el pico. Para estos desplazamientos máximos, se mantiene una fuerza aproximada de 75 y 89 % de la fuerza máxima, para el paño 3 y 2 respectivamente. Esto muestra la gran ductilidad del elemento.

La diferencia en los resultados individuales se puede atribuir a diversos factores. Entre ellos se puede mencionar la distribución y orientación de fibras y errores experimentales. En particular, una importante diferencia se encuentra en el espesor de ambos paños. Si bien se proyectó un espesor de 13 cm, se comprobó experimentalmente que los espesores eran 12,5 y 13,9 cm para el paño 3 y 2 respectivamente.

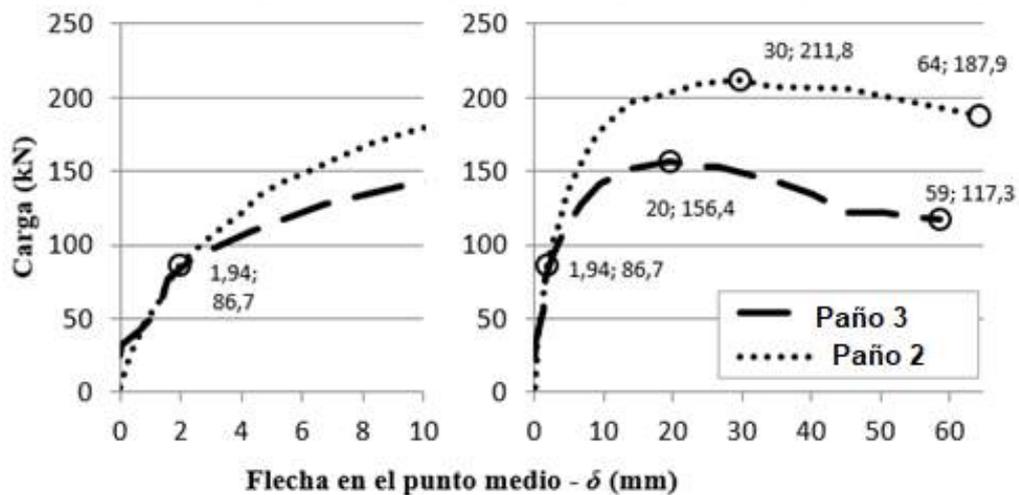


Figura 41 – Comparación de los resultados experimentales que surgen del ensayo a la losa.

La Figura 42 muestra los valores de flecha registrada y la fuerza asociada a la misma para el paño 2. La ampliación de la imagen se puede consultar en el Anexo “10.11. Curvas fuerza – flecha para el paño 2 de la losa”. Por otro lado, los resultados crudos se encuentran en el Anexo “10.6. Resultados de ensayo de losa – Paño 2”. Todas las curvas allí representadas coinciden cualitativamente. Para este paño, la primera fisura se registra para una carga de 90 kN (1000 psi de presión en el manómetro). La fuerza máxima a la cual se sometió la losa fue de 212 kN (2260 psi), siendo 30 mm el desplazamiento en el punto medio. Por su parte, el desplazamiento máximo, se registra allí para una carga de 188 kN (2000 psi) y toma un valor de 64 mm.

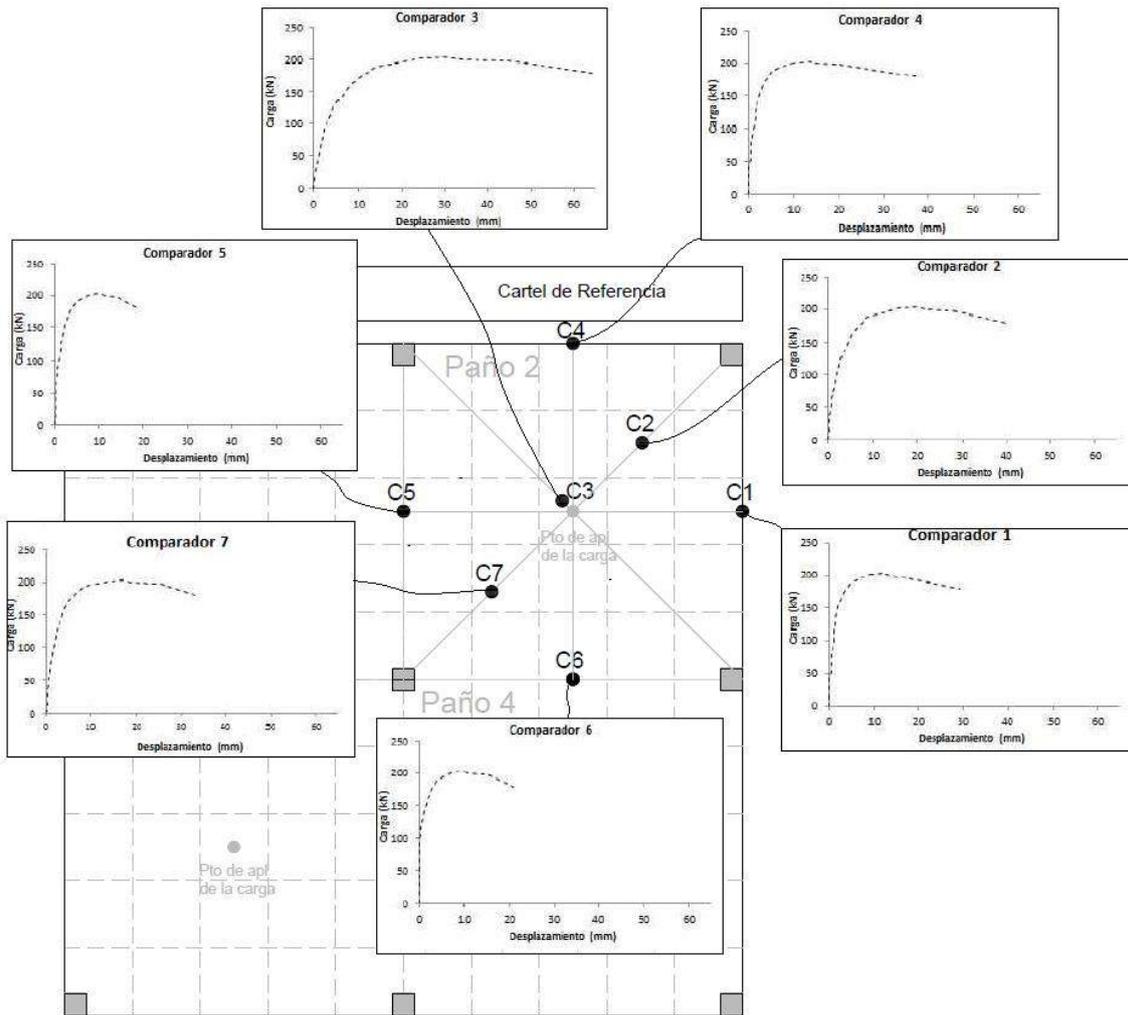


Figura 42 – Carga – flecha; ensayo losa; paño 2.

La Figura 43 muestra la comparación entre la flecha en el punto de aplicación de la carga con la misma en los demás puntos registrados. Los resultados son coherentes en relación a la continuidad de la losa ya que se identifica que el comportamiento de las parejas de comparadores 1-4 y 5-6 son efectivamente similares, el comparador 2 es el que registra mayor desplazamiento, seguido por el número 7 y todos cuentan con un primer tramo lineal que se asocia al comportamiento elástico-lineal del elemento.

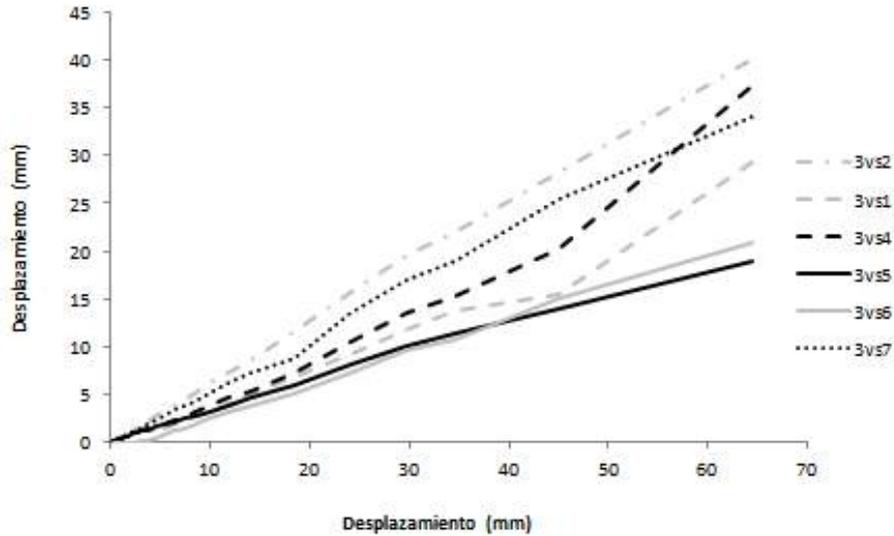


Figura 43 – Desplazamiento de puntos notables respecto al punto medio.

El ensayo del paño 3 cuenta con las siguientes características: la aparición de la primera fisura se dio para una carga de 109 kN (1400 psi), la fuerza máxima a la que fue sometida la losa es de 156 kN con un desplazamiento máximo de 20 mm en el punto medio, el desplazamiento máximo en este paño fue de 59 mm asociado a una carga de 117 kN. El análisis particular es similar al del paño 2 y se puede realizar consultando la información en el Anexo “10.5. Resultados de ensayo de losa – Paño 3”.

### 5.3 Patrón de fisuración

La generación de las fisuras fue paulatina, incrementándose en longitud y espesor en cada escalón. La Figura 44 muestra el patrón de fisuras en la cara inferior de la losa. Las fisuras se disponen de forma radial y las principales se diferencian de las secundarias por su apertura (se representan con un grosor más grande). Las principales son aquellas que parten del punto de aplicación de la carga hacia el centro de los bordes que delimitan el paño, son las que toman esfuerzos mayores y controlan el comportamiento del elemento estructural. Las secundarias son las demás fisuras que se identifican y evidencian la capacidad de redistribución del elemento estructural. La Figura 45 muestra la parte inferior de la losa debajo de ambos puntos de introducción de cargas, allí se puede identificar claramente las mencionadas fisuras principales.

La Figura 46, por su parte, muestra el patrón de fisuración para la cara superior de la losa. Además de las fisuras asociadas a los ensayos, se pueden identificar fisuras de retracción, asociadas a la demora en iniciar el curado de la losa, y el reflejo de las fisuras principales de la cara inferior. Se identifica que se trata de fisuras de forma circular que envuelven el paño ensayado, tomando como centro el punto de aplicación de las cargas y radio la distancia a los pilares que delimitan el paño. Ninguna de ellas se diferencia en espesor de las demás. Esto coincide con lo reportado por Salehian y Barros (2014).

## Cartel de Referencia

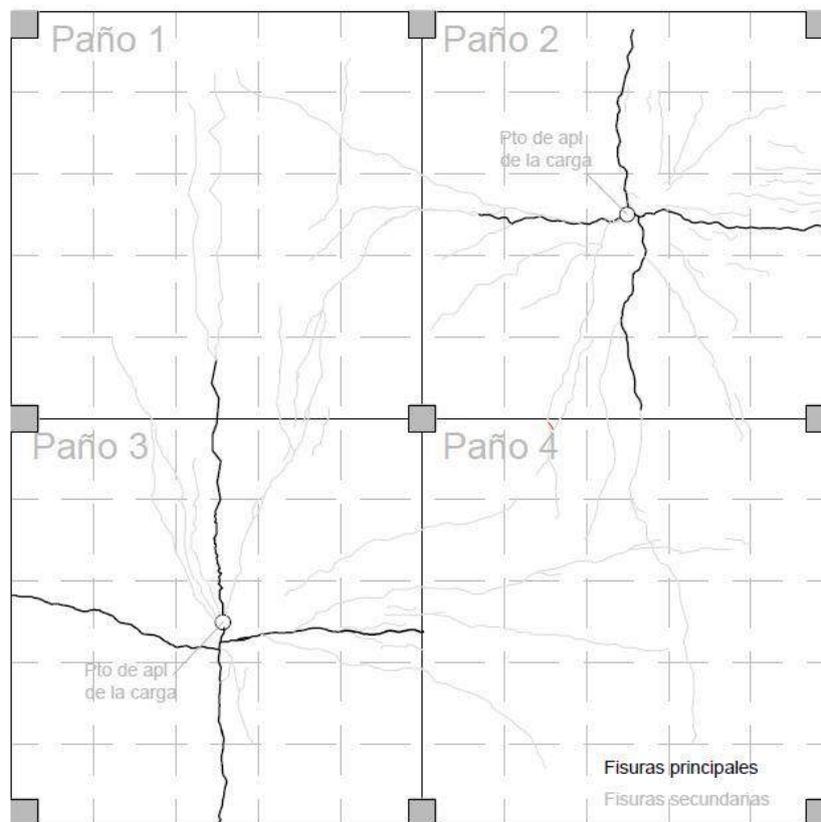


Figura 44 – Patrón de fisuras en la cara inferior de la losa.

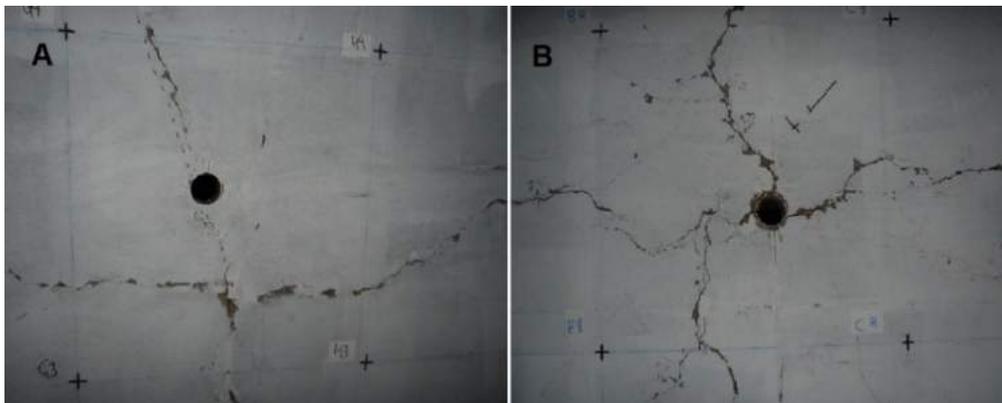


Figura 45 – Fisuras en el punto de aplicación de la carga. Paño inferior de la losa.

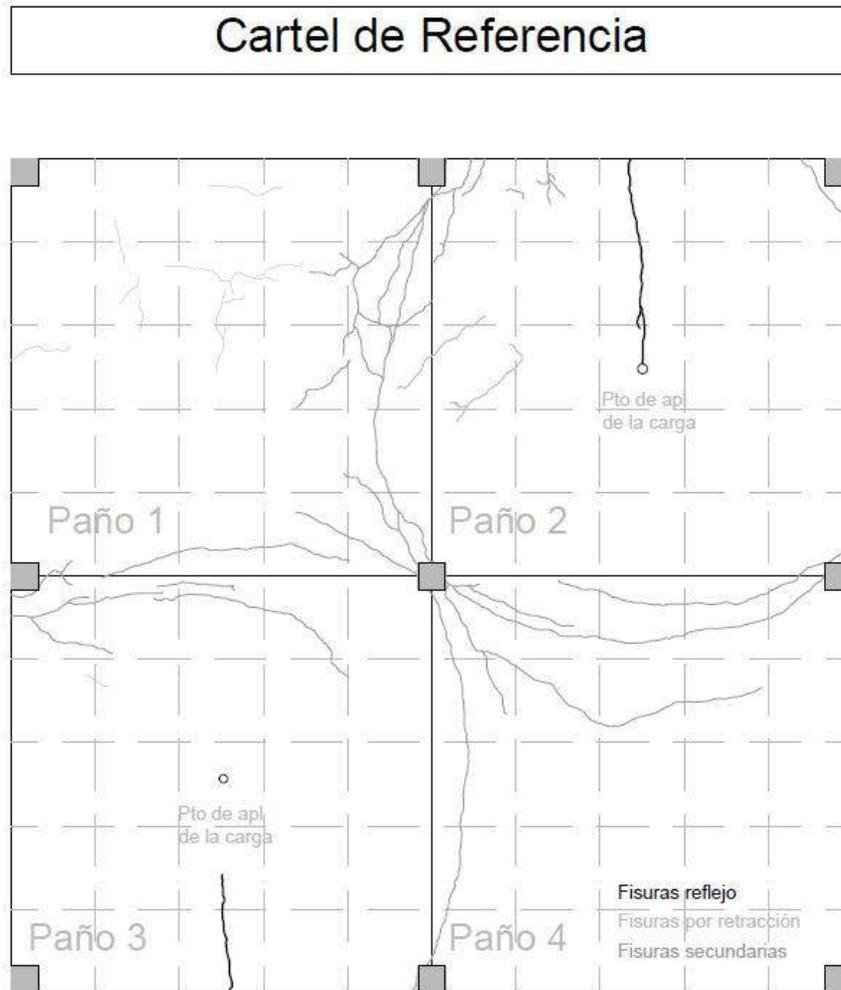


Figura 46 – Patrón de fisuras en la cara superior de la losa.

## 5.4 Geometría de los Testigos

En el Anexo “10.8. Dimensiones de los testigos” se presentan las dimensiones de los testigos extraídos de la losa. A partir de esta información, se genera la Tabla 9. Allí se presentan el promedio de cada una de las dimensiones ( $l_p$  corresponde al largo promedio,  $b_p$  el ancho y  $e_p$  el espesor). A su vez, se presenta el coeficiente de variación (CV) de cada una de las dimensiones.

Tabla 9 – Geometría de los testigos.

Paño	$l_p$ (cm)	CV (%)	$b_p$ (cm)	CV (%)	$e_p$ (cm)	CV (%)
1	59,7	0,6%	14,9	2,9%	13,9	1,0%
4	61,1	1,3%	15,0	1,1%	12,5	1,6%

Del análisis de los CV surge que el procedimiento de extracción permitió obtener piezas adecuadas respecto a lo proyectado. Por otro lado, se debe puntualizar que los valores de espesor muestran una diferencia considerable entre testigos de los distintos paños.

La Tabla 9 muestra dos geometrías, que representan las cuatro de la investigación ya que los testigos ensayados a *momento medio* se colocan de canto. En el análisis posterior se trabaja diferenciando los

testigos en tres de ellas, considerando la altura de estos como el parámetro determinante (se considera que los testigos ensayados de canto cuentan con la misma geometría a pesar de su diferencia en ancho).

### 5.5 Distribución de las Fibras

En la Tabla 10 se muestra el resultado del estudio estadístico de la distribución de fibras en el espesor. Allí se trabaja con cinco discriminaciones distintas. Para cada subgrupo se presenta la cantidad de cuadrados considerados (N), la cantidad promedio de fibras contadas (Avg) y la desviación estándar asociada (St Dev). Para estas últimas dos, se presenta el dato en cantidad de fibras por cm<sup>2</sup>. Las cinco discriminaciones con las que se trabaja se presentan en la Sección “3.7.3. Determinación de la concentración de fibras mediante ANOVA”.

El resultado más importante es que existe una diferencia estadísticamente significativa entre la cantidad de fibras de la franja superior y la media, la superior y la inferior y la media y la inferior. Se identifica que la franja superior es la que contiene menor cantidad de fibras, la media le sigue en cantidad y la inferior es la que contiene mayor cantidad.

Tabla 10 – Distribución de fibras en el espesor de la losa.

Franja	Global			Positivo			Negativo			Medio		
	N	Avg (n/cm <sup>2</sup> )	St Dev (n/cm <sup>2</sup> )	N	Avg (n/cm <sup>2</sup> )	St Dev (n/cm <sup>2</sup> )	N	Avg (n/cm <sup>2</sup> )	St Dev (n/cm <sup>2</sup> )	N	Avg (n/cm <sup>2</sup> )	St Dev (n/cm <sup>2</sup> )
Superior	288	0,8	0,4	96	0,7	0,4	96	0,8	0,4	96	0,8	0,3
Media	288	1,0	0,4	96	1,0	0,4	96	1,0	0,4	96	1,0	0,4
Inferior	288	1,2	0,4	96	1,2	0,4	96	1,2	0,5	96	1,2	0,4

Franja	Paño 1			Paño 4			Paralelos			Perpendiculares		
	N	Avg (n/cm <sup>2</sup> )	St Dev (n/cm <sup>2</sup> )	N	Avg (n/cm <sup>2</sup> )	St Dev (n/cm <sup>2</sup> )	N	Avg (n/cm <sup>2</sup> )	St Dev (n/cm <sup>2</sup> )	N	Avg (n/cm <sup>2</sup> )	St Dev (n/cm <sup>2</sup> )
Superior	144	0,8	0,4	144	0,8	0,3	144	0,7	0,4	144	0,8	0,3
Media	144	1,1	0,4	144	0,9	0,4	144	1,0	0,4	144	1,0	0,4
Inferior	144	1,3	0,4	144	1,2	0,5	144	1,2	0,4	144	1,2	0,4

Franja	Subgrupo 1			Subgrupo 2			Subgrupo 3			Subgrupo 4		
	N	Avg (n/cm <sup>2</sup> )	St Dev (n/cm <sup>2</sup> )	N	Avg (n/cm <sup>2</sup> )	St Dev (n/cm <sup>2</sup> )	N	Avg (n/cm <sup>2</sup> )	St Dev (n/cm <sup>2</sup> )	N	Avg (n/cm <sup>2</sup> )	St Dev (n/cm <sup>2</sup> )
Superior	72	0,7	0,4	72	0,9	0,4	72	0,7	0,3	72	0,8	0,3
Media	72	1,0	0,4	72	1,2	0,3	72	1,0	0,3	72	0,9	0,4
Inferior	72	1,3	0,4	72	1,2	0,4	72	1,2	0,7	72	1,2	0,4

Del caso particular de la discriminación por subgrupos dentro de cada paño surge que para el subgrupo 2 no se identifica diferencia estadísticamente significativa de la cantidad de fibras entre la franja media y la inferior, mientras que para el subgrupo 4, no se registra la mencionada diferencia entre las franjas superior y media. En todo el resto de los casos, la diferencia sí es estadísticamente significativa. Es claro que, cuando se

trabaja con menor cantidad de valores dentro de un subgrupo, hay una tendencia creciente a encontrar diferencias no significativas entre los grupos.

De modo de complementar la información brindada, se trabajó con la distribución de cada uno de los testigos en particular. La información recabada se muestra en la Tabla 11. Allí se indica para cada testigo si existe entre sus franjas diferencia estadísticamente significativa de cantidad de fibras. Las filas *S vs M*, *S vs I* y *M vs I*, comparan la cantidad de fibras entre franja superior y media, superior e inferior y media e inferior, respectivamente. Aquellas casillas que aparecen sombreadas identifican casos en que las cantidades cuentan con diferencias estadísticamente significativas.

Se muestra así que trabajar con los testigos individuales altera considerablemente los resultados de las poblaciones grandes. Solamente en dos de los testigos se puede identificar diferencia estadísticamente significativa entre los tres grupos. De todos modos, la hipótesis de que las fibras tienden a alojarse en la franja inferior es respaldada por el hecho de que el Testigo 7 es el único que no presenta diferencia entre las franjas superior e inferior. En este caso particular, se cuenta con promedios de 0,77, 0,95, 0,97 fibras por cm<sup>2</sup> en cada franja, asociados a desviaciones estándar de 0,26, 0,32 y 0,50.

Tabla 11 – Resultado del estudio estadístico para cada testigo.

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12
S vs M												
S vs I												
M vs I												

La totalidad de los resultados de los Test realizados se encuentran en el Anexo “10.7. Resultados del test ANOVA”.

### 5.6 Ensayo Inductivo

La Figura 47 muestra la evolución de la inductancia en el largo de los testigos analizados. En la Figura 47a se representa con trazos punteados los resultados individuales y con trazo continuo y color negro el promedio de todas las lecturas. A su vez, con trazo continuo y color gris, se representan los resultados individuales extremos. En la Figura 47b se incluye con trazos punteados (color negro y gris oscuro) los resultados del Ensayo realizado para el “testigo” de espuma plast. Por otro lado, en el Anexo “10.9. Resultados del ensayo Inductivo” se presentan la totalidad de los resultados.

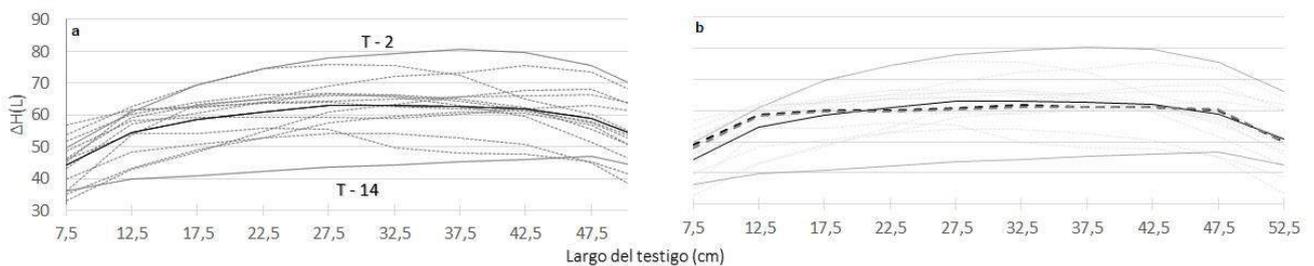


Figura 47 – Inductancia en el largo de los testigos.

Analizando la Figura 47 es claro que, en la mayoría de los casos, el valor máximo de inductancia se da en el centro de los testigos. Este valor es el utilizado para comparar con los demás parámetros que influyen en el comportamiento de los testigos por ser allí donde se ubica la sección de rotura. Además, la comparación con el patrón muestra que las lecturas deberían ser tales que disminuyen en los extremos y constantes en el resto de las secciones. El promedio de lecturas para testigos muestra esta misma tendencia, pero si se

considera los testigos individuales, se identifica que, para ellos, la distribución no es homogénea en el largo; dispersión testigo a testigo.

## 5.7 Ensayo de Flexión

### 5.7.1 Relación fuerza – flecha

En la Figura 48 se muestra el comportamiento de los testigos frente a la carga aplicada, a su vez, se presentan los primeros 0,1 mm de flecha de modo de cuantificar el comportamiento inicial. En particular se muestra la relación existente entre la carga aplicada por el pistón con respecto a la flecha desarrollada en el punto medio (representada como el promedio de las lecturas de ambos comparadores - 4 y 5 – Ver Figura 36). Las curvas que representan testigos ensayados con distintos sentidos se diferencian por tramas. A su vez, se distingue con color negro los testigos que fueron ensayados con el sistema de medición alternativo (ver Sección “3.8. Ensayo de Flexión”).

El comportamiento de todos los testigos es cualitativamente similar, estos cuentan con un primer tramo elástico-lineal hasta la primera fisura, luego experimentan un tramo de endurecimiento (“hardening”) hasta la carga máxima y, por último, pierden rigidez hacia el final del ensayo. Dicho comportamiento es muy similar al de las probetas llenadas a pie de losa (ver Sección “5.1. Ensayo de flexión normalizado - Probetas llenadas a pie de losa”).

La variabilidad aumenta al trabajar con testigos respecto al trabajo con probetas, esto se asocia al hecho de contar con geometrías diferentes. A su vez, la falta de entalla también podría influir en este aspecto. Se puede decir que, al no contar con esta, los testigos van a “elegir” fisurar en la sección más débil. Por el contrario, la sección de fisuración de las probetas está predeterminada. De modo de representar la diferencia que se registra de los ensayos a los testigos respecto de las probetas, en el Anexo “10.10. Generación y propagación de fisuras en el ensayo a flexión” se muestra la fisura principal de cada testigo cuando se vuelve aparente y en el final del ensayo. Allí se puede ver como la ubicación de la fisura principal es distinta en cada uno de los testigos.

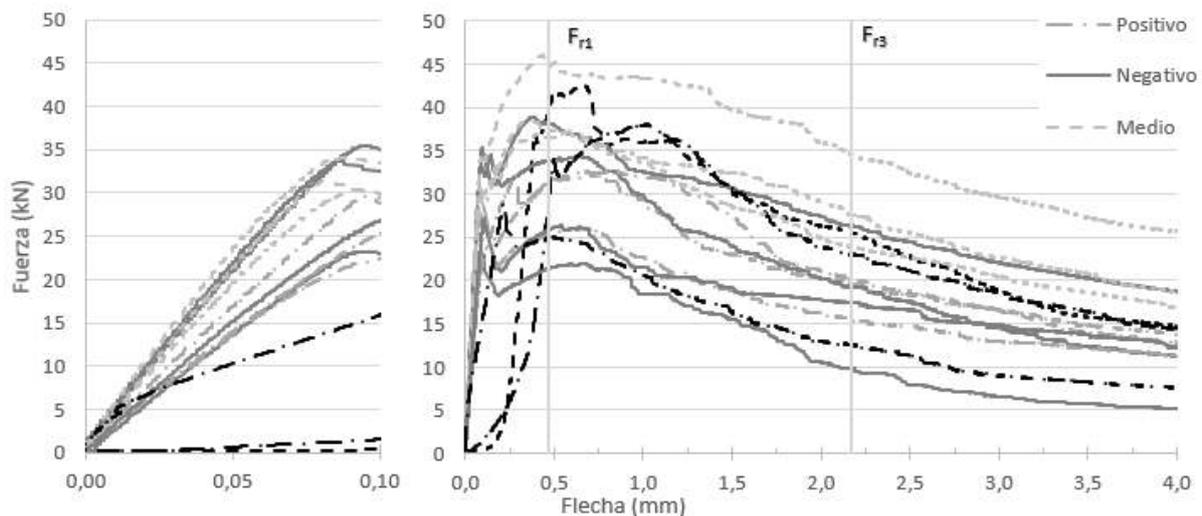


Figura 48 – Fuerza – flecha; ensayo de flexión en testigos (Testigos 2, 5 y 14 se identifican con color negro).

Los testigos que toman mayores cargas son los ensayados de canto, es decir, los testigos que muestran el comportamiento frente al momento medio (Ver Sección “3.8. Ensayo de Flexión”); esto se debe a que son los que tienen mayor espesor ( $h = 15$  cm).

Los Testigos 2, 5 y 14 (identificados con color negro) no cuentan con un primer tramo lineal debido a que inicialmente se da un acomodamiento de su sistema de medición (Ver Sección “3.8. Ensayo de Flexión”).

Posterior a esto, el comportamiento pasa a ser el usual y las curvas de todos los testigos al superar la barrera del  $F_{R3}$  son similares.

### 5.7.2 Relación flecha – apertura de fisuras

En la Figura 49 se muestra la relación entre la flecha en el punto medio y la suma de desplazamientos longitudinales. Allí se discriminan los casos ensayados con ambos sistemas de medición (negro y punteado) corresponde al sistema de la Figura 35c – ver Sección “3.8. Ensayo de Flexión”). La Figura 49a corresponde a una ampliación de la relación en los primeros 0,4 mm.

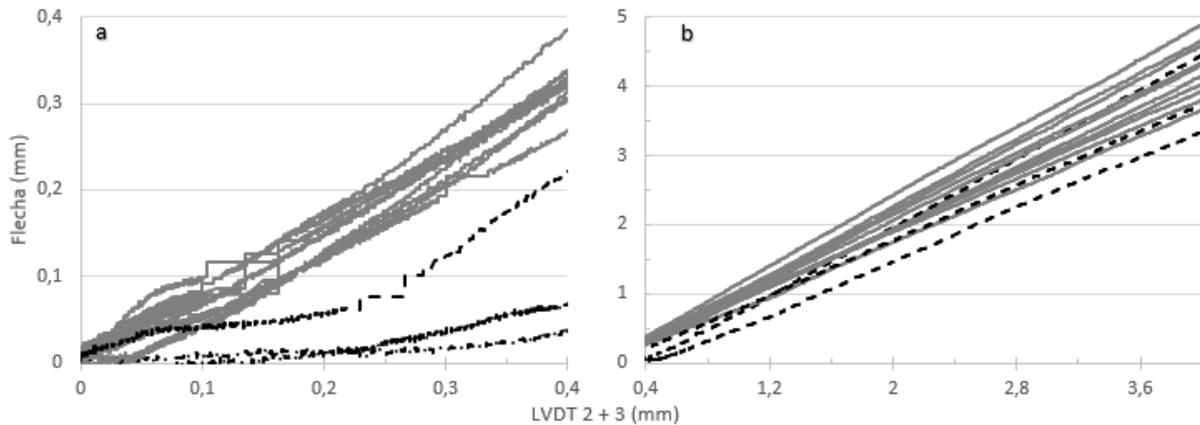


Figura 49 – Flecha – suma de desplazamientos longitudinales; testigos ensayados a flexión.

El comportamiento representado se diferencia en pre y post-fisuración. En una primera instancia, las variables muestran una tendencia parabólica que posterior a la fisuración se transforma en una relación lineal. Para esta se identifica una interpolación con valor de  $R^2$  superior a 0,9996 en todos los casos. Esto prueba que, luego de generada la fisura principal, las variables flecha y suma de desplazamientos longitudinales muestran una relación lineal entre ellas. A partir de aquí se considera a la suma de desplazamientos longitudinales como la apertura de la fisura principal.

La relación probada entre ambas variables es respaldada por los videos generados en el momento en que se ensayaron los testigos. En dichas piezas audiovisuales se identifica como se extiende la fisura principal y no se aprecia a simple vista ensanchamiento de fisuras auxiliares. Se puede consultar dicha afirmación en el Anexo “10.10 Generación y propagación de fisuras en el ensayo a flexión”.

Un caso particular se da para los testigos ensayados con el sistema de medición alternativo, para estos la Figura 49 muestra inicialmente el aplastamiento de la chapa adicional y luego el comportamiento se normaliza imitando al de los demás testigos. Esto valida aplicar el mismo concepto a todos los testigos: la suma de desplazamientos longitudinales equivale a la apertura de la fisura principal.

#### **Corrección de las curvas para testigos ensayados con sistema de medición alternativo**

De modo de homogeneizar los resultados obtenidos, se procedió a la corrección de las curvas fuerza – flecha de los testigos 2 y 5, ya que la influencia del sistema de medición alternativo en sus curvas no es despreciable. El procedimiento es distinto para cada uno de los testigos. Comenzando por el testigo 2, se utiliza la curva del testigo 6 como patrón (dado a que se ensayan en el mismo sentido y cuentan con la misma geometría). Se identificó que, para un valor de 5 kN de fuerza, la flecha en T2 es 0,23 mm, mientras que para T6 es de 0,008 mm. Este valor de carga se determinó por ser el asociado al inicio del comportamiento lineal para el testigo 2. La corrección consistió entonces en modificar el valor de flecha, de modo que a todos los valores correspondiente al T2 se le restó 0,222 mm. Por otro lado, para el testigo 5, fue el número 1 el que se consideró como patrón. En este otro caso, se identificó para una carga de 20 kN (inicio del comportamiento lineal para T5) una flecha de 0,418 mm en T5 y una de 0,06 en T1. Así se definió restar 0,358 mm a los valores de flecha del testigo 5.

### 5.7.3 Relación tensión – apertura de fisuras

De modo de contrarrestar las diferencias en geometrías de un testigo con el siguiente y poder realizar un estudio a nivel del material, se transformó los resultados de fuerza en función de flecha en resultados de tensión residual en función de apertura de fisuras. La intención de la transformación indicada es compensar la mayor resistencia exhibida por los testigos ensayados de canto en la gráfica de la Figura 48. Así se obtiene la Figura 50 que muestra la relación entre la tensión residual, calculada como se indica en la Sección “2.1.2 Comportamiento a tracción” (Ecuación (1)) y la apertura de fisuras. Esta es la relación que más se aproxima a lo estipulado por la EN 14.651 [17]. A su vez, se trabaja con una ampliación de la relación para los primeros 0,15 mm de apertura de fisura. La figura muestra que los testigos ensayados de canto siguen siendo los que toman mayores tensiones. Por otro lado, es posible identificar la gran variabilidad asociada al inicio del ensayo debido al acomodamiento de todo el sistema de carga y medición.

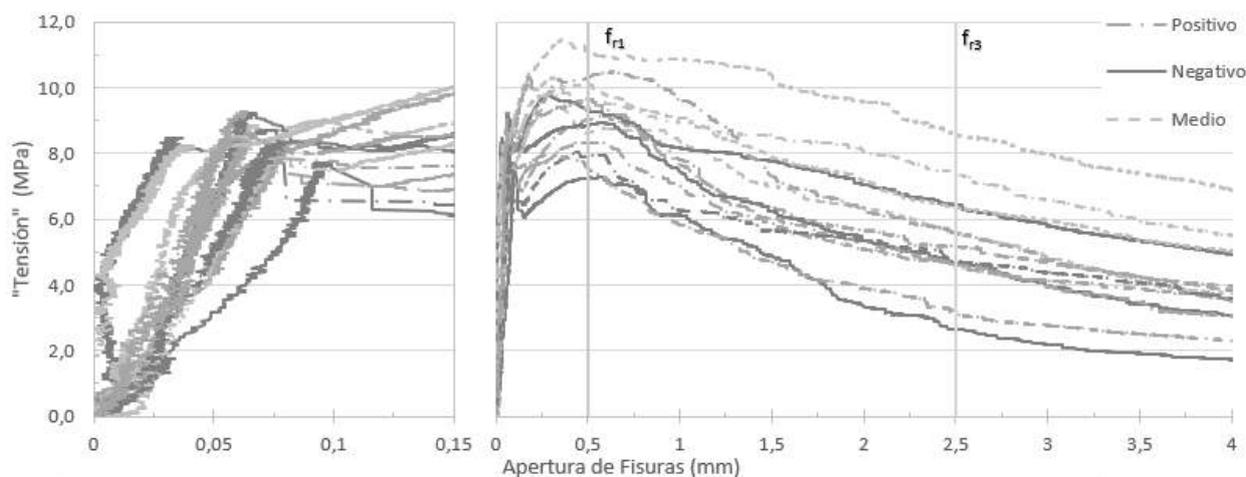


Figura 50 – Tensión – Apertura de fisuras; ensayo de flexión a testigos.

### 5.7.4 Comportamiento en función de la altura de los testigos

La Figura 51 muestra la relación fuerza – apertura de fisuras; en ella se discrimina según la altura de los testigos que se considera. La elección de tonos y trazos coincide con la de la Figura 50.

En primer lugar, el efecto de la altura en la capacidad de tomar carga es marcada, aumentando de izquierda a derecha. Por otro lado, utilizando las líneas auxiliares de fuerzas ( $F_{r1}$  y  $F_{r3}$ ) se puede identificar que un buen comportamiento en servicio (asociado a  $F_{r1}$ ) no garantiza lo mismo para el Estado Límite Último (asociado a  $F_{r3}$ ); y viceversa. Si se trabaja con la pendiente del tramo comprendido entre las tensiones  $f_{r1}$  y  $f_{r3}$  de los gráficos a b y c de la Figura 51, los testigos ensayados de canto son los que cuentan con un decaimiento promedio más suave. Los valores de pendiente son -1,83, -1,54 y -1,13 para los subgrupos de arriba a abajo en la Figura 51.

La Tabla 12 muestra el valor promedio, la desviación estándar y el coeficiente CV de los parámetros  $f_{r1}$  y  $f_{r3}$  para la totalidad de los resultados y para la discriminación por alturas. Trabajando con la totalidad de los resultados, la dispersión es mayor al 20% reportado en la bibliografía para el ensayo a tres puntos con entalla [17] [21]. Al discriminar por alturas, disminuye la dispersión, salvo por los testigos de  $h = 12,5$ .

Tabla 12 – Dispersión asociada al ensayo de flexión realizado.

	Global			h = 12,5 cm			h = 13,9 cm			h = 15,0 cm		
	Avg (MPa)	St. Dev (MPa)	CV	Avg (MPa)	St. Dev (MPa)	CV	Avg (MPa)	St. Dev (MPa)	CV	Avg (MPa)	St. Dev (MPa)	CV
$f_{r1}$	9,0	1,1	12%	8,3	1,2	15%	9,2	0,3	4%	9,8	1,0	11%
$f_{r3}$	5,8	1,6	28%	4,6	1,2	26%	5,6	0,8	15%	7,5	1,4	18%

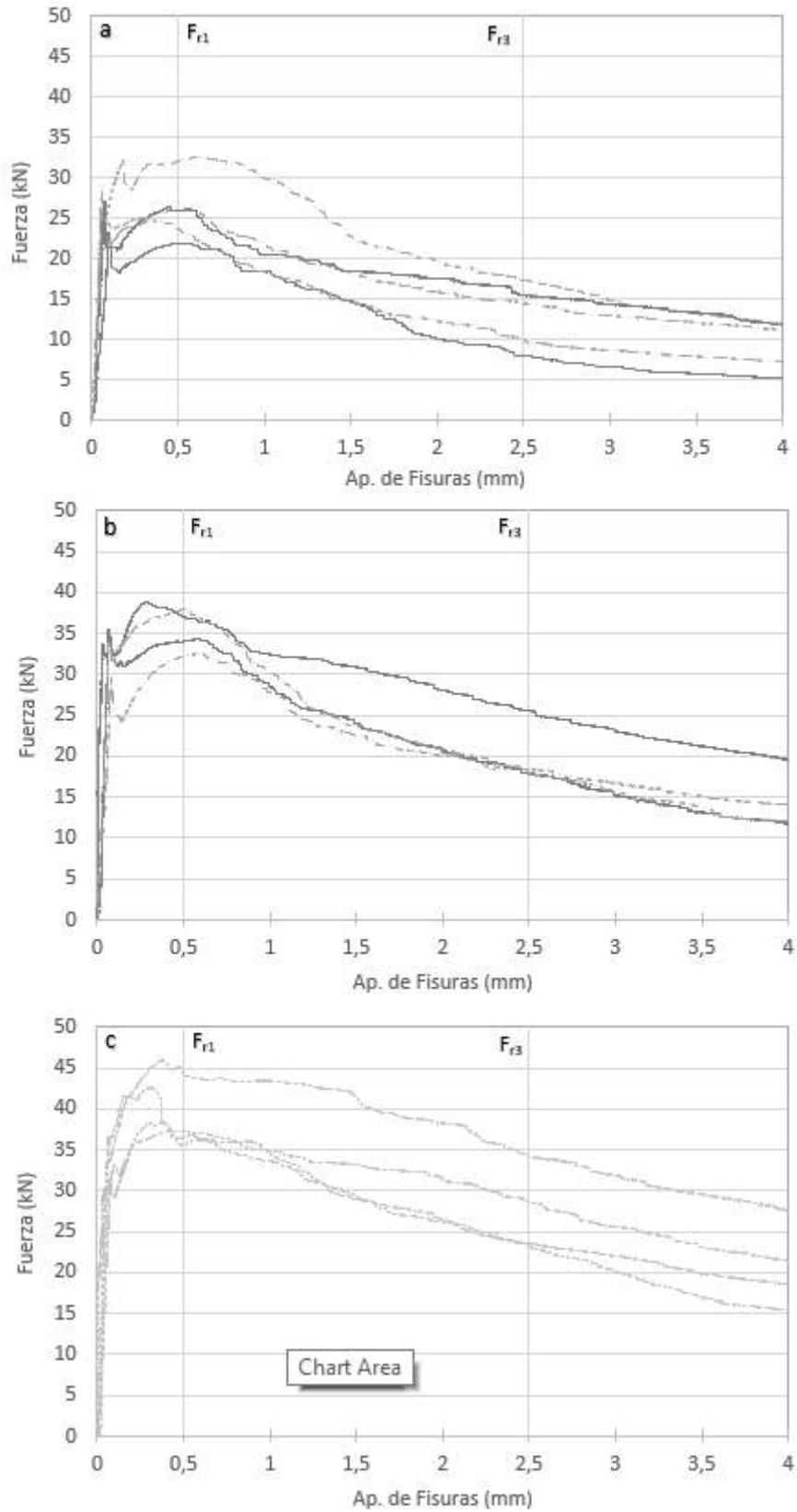


Figura 51 – Fuerza – apertura de fisuras; a)  $h = 12,5$  cm; b)  $h = 13,9$  cm; c)  $h = 15,0$  cm.

En particular, las primeras dos gráficas (a y b de la Figura 51) no muestran un comportamiento diferenciado entre los testigos ensayados a momento positivo y negativo (curvas toman valores similares). Esto muestra que el efecto de la concentración de fibras en las franjas inferiores no tiene una gran influencia en el comportamiento a flexión de testigos.

## 5.8 Ensayo Flexión vs Ensayo Inductivo

La Figura 52 muestra la relación que se registra entre el valor de tensión residual, representado por el parámetro  $f_{r3}$ , y la cantidad de fibras en la sección media, representada por la inductancia. Se eligió esta sección ya que se considera que el valor que toma la inductancia allí se asocia a la cantidad de fibras orientadas en la dirección longitudinal del testigo que cumplen un rol resistente en flexión. Considerando el resultado para todos los testigos (Figura 52a), se obtiene una recta de correlación lineal asociada a un  $R^2$  de 0,51 que muestra que si bien el parámetro de correlación no es del todo bueno, la tendencia marcada es a una relación lineal creciente entre las variables, es decir, a mayor valor de inductancia, los testigos toman tensiones más grandes. La Figura 52b muestra para los testigos ensayados a momento positivo y negativo, una mejora en el parámetro de interpolación. A su vez, ambos  $R^2$  toman un valor similar. El caso particular de los testigos ensayados de canto (*momento medio*) muestra que la pareja de valores que representa el comportamiento del testigo 2 se aleja considerablemente de la línea de tendencia, de modo que la pendiente resulta negativa. De este estudio no es posible determinar relaciones distintas para cada uno de los sentidos en que se ensayan los testigos.

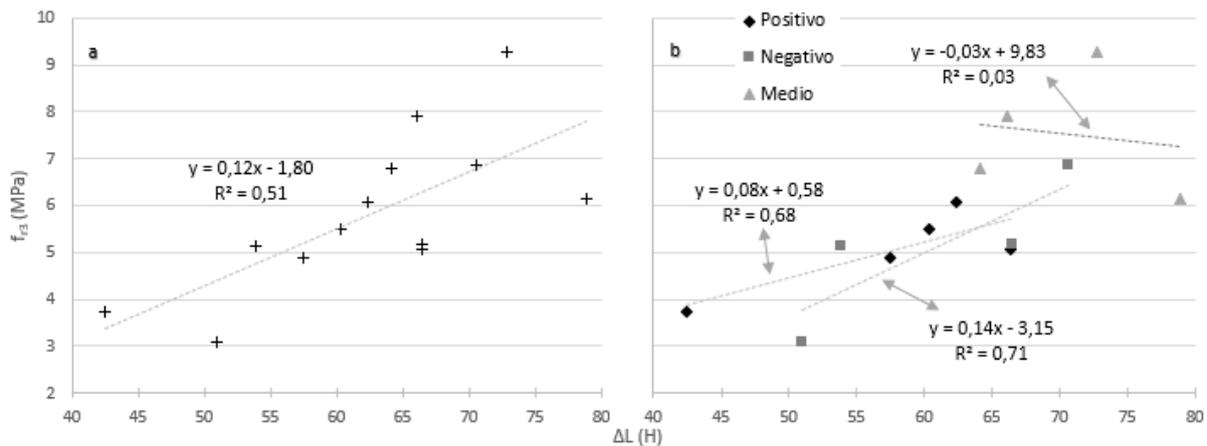


Figura 52 – Tensión residual – cantidad de fibras; Ensayo Inductivo.

## 5.9 Conteo de las fibras en la sección de rotura

La cantidad promedio de fibras contadas en la sección de rotura ( $1,14 \text{ fibras/cm}^2$ ;  $\text{CV} = 10,7 \%$ ) es muy similar a la que surge del conteo global ( $1,13 \text{ fibras/cm}^2$ ;  $\text{CV} = 8,4 \%$ ). El ensayo a flexión ejecutado tiene la particularidad de prescindir de entalla (los testigos rompen por la sección más débil) y evaluar comportamientos distintos, al cambiar el sentido de ensayo. En cambio, el conteo global se realizó para secciones arbitrarias. Esta diferencia hace que el resultado presentado no tenga una interpretación directa.

El estudio estadístico para el conteo en la sección de rotura arroja que existe diferencia significativa entre la cantidad de fibras de la franja superior, con la cantidad en la franja media ( $p\text{-valor} = 0,0453$ ) y con la cantidad de fibras en la franja inferior ( $p\text{-valor} = 0,0051$ ). Respecto a la comparación entre la franja media y la inferior, la diferencia no es significativa ( $p\text{-valor} = 0,7151$ ). Esta distinción con el conteo global, para el que existía diferencia significativa entre todas las franjas, se puede asociar a las características del ensayo de flexión realizado, en la medida que se considera en ambos casos secciones con naturalezas distintas (secciones arbitrarias contra secciones de rotura).

La Tabla 13 muestra la cantidad de fibras promedio para cada una de las tres franjas consideradas; para el conteo global se consideraron ocho valores por testigos (tres asociados a cada área lateral y uno asociado a cada cara pequeña), mientras que para el conteo en la sección de rotura se consideró únicamente un valor de franja por testigo. Tal como se indicó previamente, la falta de entalla determina que la sección de rotura será la más débil y esto se materializa en el resultado de los testigos ensayados a momento positivo, ya que el promedio de fibras en la sección de rotura para la *franja crítica* (la franja más traccionada, en este caso es la inferior) disminuye considerablemente y aumenta el promedio de la franja menos traccionada (superior). No se repite el mismo resultado para los testigos ensayados a momento negativo; se sugiere que en este caso trabajando con una cantidad mayor de franjas se podría mejorar el resultado ya que las fibras de las franjas superiores tienden a alojarse más cercanas a la franja media que al borde superior de la losa.

Tabla 13 – Promedio de fibras por franja.

	Global			Momento Positivo			Momento Negativo		
	Avg (fibras/cm <sup>2</sup> )	St Dev. (fibras/cm <sup>2</sup> )	CV (%)	Avg (fibras/cm <sup>2</sup> )	St Dev. (fibras/cm <sup>2</sup> )	CV (%)	Avg (fibras/cm <sup>2</sup> )	St Dev. (fibras/cm <sup>2</sup> )	CV (%)
<b>Sup.</b>	0,87	0,33	37,8	0,97	0,19	19,6	0,93	0,20	21,4
<b>Med.</b>	1,14	0,34	30,1	1,10	0,29	26,0	1,12	0,36	31,7
<b>Inf.</b>	1,38	0,39	28,2	1,20	0,19	15,7	1,37	0,37	27,1

De los resultados particulares, el caso del testigo 14 (ver Anexo “10.2.4. Resultado del conteo en sección de rotura”) es el que llama más la atención, dado a que cuenta con una cantidad de fibras muy por debajo de la media (0,83 fibras/cm<sup>2</sup>) lo cual se podría asociar al hecho de que durante el procedimiento de llenado de la losa (Figura 21) los operarios pasaron por dicho punto tres veces.

### 5.10 Ensayo de flexión vs conteo de fibras en la sección de rotura

La Figura 53 muestra la relación entre la tensión residual a tracción de los testigos y la cantidad de fibras que se cuentan en su sección de rotura. De izquierda a derecha se representa: la totalidad de las parejas obtenidas, los valores discriminados por el sentido de ensayo y los valores discriminados por la altura de los testigos. En todos los casos se representa a su vez la recta de interpolación lineal entre ambas variables y su correspondiente parámetro de validez, R<sup>2</sup>.

De la Figura 53a surge que el parámetro de correlación lineal entre ambas variables no es lo suficientemente cercano a 1 como para validar por completo la relación. De aquí surge que otros parámetros influyen en la misma, como son: el sentido de ensayo para cada testigo, las dimensiones de estos y la distribución de las fibras en la sección de rotura. De todos modos, comparando con el R<sup>2</sup> que surge de la Sección “5.8. Ensayo Flexión vs Ensayo Inductivo”, se identifica para este caso, una mejora (0,60 contra 0,51).

En la Figura 53b se tiene en cuenta la influencia del sentido de ensayo. Trabajando con esta discriminación se obtienen parámetros de interpolación mayores a los del caso anterior, incluso el valor de R<sup>2</sup> para los testigos ensayados de canto e invertidos (*momento medio* y *negativo*, respectivamente) es lo suficientemente cercano a 1 como para validar la relación lineal entre ambas variables. Respecto al valor de R<sup>2</sup> que se obtiene para los testigos ensayados a momento positivo, el mismo muestra que los demás parámetros deben ser lo que influyan de forma más significativa en esta relación.

Por último, la Figura 53c elimina la influencia de la geometría. Nuevamente se identifica para los testigos ensayados de canto (*momento medio*, h = 15,0 cm, Paño 1 y 4), una marcada tendencia lineal-creciente. Respecto a los testigos ensayados a *momento positivo* y *negativo*, combinarlos por tratarse de la misma

altura, mezclando testigos ensayados en ambos sentidos, va en detrimento del valor de  $R^2$  que se obtiene. Se identifica de esta manera, que la discriminación propuesta en la Figura 53c no aporta nueva información y que la geometría de los testigos no influye de gran manera en la relación  $f_{r3}$  – cantidad de fibras.

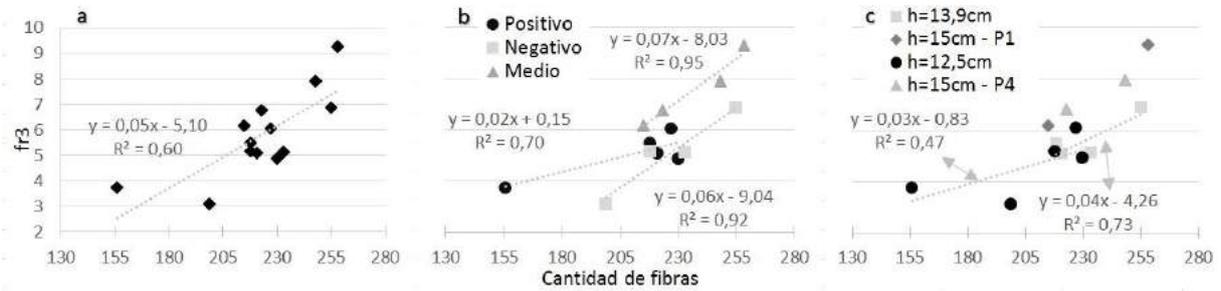


Figura 53 –  $f_{r3}$  – cantidad de fibras; a) global; b) por sentido de ensayo; c) por altura.

Para analizar la influencia de la distribución de fibras se realizan dos estudios complementarios, por un lado, se trabaja con la relación tensión – cantidad de fibras ponderadas y, por otro lado, se trabaja en la comparación de los comportamientos de testigos individuales.

La Figura 54 reporta la relación entre la tensión residual y la cantidad de fibras en la sección media ponderada por la ubicación que ellas adoptan en la sección de rotura (Ver Sección “3.7.5. Conteo de fibras en la sección de rotura”). De esta forma, se le da un mayor peso relativo a aquellas fibras que se encuentran más alejadas del borde superior de ensayo (este borde depende del sentido de ensayo). La figura muestra el comportamiento de todos los testigos juntos y la discriminación por sentidos de ensayo.

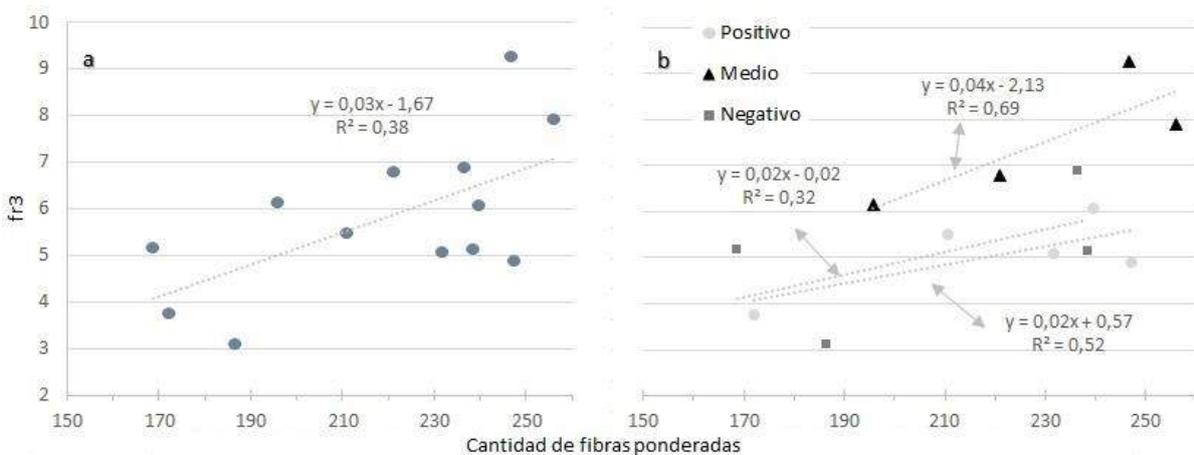


Figura 54 –  $f_{r3}$  – cantidad de fibras ponderadas; a) global; b) por sentido de ensayo.

En comparación con los resultados de la Figura 53, los que se obtienen en la Figura 54 son en todos los casos peores, desde el punto de vista de arribar a una relación lineal entre las variables ( $R^2$  más pequeño). Lo que se puede resaltar como positivo, es que esta nueva modalidad propone para los testigos ensayados a momento positivo, una pendiente más cercana a la del resto de los testigos.

Respecto a los casos particulares, el primero por analizar corresponde a los testigos 9 y 10. Ambos cuentan con la misma geometría, fueron ensayados a momento positivo y tienen un número de fibras muy similar (227 y 230 fibras respectivamente). De todos modos, su valor de  $f_{r3}$  es un tanto distinto, siendo 6,1 MPa el valor para el Testigo 9 y 4,9 MPa para el número 10. Su distribución de fibras es la siguiente:

- Testigo 9: 57, 94 y 76 fibras en las franjas superior, media e inferior respectivamente
- Testigo 10: 67, 70 y 93 fibras en las franjas superior, media e inferior respectivamente

Contrario a lo intuitivo, el testigo con mayor cantidad de fibras en la *franja crítica* no es el que toma la mayor tensión. Por otro lado, se trabaja con la comparación entre los Testigos 1 y 4, cuyo ensayo es distinto, se ensaya momento positivo y negativo respectivamente, pero tienen valores de  $f_{r3}$  similares: 5,5 y 5,1 MPa. En cuanto a la cantidad de fibras, los mismos cuentan con totales de 218 y 233 respectivamente y su distribución es:

- Testigo 1: 77, 75 y 66 fibras en las franjas superior, media e inferior respectivamente
- Testigo 4: 83, 75 y 75 fibras en las franjas superior, media e inferior respectivamente

Analizando los resultados, se identifica que la única diferencia entre la distribución de fibras en ambos testigos es la cantidad contada en la *franja crítica*. Contar únicamente con esa diferencia llevaría a decir que el Testigo 4 debería contar con mayor  $f_{r3}$ . Los resultados, sin embargo, muestran lo contrario. Ambos casos particulares muestran resultados contrarios a lo intuitivo. Algunas razones pueden ser: errores experimentales no identificados y la no consideración de longitudes de anclaje y ángulos de las fibras. Por otro lado, una mayor cantidad de franjas puede llevar a resultados más precisos, ya que puede ser que las fibras se pueden concentrar en alguno de los extremos de cada franja.

### 5.11 Cantidad de fibras - Conteo manual vs Ensayo Inductivo

La Figura 55 muestra la relación de cantidad de fibras medida por inductancia en la sección media y conteo manual en la sección de rotura, así como la recta de aproximación lineal. Analizando este resultado se puede identificar la relación lineal creciente entre ambas variables. De todos modos, el valor de  $R^2$  muestra que, de modo de generar una relación más precisa, se deben considerar factores externos, no incluidos a priori. El hecho de que el conteo considere una sección determinada y la inductancia represente a una región influye en el valor del parámetro  $R^2$ .

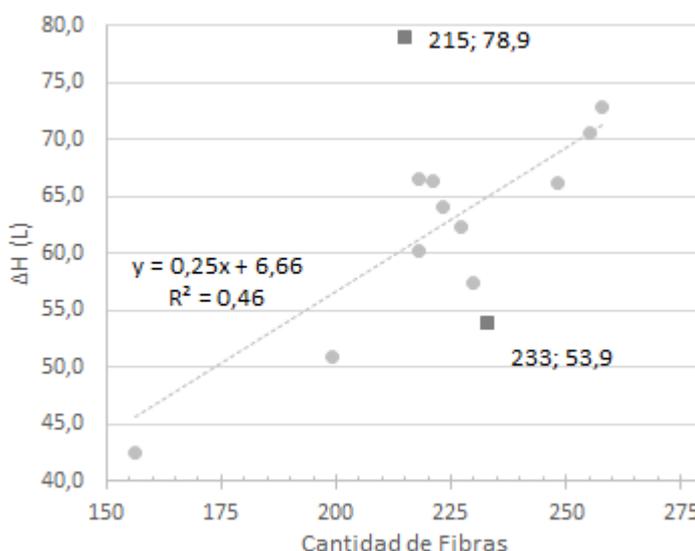


Figura 55 – Inductancia en sección media – conteo de fibras en sección de rotura.

Los testigos cuyas parejas se encuentran más alejadas de la línea de tendencia son el número 2 y 4 (resaltados en la Figura 55 en gris oscuro). En ambos casos, la razón por la que se alejan de la tendencia es opuesta; para el testigo 2, el valor de inductancia es muy elevado para la cantidad de fibras contadas y para el testigo 4, la cantidad de fibras sugiere una inductancia mayor que el que en realidad tiene.

La variación de valores de inductancia que se presenta en secciones previas (Ver Sección “5.6. Ensayo Inductivo” - Figura 47) muestra que el corrimiento de la fisura principal del centro del testigo no parece ser la razón que explica alguna de estas “anomalías”. Esto hace que el único parámetro que pueda explicar alguno

de estos resultados sea la forma de la fisura principal. De todos modos, ya que el testigo 2 cuenta con una forma similar a la de otros testigos y aquellos no muestran esta diferencia, se debe descartar esta razón. No se encontró en la presente investigación una razón por la cual los resultados individuales de los testigos 2 y 4 se alejan de la tendencia lineal.

## 5.12 Análisis de orientación de fibras

### 5.12.1 Resultados que surgen del conteo

La Tabla 14 muestra la cantidad de fibras por  $cm^2$  de superficie según las orientaciones establecidas en la Sección “3.7.6. Estudio de la orientación de las fibras”. En la Figura 56 se grafica el porcentaje de fibras según cada una de estas direcciones. En todos los casos, se trata de direcciones en el plano de la losa. En la presente investigación no se logró determinar la cantidad de fibras orientadas en la dirección perpendicular a la misma.

Tabla 14 – Cantidad de fibras por  $cm^2$ .

	Global	SG <sub>1</sub>	SG <sub>2</sub>	SG <sub>3</sub>	SG <sub>4</sub>
X <sub>G</sub>	1,15				
Y <sub>G</sub>	1,13				
d <sub>  </sub>		1,37	1,31	1,43	1,01
d <sub>⊥</sub>		1,04	1,09	0,98	1,25

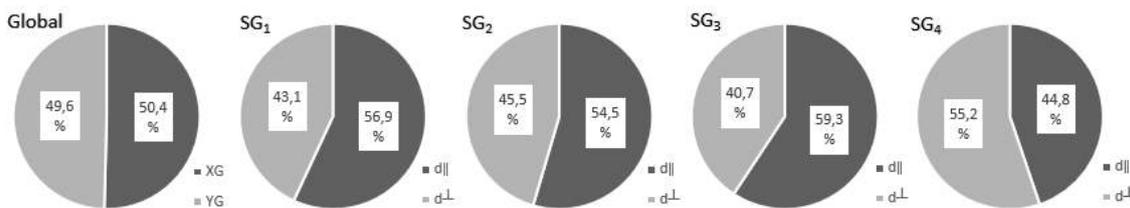


Figura 56 – Orientación de las fibras. Valores en porcentaje de la totalidad de fibras contadas.

Analizando los resultados se identifica que por cada  $cm^2$  de superficie se puede contar 1,14 fibras. Del análisis global surge que la cantidad de fibras orientadas según el eje x coincide con las orientadas según el eje y, por lo tanto, el procedimiento de llenado no genera orientaciones preferenciales en el plano de la losa.

El análisis por subgrupos muestra que los bordes influyen la orientación de las fibras, de modo que se cuentan mayor cantidad de fibras en las direcciones paralelas al borde más cercano. El único resultado que se aleja de esta proposición es el del SG<sub>4</sub>, esto se podría atribuir al procedimiento de llenado, ya que los operadores pasaron tres veces por esta región (Ver Sección “3.3. Hormigonado de elementos estructurales” - Figura 21). Trabajando con los resultados del análisis por subgrupos, se podría destacar que en los casos en que los testigos se encuentran más cercanos al borde, la influencia de este es mayor (SG<sub>1</sub> y SG<sub>3</sub>).

### 5.12.2 Coeficiente de orientación experimental

Tal como se indica en la Sección “3.8.1. Comparación comportamiento flexión de probetas y testigos”, la dimensión de los testigos del paño 4 representativos de momentos positivos y negativos permite comparar el comportamiento a flexión de estos, con el de las probetas llenadas a pie de losa. La Figura 57 muestra dicha comparación hecha para el comportamiento promedio de las probetas (Probetas) y el comportamiento promedio de testigos (Testigos).

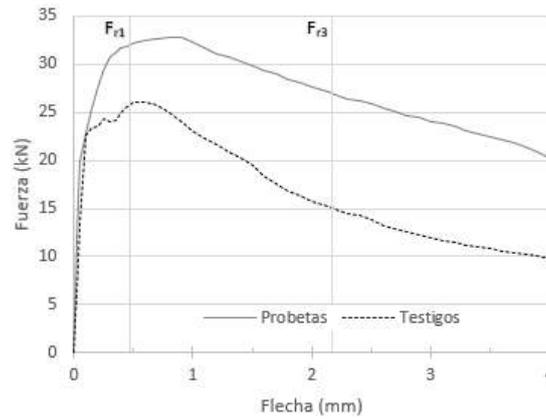


Figura 57 – Comparación de comportamiento probetas y testigos.

La principal diferencia entre testigos y probetas es la orientación de las fibras, ya que en los primeros representan la orientación que adoptan las mismas en la losa, mientras que en las segundas, las fibras se orientan preferentemente en la dirección longitudinal de la pieza (Ver Sección “2.1.7. Llenado de probetas sugerido por la Recomendación Danesa”). De este modo, de la comparación de los comportamientos a flexión se puede extraer un valor experimental para el coeficiente de orientación; este se presenta en la Tabla 15. Los valores de K que allí se representan corresponden a la relación entre los valores de fuerzas asociados a cada uno de los elementos considerados.

Blanco et al. (2014) indican que trabajar con valores de K distintos para  $f_{r1}$  y  $f_{r3}$  puede mejorar los resultados de un modelo que considere la ecuación constitutiva del Código Modelo [7]. Experimentalmente, es posible determinar distintos valores de K para el comportamiento en ELS ( $F_{r1}$ ,  $K_{F1}$ ) y para el comportamiento en ELU ( $F_{r3}$ ,  $K_{F3}$ ). El valor  $K_{F1}$  resulta menor que  $K_{F3}$  lo que se puede asociar a una mayor influencia de la orientación de las fibras en el final del comportamiento y no en el pico de fuerza.

Tabla 15 – Valores de K experimentales.

	Probetas	Testigos		
$F_{r1}$ (kN)	32,0	25,8	$K_{F1}$	1,24
$F_{r3}$ (kN)	27,0	15,1	$K_{F3}$	1,79

### 5.13 Conclusiones parciales

El comportamiento exhibido por la losa, las probetas, los testigos y la ecuación constitutiva es coherente con lo indicado por el Código Modelo [7]. El comportamiento de endurecimiento de probetas y testigos se asocia a un comportamiento similar en la losa: un primer tramo elástico lineal hasta la fisura, luego un endurecimiento hasta la carga máxima y por último un ablandamiento hacia el final del ensayo asociado a una importante ductilidad. Por su parte, la ecuación constitutiva muestra un ablandamiento posterior a la fisura para valores de K mayor a 1,0.

Los ensayos realizados a la losa se asocian a fuerzas máximas de 212 y 156 kN y flechas en el centro de la losa de 30 y 20 mm. Por su parte, a los desplazamientos máximos de 64 y 59 mm se asocian fuerzas de 188 y 117 kN. Es decir, desplazamientos entre 2 y 3 veces los de la fuerza pico, asociados a fuerzas de 89 y 75 % de la máxima. La diferencia de resultados para ambos paños se asocia principalmente a los distintos espesores nominales, aunque otros parámetros también podrían influir, por ejemplo, la orientación de las fibras. Además, el patrón de fisuración se adapta a lo indicado por la bibliografía (ver Sección “2.2.1. Experiencias internacionales”) de modo que la integridad del paño diametralmente opuesto se mantiene en cada ensayo.

Las curvas que surgen de ensayos a flexión a testigos y probetas son cualitativamente similares, obteniéndose mayor dispersión para los primeros. Esto se asocia a la falta de entalla en el ensayo de testigos y al hecho de que se trabajó con tres sentidos de ensayo. El estudio de los tres sentidos de comportamiento arroja que los testigos ensayados de canto (*momento medio*) toman mayores tensiones que los ensayados en la posición original (*momento positivo*) e invertidos (*momento negativo*). A su vez, no se identifica una diferencia clara entre estos últimos.

Los estudios estadísticos arrojan que las fibras se concentran en la parte inferior de la losa, encontrándose diferencia estadísticamente significativa entre las cantidades de fibras contadas en las tres franjas en las que se dividieron los testigos. En cuanto a la orientación, un análisis que surge del conteo de fibras arroja que se orienta la misma cantidad de fibras en las dos direcciones principales de la losa y se identifica influencia de los bordes en su disposición, identificándose mayor cantidad de fibras orientadas en la dirección paralela a los bordes de la losa. Por otro lado, la comparación de resultados de flexión de testigos y probetas permite hallar valores de K experimentales.

Se trabajó en determinar relaciones entre tres parámetros de los testigos: tensión residual que surge del ensayo a flexión, cantidad de fibras contadas en la sección de rotura y cantidad de fibras inferida de la inductancia medida en la sección media. La validez de interpolación lineal no es definitiva, ya que los parámetros  $R^2$  no son lo suficientemente cercanos a 1, identificando parámetros adicionales que se deben tener en cuenta en las relaciones estudiadas. En general, trabajar con la cantidad de fibras contadas, arroja mejores resultados que la inductancia por tratarse el primero de un resultado seccional y el segundo uno regional. Trabajar con mayor precisión la ubicación de las fibras y considerar longitudes de anclaje y ángulos de estas puede llevar a resultados más precisos.

## 6 Resultados del modelo computacional

### 6.1 Modelo de losa

Los modelos numéricos desarrollados son iterativos; a los mismos se les indica un estado final objetivo (en este caso un determinado valor de flecha en el centro del paño) y el modelo realiza incrementos de modo de acercarse al objetivo manteniendo el equilibrio en la estructura en todo el proceso. La amplitud de cada paso, la define el programa de modo de evitar la pérdida de estabilidad. La Figura 58 muestra el descenso que se registra en el modelo de losa cuando se alcanza el objetivo (flecha = 65 mm). Allí se identifica que el mapa de deformaciones es coherente, con los puntos cercanos al centro acompañando el desplazamiento y este anulándose en las proximidades de los pilares (esquinas, centro del elemento y centro de las aristas).

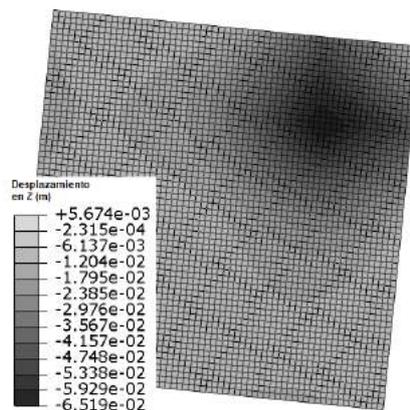


Figura 58 – Descenso de la losa registrado por el modelo computacional.

Por su parte, en la Figura 59 se muestra la deformación en la cara inferior del elemento de losa cuando se alcanza el objetivo. Se identifica que la deformación según el eje X (horizontal, Figura 59a) y según el eje Y (vertical, Figura 59b) son acordes a la formación de las fisuras principales reportadas en la Sección “5.3 Patrón de fisuración”.

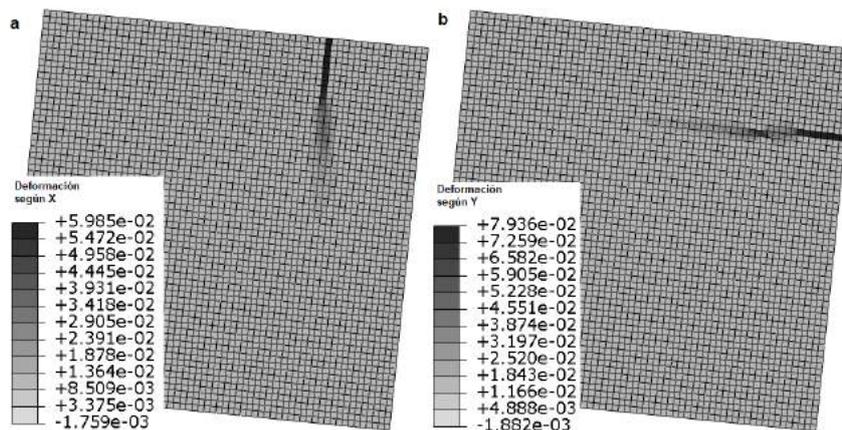


Figura 59 – Deformación en el elemento de losa en la iteración final.

De modo de comparar los resultados numéricos con los experimentales, se trabaja con la Figura 60, en la que se muestra la relación fuerza – flecha en el punto de introducción de las cargas para ambos ensayos realizados a la losa y los resultados que se obtienen con Abaqus. En este caso, se trabaja con la ecuación constitutiva que propone el Código Modelo [7] a partir de los resultados de probetas. Esta ecuación es modificada tal como propone el código de referencia por el factor de orientación, K. En la gráfica se muestran las curvas del comportamiento experimental (gris) y aquellas que surgen del modelo (negro). Para estas se indican el valor K considerado. A su vez, se incluye una ampliación de los primeros 10 mm de flecha.

Se compara los resultados experimentales (Paño 2 de espesor nominal 13,9 cm y Paño 3 de espesor nominal 12,5 cm) con los de un modelo de losa de 13 cm de espesor, dado a que este fue el proyectado y los valores nominales caen dentro de las tolerancias de EHE-08 [6].

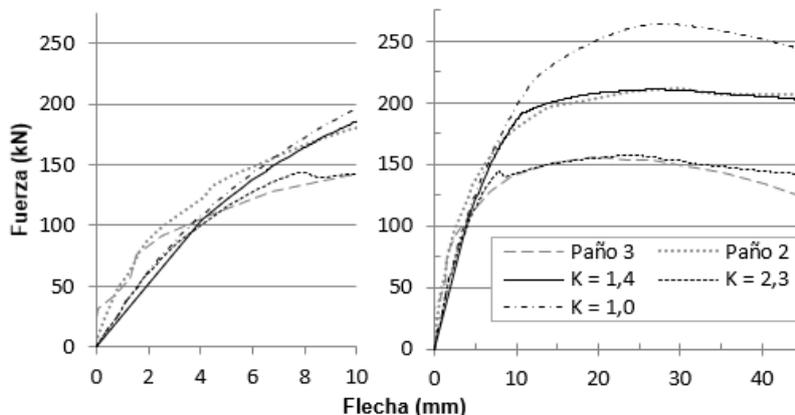


Figura 60 – Fuerza – flecha; comparación numérico – experimental.

Las formas de las curvas son cualitativamente similares. Se identifica un primer tramo elástico-lineal, seguido por un endurecimiento hasta alcanzar la carga máxima. Posterior a ello, el elemento toma menores fuerzas hasta el final del ensayo exhibiendo buena ductilidad.

Independientemente de los valores de K elegidos, el modelo computacional subestima la capacidad del elemento estructural en su tramo elástico-lineal. El modelo reporta el fin de este comportamiento para una flecha de 1 mm, para la cual se cuenta con una fuerza de 33 kN. A diferencia de ello, para la misma flecha, se reporta experimentalmente cargas de 58 y 62 kN, para los paños 2 y 3 respectivamente.

Resulta claro que el valor  $K = 1,0$  no es representativo del comportamiento de la losa, exhibiendo el modelo un comportamiento superior al experimental cuando se considera dicho caso. Para este modelo, el valor que representa el comportamiento del paño 2 es  $K = 1,4$ , este sobreestima los resultados experimentales del paño 3. Para dicho caso, del modelo surge trabajar con un valor de 2,3. Este valor es adecuado para el primer tramo del comportamiento de la losa, pero se debe realizar un estudio más detallado si se lo quiere aplicar al final del comportamiento (flechas superiores a los 30 mm).

Previamente se sugirió que la diferencia en el comportamiento de los distintos paños se podría asociar a la diferencia entre sus espesores medios, por ello la Figura 61 muestra la comparación experimental – computacional para modelos de losas de dos espesores distintos (13,9 y 12,5 cm). De este modo, el modelo muestra que la diferencia entre los valores K de ambos paños disminuye, siendo  $K = 1,70$  el representativo para el paño 2 y  $K = 2,15$  el del paño 3, de todos modos, se identifica que la misma no se supera por completo, mostrando el paño 2 una mayor capacidad portante.

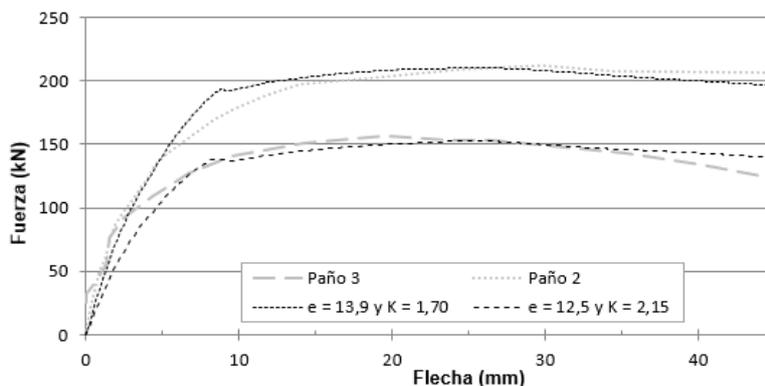


Figura 61 – Fuerza – flecha; numérico – experimental; distintos espesores.

## 6.2 Modelo de cuerpo sólido - testigos

Para modelar el comportamiento de los testigos se trabajó con elementos sólidos tal como se indica en la Sección “4.2.1. Modelado del sólido – testigos”. De modo de obtener resultados más precisos en la comparación, se trabajó con modelos distintos para cada una de las cuatro geometrías que se identificaron. En particular se presenta en la Figura 62a los desplazamientos verticales de un testigo de ancho 15,0 cm y altura 13,9 cm al finalizar el proceso de cálculo (cuando se alcanza la flecha objetivo de 5,0 mm) y en la Figura 62b se presenta el desplazamiento en el sentido longitudinal del mismo testigo. Las imágenes muestran un comportamiento usual para el elemento, con el máximo desplazamiento vertical concentrado en la zona en la que se aplica la carga y el desplazamiento longitudinal más grande en la sección con mayor sollicitación de momento flector.

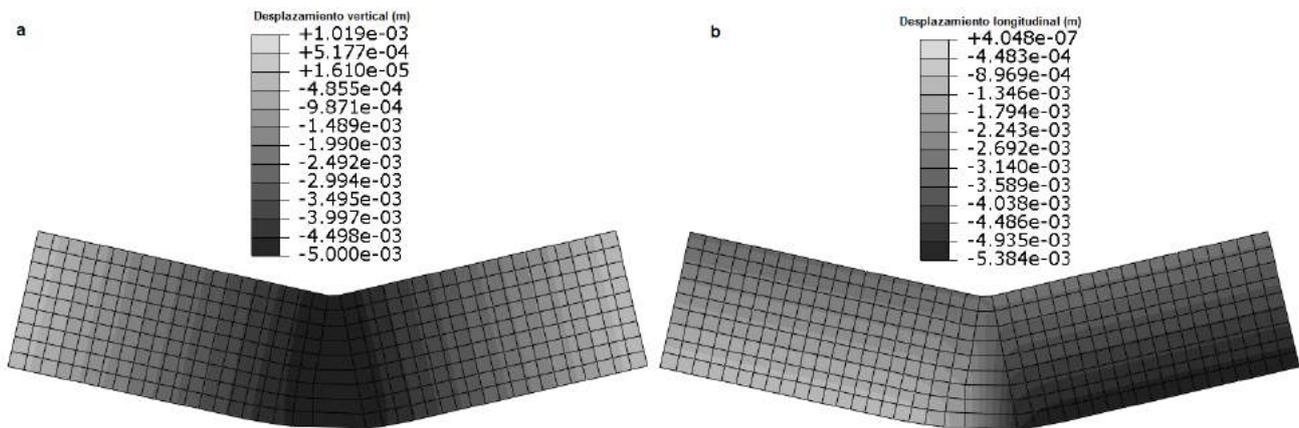


Figura 62 – Desplazamientos que arroja el modelo numérico para testigos.

La Figura 63 muestra las tensiones normales que se desarrollan al final del ensayo, tanto en la parte superior (Figura 63a) como en la parte inferior del testigo (Figura 63b). Allí se identifica que, acorde al tipo de ensayo que se desarrolla, cercano a la sección media, se concentran tensiones de compresión en la parte superior, mientras que la mayor de las tracciones se registra en la parte inferior del elemento para esta misma sección.

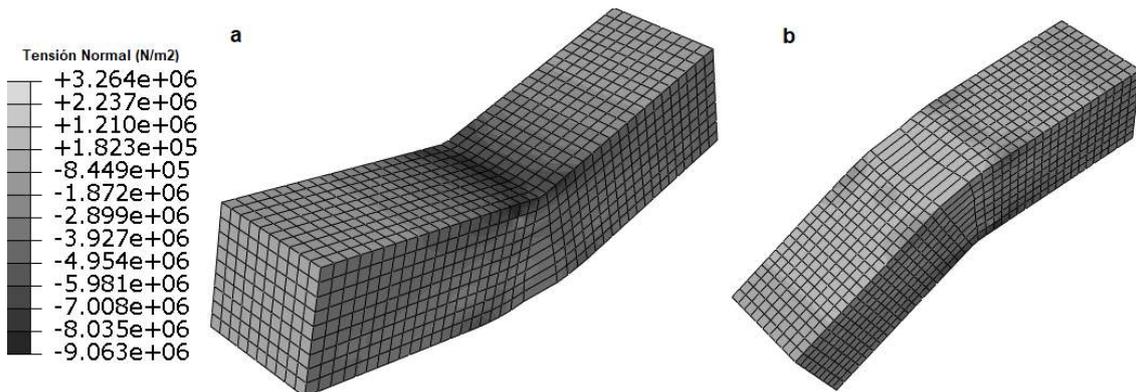


Figura 63 – Tensión normal por flexión de un testigo; modelo computacional.

### 6.2.1 Testigos representativos de momentos positivos y negativos

En la Figura 64 se muestra la relación fuerza – flecha experimental (gris), el comportamiento promedio de los testigos (gris oscuro) y la relación obtenida con el modelo (negro). En dicho caso, se representa los resultados trabajando con distintos valores de K. En la figura se separan los especímenes por alturas y además se corrige la incidencia del sistema de medición alternativo (ver Sección “Corrección de las curvas para testigos ensayados con sistema de medición alternativo”).

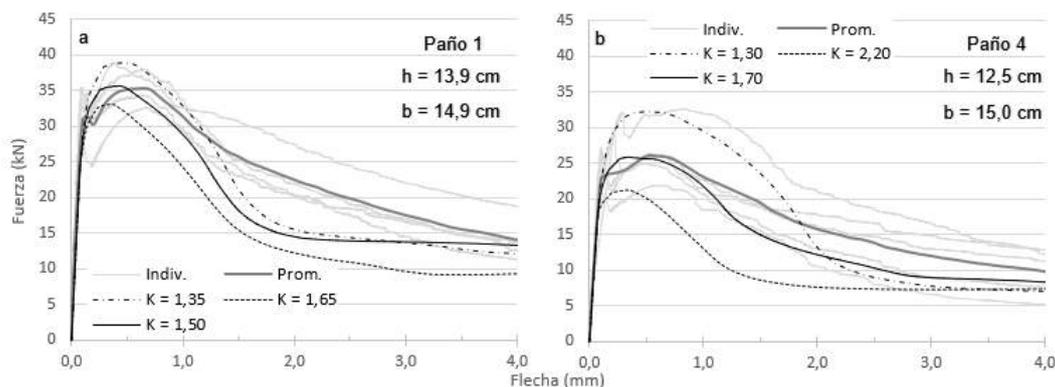


Figura 64 – Testigos ensayados a momento positivo y negativo; numérico – experimental.

Las curvas reportadas cuentan con formas cualitativamente similares. En todos los casos se cuenta con un tramo elástico-lineal, seguido por un endurecimiento hasta el pico de fuerza y luego un ablandamiento hacia el final del ensayo asociado a una importante ductilidad.

A diferencia de lo que ocurre con los paños de losa, para los testigos no se repite la subestimación del tramo elástico-lineal experimental. Por otro lado, la curva que surge del modelo es más suave en la cercanía del pico de fuerza, esto puede estar asociado a falta de precisión en el mallado. Por último, las curvas experimentales muestran en todos los casos mayor ductilidad que las numéricas.

Trabajando con valores de K que permitan la aproximación de los resultados numéricos a los experimentales en el pico de fuerzas se obtiene para los testigos con 13,9 cm de altura, valores de K que varían entre 1,35 y 1,65 siendo 1,50 el que mejor estima el promedio de comportamientos de los testigos. Por su parte, para los testigos de altura 12,5 cm, la dispersión es mayor, con valores K entre 1,30 y 2,20 y siendo 1,70 el que mejor estima el promedio.

De la Sección “5.12.2. Coeficiente de orientación experimental” surge que el valor de K experimental que se obtiene al comparar las fuerzas  $F_{r1}$  de testigos y probetas es 1,24. Este se diferencia del valor que surge del modelo numérico,  $K = 1,70$ .

### 6.2.2 Testigos ensayados de canto

La Figura 65 muestra la comparación entre el resultado experimental y la salida de datos del software para los testigos ensayados de canto. Se identifica una mayor capacidad portante para los testigos del paño 1 para los que el valor de K que surge del modelo es 1,2. De todos modos, se identifica para el testigo 2, Figura 65a, un segundo “pico” de comportamiento que se podría asociar a un  $K = 1,5$  en el modelo. El comportamiento de ambos testigos del paño 4 es muy similar, haciendo que sea posible tomar un valor K único de valor 1,3.

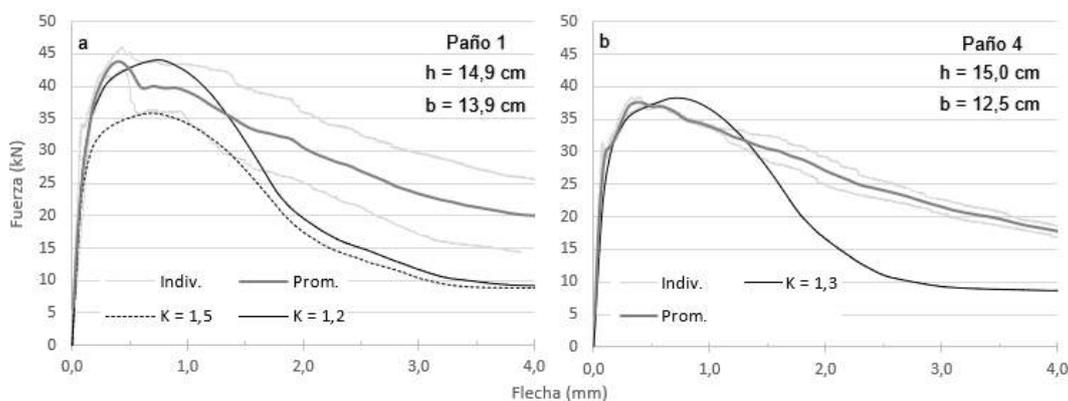


Figura 65 – Testigos ensayados de canto; numérico – experimental.

### 6.3 Conclusiones parciales

Trabajar con un valor  $K = 1,0$ , sobreestima la capacidad del material y puede resultar peligroso. Una vez determinado el valor  $K$ , se obtienen modelos que se ajustan al comportamiento de la losa y los testigos. Es entonces muy importante la determinación del coeficiente  $K$  asociado al elemento, procedimiento de llenado y características del HRFA con el que se trabaja en cada aplicación, tal como se indica en la investigación de Blanco et al. (2014).

Por otro lado, el estudio arroja que a partir de los modelos desarrollados los valores de  $K$  determinados para ambos paños de losa resultan superiores a los asociados a testigos, es decir, la orientación de las fibras en la losa es menos favorable que la que adoptan en los testigos. Los distintos comportamientos y tipos de rotura asociados a estos elementos pueden ser la razón de esta diferencia. También se plantea, el trabajo con modelos distintos (elementos sólidos y superficiales) como un posible factor influyente.

De modo de eliminar la influencia del espesor en ambos paños de losa, se trabajó con modelos de 13,9 y 12,5 cm de espesor. El resultado que de allí surge muestra que, el paño 2 tiene una mayor capacidad portante que el número 3, lo cual también se respalda con los  $K$  determinados para los testigos, lo que muestra que, dentro de un mismo elemento estructural, los comportamientos pueden ser diferentes al trabajar con HRFA.

El valor de  $K$  promedio para los testigos ensayados en posición original e invertidos (momentos *positivos* y *negativos*) es de 1,6 y este para los testigos ensayados de canto (momento *medio*) es de 1,25. Esto muestra que los últimos tienen una mayor capacidad portante, resultado al que también se arribó en secciones previas.

## 7 Análisis estructural

De modo de probar la capacidad del material desarrollado se realizó un ejercicio teórico que consistió en modelar la losa correspondiente a la Planta Tipo del edificio erigido por Maturana et al. (2014). De este modo se busca probar, teóricamente, las potestades del material desarrollado en una estructura de escala real.

### 7.1 Planteo de la aplicación teórico

Maturana et al. (2014) trabajaron con una losa de dimensiones 33 x 20 x 0,30 m que se desarrolla en torno a un núcleo central. Los pilares sobre los que apoya se dispusieron según cuatro alineaciones longitudinales A, B, C y D, separadas 8, 4,5 y 5,4 m entre sí y cinco alineaciones transversales 1, 2, 3, 4 y 5, espaciadas 7,8 m (Ver Figura 66). En todo el elemento se trabajó con HRFA como único material resistente salvo por el caso de los paños de 7,8 x 8 m en la esquina del edificio, donde se trabajó con un emparrillado inferior de diámetro 10 mm cada 15 cm de acero corrugado ADN 500. El HRFA con el que se trabaja cuenta con una dosificación de 100 kg/m<sup>3</sup> de fibras metálicas del tipo *ARCELOR TABIX 1,3/50* (1,3 mm de diámetro, 50 mm de longitud, esbeltez 38,5 y geometría ondulada en toda su longitud) y una matriz de hormigón de resistencia característica a la compresión,  $f_{ck}$ , de 30 MPa.

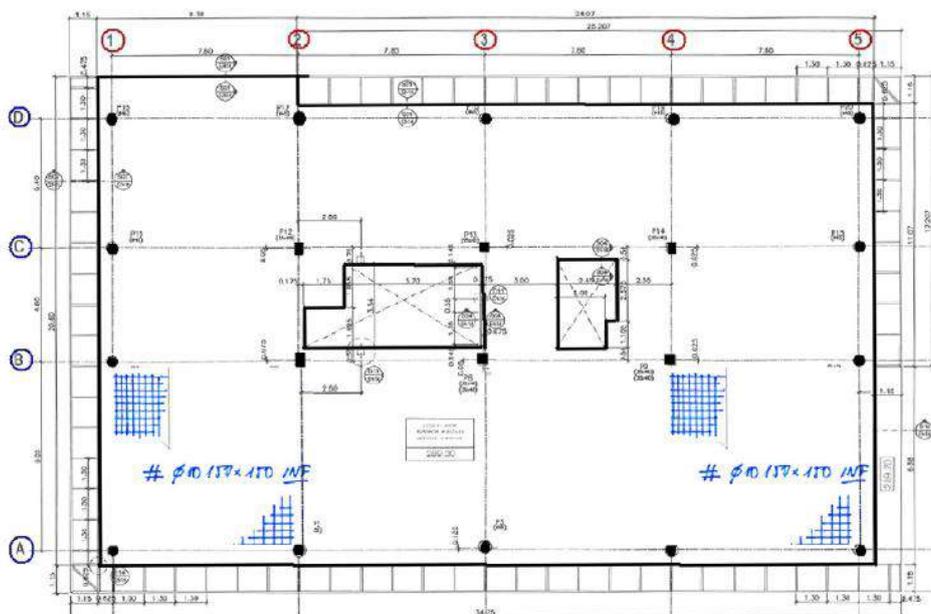


Figura 66 – Planta estructural de la investigación de referencia [9].

En la presente aplicación teórica se trabajó con una simplificación de la estructura mencionada: no se considera el núcleo central, por lo que la losa no cuenta con orificios, se modela todos los pilares como apoyos fijos puntuales y no se considera el emparrillado en los paños críticos, ni tampoco los volados de la losa. De este modo, se modela una losa de dimensiones: 31,2 x 17,9 x 0,25 m, es decir, se disminuye en 5 cm el espesor de la losa.

Respecto al material, se modifica el propuesto por Maturana et al. (2014) por el desarrollado en la presente investigación. Se considera un  $K = 2,15$  que corresponde al mayor de los coeficientes determinados en la Sección “6.1. Modelo de losa”. De este modo, los parámetros resistentes toman los siguientes valores:  $f_{r1} = 2,7$  MPa y  $f_{r3} = 2,2$  MPa (ver Tabla 7 de la Sección “5.1. Ensayo de flexión normalizado - Probetas llenadas a

pie de losa");  $f_{cd} = 42$  MPa,  $f_{ctd} = 3,6$  MPa y  $E_{c,d} = 36,8$  GPa. La ecuación constitutiva que se asocia a estos parámetros se muestra en la Figura 67.

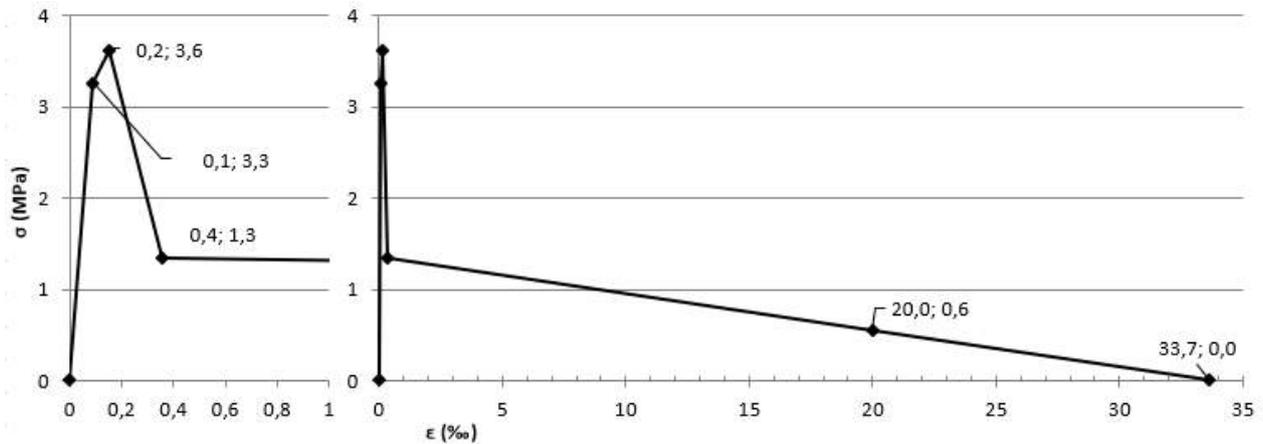


Figura 67 – Ecuación constitutiva para la aplicación teórica.

Para el modelo se trabaja con elementos finitos de superficie, discretizados en una malla de elementos cuadrados de 0,25 m de lado.

En la Figura 68a se muestra el mallado para la losa. En la Figura 68b se muestra las condiciones de contorno (apoyos fijos en todos los pilares) y la introducción de carga distribuida en toda la superficie.

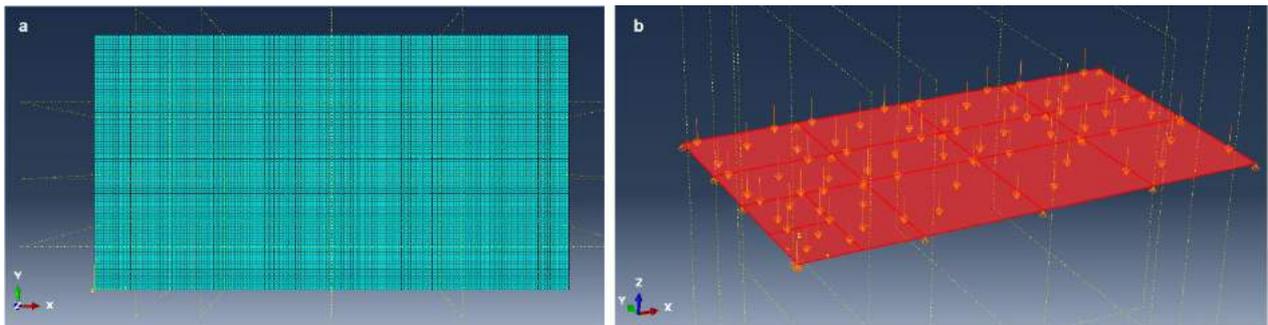


Figura 68 – Mallado, condiciones de contorno e introducción de carga. Aplicación teórica.

Tal como lo hacen en Maturana et al. (2014) se adoptan las siguientes cargas para el diseño: peso propio ( $25 \text{ kN/m}^3$ ), tabiquería equivalente a una carga superficial de  $1 \text{ kN/m}^2$ , un revestimiento superficial de  $0,2 \text{ kN/m}^2$  y una sobrecarga de uso de  $2 \text{ kN/m}^2$ .

Tal como lo hacen en Maturana et al. (2014) se adoptan las siguientes cargas para el diseño: peso propio ( $25 \text{ kN/m}^3$ ), tabiquería equivalente a una carga superficial de  $1 \text{ kN/m}^2$ , un revestimiento superficial de  $0,2 \text{ kN/m}^2$  y una sobrecarga de uso de  $2 \text{ kN/m}^2$ .

## 7.2 Verificación de ELU

De modo de probar la validez de la aplicación del material desarrollado en esta estructura se busca cumplir con una de las dos ecuaciones que se presentan en la Sección "2.1.8. Principios de diseño". El modo de verificación elegido consiste en correr un modelo de losa controlando la carga distribuida que se aplica a ella y extraer información de flecha en el punto más desfavorable (punto medio del paño de mayor vano –  $7,8 \times 8 \text{ m}$  –) en función de la carga aplicada. La Figura 69 muestra la curva asociada, en ella se muestra el comportamiento de la losa y se resaltan dos puntos notables: el que representa la carga de diseño ( $128,3 ; 13,1$ ) y el que representa el comportamiento en servicio ( $9,6 ; 8,1$ ) en las condiciones establecidas por el Código Modelo.

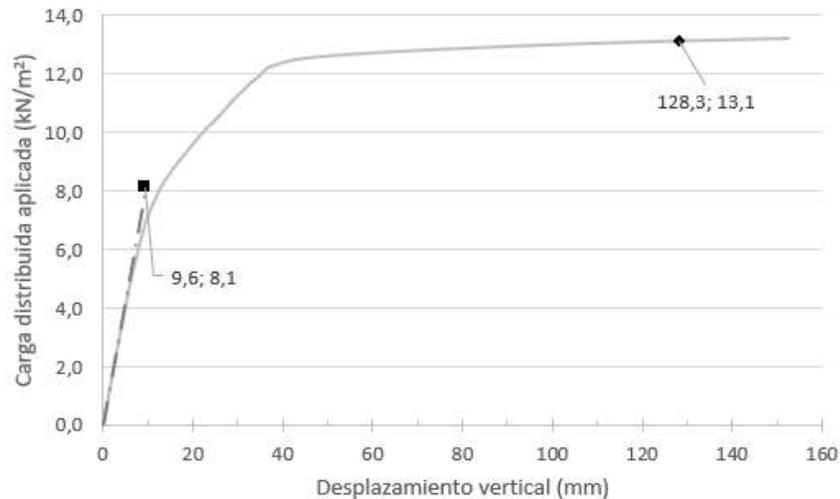


Figura 69 – Desplazamiento vertical en función de la carga aplicada; aplicación teórica.

Utilizando la combinación permanente de acciones, coeficiente 1,35 y 1,50 para carga permanente y variable respectivamente, la carga distribuida de diseño toma un valor de 13,1 kN/m<sup>2</sup>. Por su parte, para la combinación casi permanente, coeficiente 1,00 y 0,30 para cargas permanentes y variables respectivamente, la carga de servicio,  $q_{SLS}$ , toma un valor de 8,1 kN/m<sup>2</sup>.

De modo de determinar la flecha de servicio,  $\delta_{SLS}$ , que se define en la Sección “2.1.8. Principios de diseño” se determina para el tramo inicial del comportamiento, elástico-lineal, la siguiente relación entre carga y flecha: 0,84 kN/m<sup>2</sup>·mm. Con esta relación se puede determinar el valor de  $\delta_{SLS} = 9,6$  mm. El modelo computacional no es capaz de continuar cuando la carga toma un valor de 13,2 kN/m<sup>2</sup> asociado a un desplazamiento 152 mm. Considerando que estos valores corresponden al pico, se verifica la siguiente ecuación:

$$\delta_{\text{pico}} = 152 \text{ mm} \geq 5 \delta_{SLS} = 48 \text{ mm}$$

Adicionalmente, la carga máxima que el modelo es capaz de tomar, 13,2 kN/m<sup>2</sup>, supera el valor de la carga de diseño, 13,1 kN/m<sup>2</sup>. Las dos relaciones permiten determinar que el material desarrollado y la geometría adoptada verifican el comportamiento en ELU. La verificación realizada no tiene en cuenta el coeficiente  $K_{Rd}$  que el Código Modelo sugiere para aumentar la capacidad resistente en estructuras que cuentan con una importante redistribución de esfuerzos.

### 7.3 Verificación de ELS

La verificación a realizar del servicio de la pieza consiste en determinar que la estructura no superará los límites de deformación indicados en el Código Técnico de la Edificación [44]. En esta aplicación se trabaja con los siguientes límites:

- Se limita la flecha activa relativa entre dos puntos debajo de un tabique ordinario a 1/400, de modo de preservar la integridad de elementos constructivos. Se interpreta este límite de la siguiente manera: la diferencia de flecha activa entre dos puntos debajo de un tabique separados 50 cm entre sí no puede superar los 0,25 cm.
- Se limita la flecha total relativa entre dos puntos cualesquiera a 1/300 de modo de preservar la apariencia de la obra. Se interpreta este límite de la siguiente manera: la diferencia de flecha total entre dos puntos cualesquiera separados 50 cm entre sí no puede superar los 0,33 cm.

Interpretando las directivas del Apartado 50, Capítulo 11, “Estado Límite de Deformación” de la EHE-08 [6] se toma para la flecha total (considerando las diferidas) un valor 2,6 veces mayor a la flecha instantánea, mientras que la flecha activa se considera 2,0 veces la flecha instantánea. Estos valores surgen de una

hipótesis de carga usual para un edificio de vivienda: se aplica el peso propio a una semana del hormigonado, los muros se colocan a las 2 semanas, al mes se aplica la carga muerta y a 6 semanas se aplica la sobrecarga de uso. A su vez, se utilizan los coeficientes sugeridos por la propia Instrucción para determinar los efectos de largo plazo, tomando como hipótesis que dichos efectos para el HRFA son similares a los reportados para el hormigón armado.

La Figura 70 muestra los desplazamientos verticales de la mitad de la losa, por ser simétrica la otra mitad se comporta de la misma manera, bajo la carga representativa del servicio de la pieza. Las tramas allí indicadas representan valores de desplazamiento vertical mientras que los círculos blancos indican la posición de fibras separadas 50 cm entre ellas. Se indican los círculos iniciando desde el punto de mayor desplazamiento vertical, indicado con una cruz, dado a que esa es la zona más crítica en lo que respecta al servicio.

La verificación de los límites indicados se puede interpretar de la siguiente manera: en la figura no existen dos puntos, distanciados 50 cm entre sí, para los cuales la diferencia de flechas supere los 0,125 cm (límite de integridad) ni los 0,127 cm (límite de apariencia). Estas verificaciones se toman ambas sobre el punto de mayor desplazamiento vertical, aunque sea inusual colocar un tabique sobre ese punto, ya que cortaría un importante vano en la mitad.

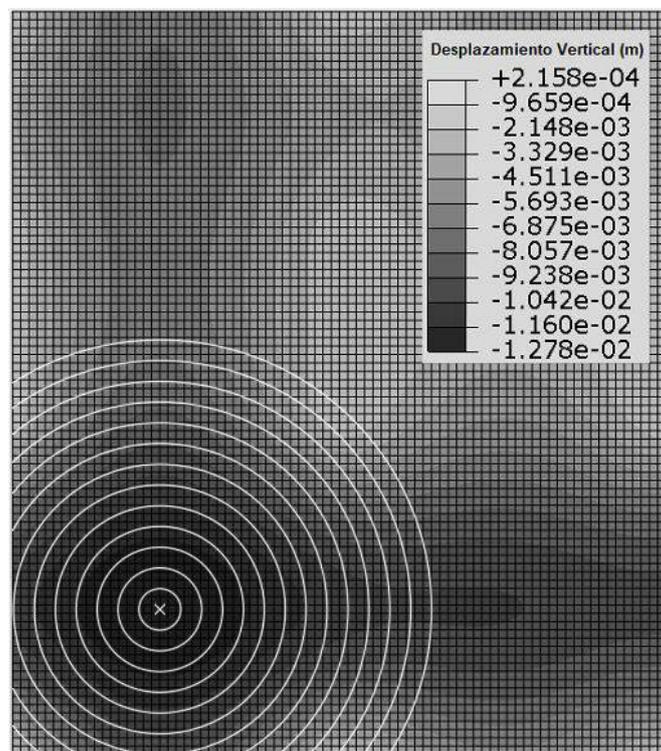


Figura 70 – Desplazamiento vertical bajo carga de servicio.

## 7.4 Conclusiones de la aplicación teórica

Utilizando una mezcla de HRFA con menor cantidad de fibras (90 contra 100 kg/m<sup>3</sup>) pero una mayor esbeltez en sus fibras (65 contra 38,5) y contando con un método de diseño más preciso (modelo numérico no-lineal contra líneas de rotura) se logró verificar el ELU y ELS de la aplicación de Maturana et al. (2014) con una losa de espesor 25 cm, 5 cm menor a la losa proyectada originalmente, y prescindiendo de armadura de refuerzo. Esta aplicación teórica se asocia a una interpretación de las directrices del Código Modelo para el diseño con HRFA, el desarrollo de un modelo numérico no-lineal y la suposición de ciertas hipótesis de cálculo (estados de carga y evolución de flecha a largo plazo).

## 8 Conclusiones

### 8.1 Conclusiones generales

Se logró determinar una ecuación constitutiva para el material, basada en los lineamientos del Código Modelo [7], que utilizada en el modelo numérico desarrollado refleja el comportamiento experimental de losa y testigos. En el modelo desarrollado se debió trabajar con los siguientes factores de orientación: para la losa entre 1,70 y 2,15; para testigos ensayados en posición original e invertidos entre 1,50 y 1,70; para testigos ensayados de canto entre 1,20 y 1,50. Los valores de K que se obtienen marcan una diferencia entre el comportamiento de losa y testigos que, de ser confirmada por investigaciones futuras, debe ser considerada si se extraen testigos como control de calidad. Además, la diferencia con el valor  $K = 1,0$  marca la importancia de determinar correctamente este factor en una aplicación real ya que utilizar directamente los resultados arrojados por ensayos normalizados a probetas puede llevar a errores considerables.

Se probó que existe una mayor concentración de fibras hacia la parte inferior de la losa, de modo que, dividiendo por tercios, la cantidad de fibras es mayor en el tercio inferior ( $1,21 \text{ fibras/cm}^2$ ), disminuye hacia el centro ( $1,00 \text{ fibras/cm}^2$ ) y sigue disminuyendo hacia arriba ( $0,75 \text{ fibras/cm}^2$ ). Se realizaron ensayos a flexión a testigos en diferentes sentidos (posición original, invertida y de canto) con la intención de cuantificar la influencia de este aspecto. Como resultado se obtiene que, ninguno de los sentidos se asocia a una mayor capacidad portante a raíz de esta concentración de fibras. Esto se puede asociar a que la cantidad de fibras en la sección de rotura tienen mayor influencia que la distribución de estas en la altura. No se cuenta con una cantidad suficiente de testigos con las mismas dimensiones y cantidad de fibras en la sección de rotura para obtener conclusiones más determinantes.

Un estudio simplificado de la orientación de fibras (inferido del conteo de estas) muestra que las mismas no toman direcciones preferenciales en la losa como resultado del procedimiento de llenado que se llevó a cabo. Además, en la cercanía de los bordes, se puede identificar influencia de estos. Como resultado de modelos numéricos desarrollados con espesores distintos se obtiene para uno de los paños (Paño 2 –  $K = 1,70$ ) un valor de K mayor al otro (Paño 3 –  $K = 2,15$ ), lo que se puede asociar a una mayor capacidad portante del paño con valor de K menor. Eliminada la influencia del espesor, el único factor que resta para explicar esta diferencia es una orientación de fibras más beneficiosa en el paño 2.

### 8.2 Conclusiones particulares

- Con los resultados obtenidos el Código Modelo permite determinar que el material desarrollado tendría un comportamiento de ablandamiento a tracción uniaxial. Además, se determinó un comportamiento de endurecimiento en ensayos de flexión a probetas y testigos y cuando se aplican cargas puntuales en una losa elevada sobre apoyos puntuales.
- Los ensayos a los paños de losa muestran un comportamiento elástico-lineal inicial, seguido de un tramo de endurecimiento hasta alcanzar la fuerza pico y luego un ablandamiento hacia el final del ensayo. La fuerza máxima fue de 212 y 156 kN asociada a desplazamientos de 30 y 20 mm respectivamente. El desplazamiento máximo fue de 64 y 59 mm, asociado a fuerzas de 188 y 117 kN respectivamente. Es decir, los ensayos se frenan para un valor de flecha en el centro del paño entre 2 y 3 veces mayor al desplazamiento en el pico y para estos desplazamientos máximos, se mantiene una fuerza mayor al 75 % de la fuerza máxima. A su vez, el patrón de fisuración coincide con el reportado por la bibliografía, con fisuras radiales desde el punto de aplicación al borde del paño en la cara inferior y bandas circulares con centro en el punto de aplicación y que pasan sobre los apoyos puntuales en la cara superior.
- Con el material se modeló la losa de Maturana et al. (2014), utilizándose un  $K = 2,15$  (envolvente del comportamiento del material) y verificándose el ELU y ELS. Se trabajó para ello con un espesor de 25

cm (menor a los 30 cm originales) y se prescindió de emparrillado, mostrándose así la capacidad del material en una aplicación real.

- Los testigos ensayados de canto (*momento medio*) son los que cuentan con tensiones residuales y ductilidad más importante. No se logró determinar la razón asociada a este resultado.
- La comparación de resultados de flexión para testigos ensayados en distintos sentidos no arroja una diferencia significativa de comportamiento, de modo que no se puede concluir que la losa cuente con sectores más críticos.
- La relación entre la cantidad de fibras en la sección de rotura y la resistencia a tracción residual es lineal y creciente, asociado a un parámetro  $R^2$  (0,60) que mejora cuando se discrimina en momentos.
- La relación lineal entre la cantidad de fibras en la sección de rotura e inductancia en la sección media cuenta con un valor de  $R^2$  (0,46) pequeño, asociado al hecho de que se está comparando un valor seccional con un valor representativo de una región.
- Se muestra una relación lineal creciente entre la inductancia en la sección media y la tensión residual a tracción de los testigos. Esta cuenta con un  $R^2$  (0,51) más pequeño que el obtenido al comparar la tensión con el conteo de fibras manual.
- Comparando los resultados del Ensayo Inductivo para el patrón con el promedio de los testigos se identifica una distribución cualitativamente similar.

### 8.3 Líneas de investigación futuras

El resultado de la presente investigación contribuye en la dirección del desarrollo de HRFA como único refuerzo de losas elevadas, obteniéndose información adicional a la que se conocía previamente. De todos modos, el campo por explorar en esta materia es vasto y a continuación se indicarán líneas de investigación que se podrían desarrollar a futuro. Estas se dividen del mismo modo en que se dividieron los capítulos de este documento.

#### 8.3.1 Modelo computacional

- En este caso se modeló utilizando el módulo CDP del Abaqus. A diferencia de esto, en otras investigaciones se ha optado por el módulo *Smeared Cracking* o por el modelado de fibras discretas en masas de hormigón convencional. Sería interesante el trabajo con estas alternativas de modo de compararlas y determinar cuál de ellas se asocia a soluciones más precisas.
- Estudiar con más profundidad el módulo CDP para determinar la sensibilidad de cada uno de los parámetros en los resultados que se obtienen; principalmente el ángulo de fricción interna y el parámetro de viscosidad.
- Analizar con mayor profundidad la influencia del mallado en las soluciones que se obtienen, tanto para los cuerpos sólidos como para los elementos de superficie.
- Analizar los resultados que surgen de una variación en la configuración de apoyos para la losa. Se podría generar un "*empotramiento parcial*" de la losa en los pilares (en la práctica se identifica que esto sucede) para evaluar si los resultados mejoran.
- Trabajar en la determinación de un modelo que represente fielmente el comportamiento elástico-lineal inicial de la losa.
- Desarrollar un modelo que considere distintos espesores en la misma losa, tal cual sucede en la práctica. Esto podría llevar a una mayor similitud entre resultados experimentales y numéricos.

#### 8.3.2 Resultados experimentales

- Trabajar con interpretaciones alternativas para el tramo final de la ecuación constitutiva en tracción para el HRFA que puedan representar de forma más fiel la ductilidad mostrada por resultados experimentales.
- Probar procedimientos de hormigonado precisos que permitan definir la orientación de fibras (parámetro K) sin la necesidad de intervenir el elemento estructural (extrayendo testigos o ensayando directamente).

- Relacionar la posición de la fisura principal a una disminución en el momento de rotura (y por consiguiente tensión de rotura) de modo de obtener curvas  $f_{r3}$  – apertura de fisuras más fieles y disminuir la variabilidad.
- Analizar las piezas audiovisuales que se grabaron en los ensayos de flexión con la intención de extraer información relevante del comportamiento de los testigos.
- En el transcurso de la investigación se generó un contacto con el Dr. Ing. Federico Lecumberry (Instituto de Eléctrica de la Facultad de Ingeniería, UdelaR) quien indicó la factibilidad de desarrollar un método de conteo de fibras por procesamiento de imágenes. Se plantea entonces, desarrollar este método ya que el mismo se puede asociar a una mayor precisión en el conteo y se podría así recabar información adicional, como es: posición de las fibras relativa a los bordes y ángulo que estas tienen. De este modo se podría mejorar las relaciones halladas entre los parámetros involucrados.
- Trabajar con mayor precisión para el conteo de fibras, aumentando la cantidad de franjas consideradas o incluso identificando la posición de cada fibra individual respecto del borde de la pieza. Eso puede llevar a una mejora sustancial de la relación lineal entre  $f_{r3}$  – cantidad de fibras en la sección de rotura.
- Analizar en profundidad el proceso de hormigonado de forma de determinar la orientación de fibras resultante del mismo utilizando resultados probados por otros investigadores (rotación de fibras en el flujo de hormigón e influencia de los bordes en la orientación). Comparar los resultados con los datos recabados en la presente investigación.
- Obtener piezas cúbicas de los testigos de modo de mejorar el estudio de orientación; de ese modo se contará con datos de cantidad de fibras orientadas según cada una de las tres direcciones principales del elemento.
- Desarrollar el Ensayo Montevideo a piezas cúbicas que se obtengan de los testigos y comparar los resultados con los recabados en la presente investigación.
- Buscar una explicación para la mayor capacidad portante que muestran los testigos ensayados de canto y para la diferencia en los valores de K que surgen de los modelos para testigos y losa (es decir, explicar por qué la orientación de fibras en testigos es más beneficiosa que en la losa).
- Obtener mayor cantidad de testigos con las mismas dimensiones y cantidad de fibras en la sección de rotura para poder extraer conclusiones más determinantes acerca de la influencia de la concentración de fibras en el comportamiento de los testigos.

### 8.3.3 Análisis estructural

- Trabajar con modelos de plantas estructurales más sofisticados, que consideren pilares de grandes dimensiones y orificios en la losa, de modo que sea más representativo de aplicaciones reales.

## 9 Referencias Bibliográficas

- 1] B. Mobasher y X. Destrée, «Design and Construction Aspects of Steel Fiber-Reinforced Concrete Elevated Slabs,» *C. A. LF, ed. SP-274 Fiber reinforced self-consolidating concrete: research and applications.*, pp. 95-107, 2010.
- 2] A. Bentur y S. Mindess, «Fibre Reinforced Cementitious Composites,» Taylor & Francis Group, 2007.
- 3] A. Aguado, «Manual Sobre el Hormigón con Fibras,» CEMEX-UPC, 2012.
- 4] ACI, «ACI 544. 1R-96 State-of-the-Art Report of Fiber Reinforced Concrete,» American Concrete Institute, 2002.
- 5] L. Segura-castillo y M. Montaña, «Primera losa estructural elevada de hormigón con fibras contruida en Sudamérica.,» *INGENIERÍA No83 (Asociación de Ingenieros del Uruguay)*, pp. 33-36, 2018.
- 6] CPH, «EHE-08: Instrucción de Hormigón Estructural,» 2008.
- 7] FIB, Model Code 2010, Vol 1 & 2, Lausanne: International Federation for Structural Concrete (fib), 2010.
- 8] ACI, «ACI 544.6R-15 Report on Design and Construction of Steel Fiber-Reinforced Concrete Elevated Slabs,» American Concrete Institute, Farmington Hills, 2018.
- 9] F. Maturana, A. Orbe, J. Canales y J. Cuadrado, «Análisis plástico y Ensayos de Losas multidireccionales de HRFA,» 2014.
- 10] H. Salehian y J. Barros, «Prediction of the load carrying capacity of elevated steel fibre reinforced concrete slabs.,» *Composite Structures*, 170, pp. 169-191, 2017.
- 11] A. Abrishambaf, J. Barros y V. Cunha, «Relation between fibre distribution and post-cracking behaviour in steel fibre reinforced self-compacting concrete panels,» *Cement and Concrete Research*, pp. 57-66, 2013.
- 12] S. Infante, M. Porcelli y A. Silveira, «Estudio experimental y numérico de elementos estructurales de hormigón reforzado con fibras,» Facultad de Ingeniería, UdelaR, Montevideo, 2019.
- 13] L. Segura-Castillo, S. Cavalaro, C. Goodier, A. Aguado y S. Austin, «Fibre distribution and tensile response anisotropy in sprayed fibre reinforced concrete.,» *Materials and Structures*, 51, pp. 1-12, 2018.
- 14] F. Laranjeira, A. Aguado, C. Molins, S. Grunewald, J. Walraven y S. Cavalaro, «Framework to predict the orientation of fibers in FRC: A novel philosophy.,» *Cement and Concrete Research*, 42, pp. 752-768, 2012.

- 15] R. Gettu, D. Gardner, H. Saldivar y B. Barragán, «Study of the distribution and orientation of fibers in SFRC specimens,» *Materials and Structures*, 38, p. 31–37, 2005.
- 16] P. Stähli, R. Custer y J. van Mier, «On flow properties, fibre distribution, fibre orientation and flexural behaviour of FRC,» *Materials and Structures*, 41, p. 189–196., 2008.
- 17] AENOR, «UNE-EN 14.651:2007+A1. Método de ensayo para hormigón con fibras metálicas. Determinación de la resistencia a tracción por flexión (límite de proporcionalidad (LOP), resistencia residual),» Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid, 2008.
- 18] T. Kasper, H. Stang, P. Mjoernell, H. Slot, G. Vitt, L. Nyholm Thrane y L. Reimer, «Design guideline for structural applications of steel fibre reinforced concrete,» SFRC Consortium, 2017.
- 19] H. Salehian y J. Barros, «Assessment of the performance of steel fibre reinforced self-compacting concrete in elevated slabs.,» *Cement & Concrete Composites*, pp. 268-280, 2014.
- 20] L. Facconi y F. Minelli, «Verification of structural elements made of FRC only : A critical discussion and proposal of a novel analytical method,» *Engineering Structures*, 131, p. 530–541, 2017.
- 21] A. Blanco, P. Pujadas, A. de la Fuente, S. Cavalaro y A. Aguado, «Assesment of the fibre orientation factor in SFRC slabs,» *Composites: Part B*, pp. 343-354, 2014.
- 22] S. Barnett, J.-F. Lataste, T. Parry, S. Millard y M. Soutsos, «Assessment of fibre orientation in ultra high performance fibre reinforced concrete and its effect on flexural strength,» *Mater Struct* 43(7), pp. 1009-23, 2010.
- 23] B. Boulekbache, M. Hamrat, M. Chemrouk y S. Amziane, «Flowability of fibrerreinforced concrete and its effect on the mechanical properties of the material,» *Constr Build Mater* 24(9), pp. 1664-71, 2010.
- 24] J. Barros, H. Salehian, N. Pires y D. Gonçalves, «Design and testing elevated steel fibre reinforced self-compacting concrete slabs,» *8th RILEM International symposium on fibre reinforced concrete (BEFIB2012): challenges and opportunities.* , p. 314, 2012.
- 25] J. Chermant, L. Chermant, M. Coster, A. Dequiedt y C. Redon, «Some field of applications of automatic image analysis in civil engineering,» *Cement and Concrete Composites* 23, pp. 157-169, 2001.
- 26] H. Reinhardt, C. Grosse y B. Weiler, «Material Characterization of Steel Fibre Reinforced Concrete Using Neutron CT, Ultrasound and Quantitative Acoustic Emission Techniques,» *e-Journal of Nondestructive Testing (NDT)*, 2001.
- 27] m. Faifer, R. Ottoboni, S. Toscani y L. Ferrara, «Nondestructive testing of steel-fiberreinforced concrete using a magnetic approach,» *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement ( Volume: 60 , Issue: 5)*, pp. 1709-1717, May 2011.
- 28] H. Krenchel, «Fibre spacing and specific fibre surface,» *In: Neville A, editor. Fibre reinforced cement and concrete. UK: The Construction Press*, pp. 69-79, 1975.

- 29] D. Fontáns, H. Machín, D. Miguez, Á. González, D. Violini y M. Pappalardi, «Novedosa repavimentación en Uruguay mediante la aplicación de una capa adherida de hormigón con fibras sintéticas estructurales empleando tecnología de alto rendimiento,» *XVI Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito*, 2012.
- 30] P. Cañette Cal, M. Eguren Giménez y M. García Aturaola, «Diseño y control del hormigón reforzado con fibras en Uruguay,» Facultad de Ingeniería, Udelar, Montevideo, 2017.
- 31] G. Rodríguez de Sensale, L. Segura-Castillo, I. Rodríguez Viacava, R. Rolfi Netto, D. Miguez Passada y M. Fernández Iglesias, «Hormigón autocompactante con fibras para premoldeados,» *Hormigón y Acero*, vol. Elsevier España, 2017.
- 32] L. Segura-Castillo, N. García, I. Rodríguez Viacava y G. Rodríguez de Sensale, «Structural model for fibre-reinforced precast concrete sandwich panels,» *Advances in Civil Engineering*, vol. Volume 2018, 2018.
- 33] L. Segura-Castillo, D. Figueredo, I. Rodríguez y N. García, «First experimental full-scale elevated FRSCC slab in South America,» *BEFIB2020*, 2020.
- 34] AENOR, «EN 12350-8. Testing fresh concrete - Part 8: Self-compacting concrete - Slump-flow test,» Comité Européen De Normalisation, Paris, 2010.
- 35] ASTM, «ASTM C1611. Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete,» USA. ASTM International, 2005.
- 36] R. Ferrero, «Máxima Formación,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.maximaformacion.es/blog-dat/que-es-el-anova-de-una-via/>. [Último acceso: 13 Enero 2020].
- 37] ANOVA-Test, «Statics Kingdom,» 2017. [En línea]. Available: <http://www.statskingdom.com/180Anova1way.html>. [Último acceso: 20 January 2020].
- 38] Kruskal-Wallis-Test, «Social Science Statistics,» [En línea]. Available: <https://www.socscistatistics.com/tests/kruskal/default.aspx>. [Último acceso: 20 January 2020].
- 39] J. McDonald, «Handbook of Biological Statistics,» 2014. [En línea]. Available: <http://www.biostathandbook.com/>. [Último acceso: 20 January 2020].
- 40] T. Tysmans, M. Wozniak, O. Remy y J. Vantomme, «Finite element modelling of the biaxial behaviour of high-performance fibre-reinforced cement composites (HPRFCC) using Concrete Damaged Plasticity,» *Finite Elements in Analysis and Design*, vol. 100, pp. 47-53, 2015.
- 41] J. Lubliner, J. Oliver, S. Oller y E. Onate, «A plastic-damage model for concrete,» *Solids Struct*, vol. 25, pp. 299-326, 1989.
- 42] S. Dassault, Abaqus Keywords Reference Guide, Simulia, 2013.
- 43] M. Szczecina y A. Winnicki, «Calibration of the CDP model parameters in Abaqus,» *The 2015 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics*, pp. 1-11, 25-29 August 2015.

- 44] V. y. S. Dirección General de Arquitectura, Código Técnico de la Edificación, Madrid: Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, 2015.
- 45] J. Calavera, Proyecto y Cálculo de Estructuras de Hormigón, Intemac, 1999.
- 46] Maccaferri, Fibras como elemento estructural para el refuerzo del hormigón - Manual Técnico, 2005.
- 47] J. Montoya, A. Gracia Meseguer, F. Morán Cabré y J. Arroyo Portero, Hormigón Armado, Gustavo Gili, SL, 2009.
- 48] B. Parmentier, E. De Grove, L. Vandewalle y F. Van Rickstal, «Dispersion of the mechanical properties of FRC investigated by different bending tests,» *Stoelhost Walraven. Fib symposium "Tailor Made Concrete Structures"*. Amsterdam, pp. 507-12, 2008.
- 49] C. Molins, A. Aguado y S. Saludes, «Double punch test to control de energy dissipation in tension of FRC (Barcelona Test),» *Mater Struct 42(4)*, pp. 415-25, 2009.
- 50] AENOR, «UNE 83507:2004. Hormigones con fibras. Rotura por compresión.,» Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid, 2004.
- 51] AENOR, «UNE 83316:1996. Ensayos de hormigón. Determinación del módulo de elasticidad en compresión.,» Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid, 1996.
- 52] L. Segura-Castillo, S. Cavalaro, C. Goodier, A. Aguado y S. Austin, «Fibre distribution and tensile response anisotropy in sprayed fibre reinforced concrete,» *Materials and Structures 51:29*, pp. 1-12, 2018.

## 10 Anexos

### 10.1 Calibración de gato hidráulico y dinamómetro

Previo al ensayo del Paño 2 de la losa se realizó la calibración de ciertos elementos a utilizar durante el mismo, en particular: dinamómetro y gato hidráulico. La calibración consiste en armar el dispositivo en una prensa, la cual permite simular el ensayo y obtener valores de la fuerza aplicada en diversos escalones de carga. En la Figura 71 se muestra el dispositivo montado para la calibración. Ambos dispositivos se calibran en simultáneo.



Figura 71 – Dispositivo de calibración.

Tal como se ve en la Figura 71 se monta el dinamómetro sobre la prensa de modo de tomar medidas de fuerza. A su vez, la aplicación de la carga se realiza mediante el gato hidráulico. Dado que el dinamómetro registra los aumentos de fuerzas mediante galgas extensométricas conectadas a un Puente Wheatstone, la calibración de este consiste en comparar las medidas registradas por la prensa con las del puente. De este modo se obtiene una constante  $k_1$  que relaciona las microdeformaciones con la fuerza aplicada.

En cuanto a la calibración del gato hidráulico, se compara la presión registrada por los manómetros con la carga que indica la prensa. De este modo se obtiene una constante  $k_2$  que transforma la presión registrada por los manómetros en una fuerza.

Para las calibraciones mencionadas se realizó un ciclo de carga (ciclo 1) y otro de carga-descarga (ciclo 2). En cada uno de ellos se registró la presión del gato con dos manómetros distintos (uno digital y otro analógico), las microdeformaciones en el Puente Wheatstone y la carga en la celda de la prensa.

En la Figura 72 se muestra la relación entre las medidas que registran los dos manómetros que se utilizan. De aquí surge que, si bien la relación entre ambas medidas no es completamente lineal, se consideró que la aproximación es lo suficientemente adecuada para poder utilizar el día del ensayo únicamente el manómetro analógico.

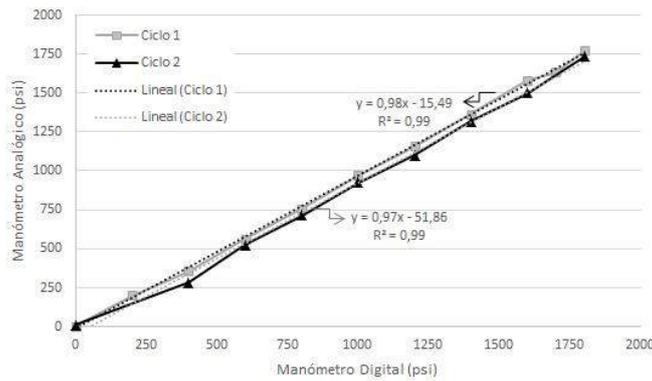


Figura 72 – Relación entre la presión registrada por el manómetro digital y el analógico.

En la Figura 73 se muestra la relación entre la carga tomada por la celda en la prensa y las deformaciones registradas por las galgas del dinamómetro. Allí se identifica que la relación entre ambas variables para el ciclo 1 fue de 2,01 mientras que para el ciclo 2 fue de 1,75. Estos valores deben ser comparados entre sí y con la constante registrada por el desarrollador del dispositivo de carga (el dinamómetro fue diseñado por Agustín Spalvier). Dicha constante es 1,76. Se obtuvieron errores relativos de 14,1 % y 0,5 % en los ciclos 1 y 2 respectivamente.

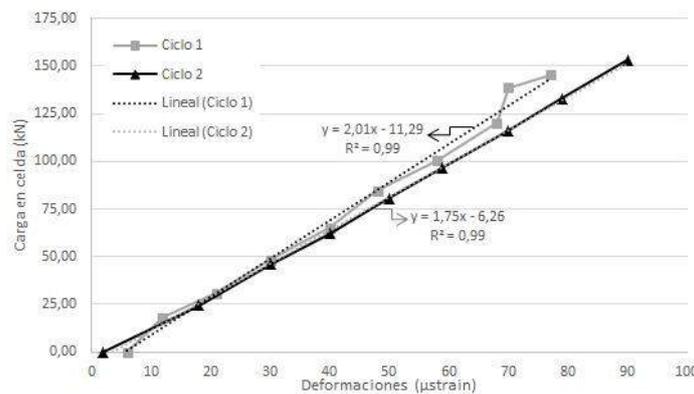


Figura 73 – Calibración del dinamómetro.

En la Figura 74 se muestra la relación entre la carga tomada en la prensa y la presión medida en el manómetro analógico. Se puede ver que en ambos ciclos la relación entre las variables analizadas es de 0,09, por lo tanto, se trabajó con esta para transformar la presión medida a valores de carga. Surge entonces de la etapa de calibración la decisión de utilizar la medida del manómetro como control de fuerza y el registro del Puente Wheastone como auxiliar.

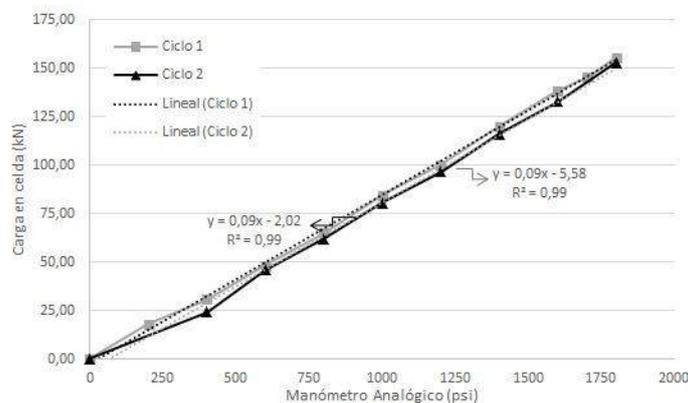


Figura 74 – Calibración del manómetro analógico.

## 10.2 Conteo de fibras

### 10.2.1 Metodología de conteo

Para realizar el conteo de fibras se desarrolló la siguiente metodología:

1. Lavado de las probetas, de modo de quitar todo el polvo que puede llegar a tapar alguna de las fibras.
2. Marcado del centro de los testigos.
3. Dibujado de cuadrículas. Las mismas cuentan con 9 “cuadrados” (en algunos casos se trata de rectángulos). Los lados de las figuras se determinan de modo que las 9 figuras tengan las mismas dimensiones. La ubicación de las cuadrículas en las caras “largas” de los testigos (aprox. 60 x 13 cm) se determina de modo que la cuadrícula central tiene su centro coincidente con el de la viga y las otras dos cuadrículas coinciden con la arista extrema de la central.
4. Indicación de la nomenclatura de cada uno de los testigos según el patrón que se indica bajo el siguiente subtítulo.
5. Mojado de las probetas de modo de mejorar las condiciones de conteo. Con la probeta mojada, es más aparente la fibra.

### 10.2.2 Nomenclatura de las cuadrículas

Dado a que se trabaja con testigos en dos orientaciones distintas respecto al cartel de referencia, se trabaja con dos estilos de nomenclatura.

Es importante que en todos los casos se define la nomenclatura trabajando con el testigo en su posición original, es decir, con su cara superior hacia arriba.

#### ***Nomenclatura I***

Para los testigos 1, 2 y 3, que cuentan con sus lados cortos paralelos al cartel de referencia, se trabajó con la siguiente nomenclatura:

- Se llamó Frontal a la cara más cercana al cartel. Allí se cuenta únicamente con una cuadrícula. La misma toma valores de 1 a 9. Para asignar estos números se trabaja mirando la cara de frente. Los valores se asignan de izquierda a derecha, de arriba hacia abajo.
- Se llamó Trasera a la cara más lejana al cartel. La nomenclatura de la cuadrícula es completamente análoga a la de la cara Frontal.
- Se llamó Izquierda a la cara que, mirando en dirección al cartel, queda a la izquierda de uno. Las tres cuadrículas se llamaron A, B y C, siendo la A la más cercana al cartel. Los valores de 1 a 9 fueron asignados de izquierda a derecha y de arriba abajo en cada una de las cuadrículas.
- Se llamó Derecha a la cara que, mirando en dirección al cartel, queda a la derecha de uno. Las tres cuadrículas se llamaron A, B y C, siendo la A la más cercana al cartel. De este modo, si se mira de frente la cara, se ven las cuadrículas C, B y A de izquierda a derecha. Los valores de 1 a 9 fueron asignados de izquierda a derecha y de arriba abajo en cada una de las cuadrículas.

#### ***Nomenclatura II***

Para el resto de los testigos (4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 y 12), que cuentan con sus lados largos paralelos al canto junto al cartel, se trabajó con la siguiente nomenclatura:

- Se llamó Izquierda a la cara que, mirando en dirección al cartel, queda a la izquierda de uno. La cuadrícula se marca del 1 al 9 de izquierda a derecha y de arriba abajo mirando de frente a la cara.
- Se llamó Derecha a la cara que, mirando en dirección al cartel, queda a la derecha de uno. La cuadrícula se marca del 1 al 9 de izquierda a derecha y de arriba abajo mirando de frente a la cara.
- Se llamó Frontal a la cara que se encuentra más cercana al cartel. La nomenclatura de las cuadrículas se hizo de izquierda a derecha (A, B y C) mirando al cartel (de espaldas a la cara). De este modo, si se mira de frente a la cara, de izquierda a derecha se leen las cuadrículas C, B y A. Los valores de 1 a 9

fueron asignados de izquierda a derecha y de arriba abajo en cada una de las cuadrículas mirando de frente a la cara.

- Se llamó Trasera a la cara que se encuentra más lejana al cartel. La nomenclatura de las cuadrículas se hizo de izquierda a derecha (A, B y C) mirando al cartel (de frente a la cara). Los valores de 1 a 9 fueron asignados de izquierda a derecha y de arriba abajo en cada una de las cuadrículas mirando de frente a la cara.

**Representación gráfica de la nomenclatura**

En la Figura 75 se muestra una representación gráfica de la nomenclatura elegida para el conteo de fibras. La misma se adjunta en modo de aclaración de las anteriores secciones.

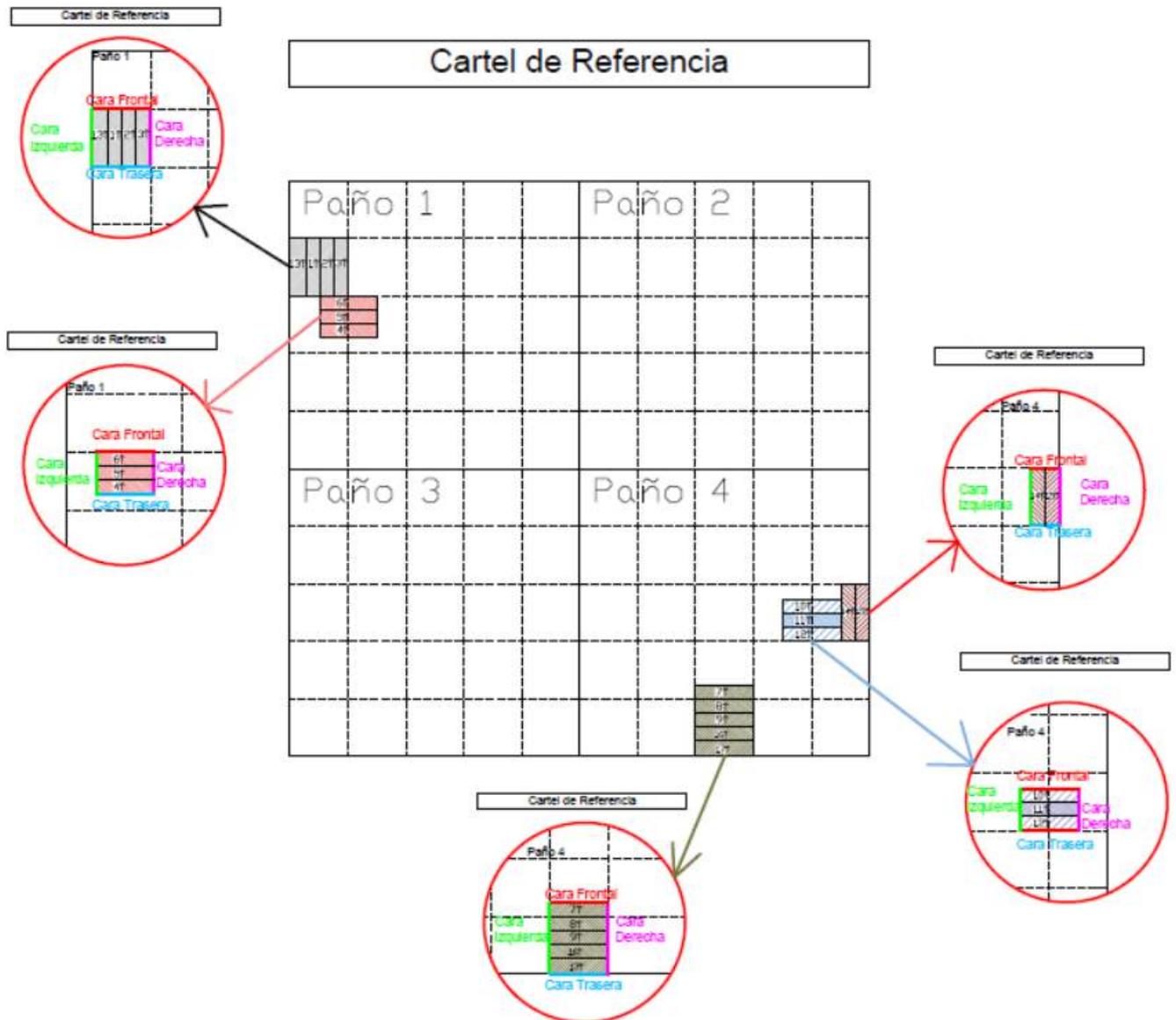


Figura 75– Representación gráfica de la nomenclatura considerada en el conteo.

**10.2.3 Resultados del conteo global**

En la Tabla 16, la Tabla 17, la Tabla 18 y la Tabla 19 se indican la totalidad de fibras contadas en los testigos 1 a 12. Con las letras F, T, I y D se representan las caras frontal, trasera, izquierda y derecha respectivamente tal como se indica en la Sección “10.2.2. Nomenclatura de las cuadrículas”.

Tabla 16 – Conteo de fibras; testigos 1, 2 y 3.

		Número de Fibras								
		Testigo 1			Testigo 2			Testigo 3		
Cara Derecha	A	7	8	8	18	14	13	20	23	12
		15	10	13	12	14	12	27	14	13
		35	26	25	23	42	45	39	34	16
	B	6	13	20	14	10	14	12	29	22
		30	19	23	20	26	28	39	26	21
		21	33	36	48	36	48	40	41	30
	C	7	11	24	20	16	15	31	17	16
		9	21	14	27	26	18	35	37	50
		26	25	38	42	43	48	39	32	24
Cara Izquierda	A	8	6	13	8	6	17	18	14	14
		16	17	20	19	13	21	12	16	10
		13	19	23	31	27	32	45	46	26
	B	10	8	12	17	14	12	17	7	13
		13	19	23	18	20	28	23	19	31
		19	24	28	28	37	23	42	33	45
	C	17	14	4	16	10	10	16	14	13
		28	26	27	20	20	15	25	24	27
		31	35	33	37	23	32	47	44	40
Caras Frontal y Trasera	F	34	29	26	34	46	22	29	50	40
		52	32	33	41	49	40	35	27	37
		43	29	35	50	39	48	29	38	36
	T	19	28	18	25	25	38	19	10	8
		27	24	18	22	16	31	20	34	25
		23	32	19	26	32	26	17	21	22

Tabla 17 – Conteo de fibras; testigos 4, 5 y 6.

		Número de Fibras								
		Testigo 4			Testigo 5			Testigo 6		
Cara Frontal	A	24	22	21	14	24	8	15	44	31
		31	32	34	28	28	27	18	35	24
		44	47	26	27	19	19	27	30	24
	B	20	18	19	19	13	12	24	10	11
		26	24	30	39	32	30	31	34	27
		32	42	44	31	28	28	28	25	16
	C	24	22	21	20	22	30	20	16	20
		31	32	34	13	24	34	41	31	31
		44	47	26	20	22	43	26	26	27
Cara Trasera	A	46	34	42	40	41	28	14	30	17
		38	33	38	31	51	42	24	22	30
		29	45	36	27	17	34	21	19	25
	B	28	28	34	17	16	21	15	18	19
		40	30	41	31	28	26	24	39	40
		27	34	39	44	36	39	26	26	27
	C	25	34	20	17	19	27	36	18	17
		37	38	40	34	36	27	50	31	20
		64	33	35	28	40	34	46	33	14
Caras Izquierda y Derecha	I	4	17	11	15	14	11	14	25	8
		30	23	35	36	31	31	21	42	30
		34	56	38	21	28	40	33	35	42
	D	17	23	24	27	16	35	17	24	29
		19	24	14	15	13	14	23	16	39
		19	29	22	12	13	22	21	15	29

Tabla 18 – Conteo de fibras; testigos 7, 8 y 9.

		Número de Fibras								
		Testigo 7			Testigo 8			Testigo 9		
Cara Frontal	A	26	28	16	19	27	20	13	10	4
		22	21	23	12	19	24	21	24	19
		28	25	19	17	17	17	49	33	37
	B	28	17	27	13	10	14	17	10	15
		33	32	24	21	20	20	22	26	15
		34	40	40	9	19	13	42	50	33
	C	10	13	15	9	17	16	20	6	16
		22	10	30	17	19	21	23	18	22
		16	23	61	24	23	8	29	20	27
Cara Trasera	A	26	26	14	4	7	15	21	17	11
		28	19	13	21	23	32	26	25	29
		18	10	9	30	31	46	31	28	21
	B	15	14	11	15	12	24	7	3	8
		16	15	29	20	31	29	27	20	22
		12	11	13	35	42	44	37	46	39
	C	9	16	13	8	10	16	10	9	6
		15	20	12	23	17	28	26	19	16
		10	15	21	32	21	32	43	47	56
Caras Izquierda y Derecha	I	25	21	29	26	34	34	25	28	18
		32	40	37	30	43	33	48	34	29
		20	31	32	32	32	41	39	50	39
	D	20	22	20	32	30	22	44	28	35
		21	29	29	23	32	27	37	48	41
		28	35	32	21	38	23	30	34	33

Tabla 19 – Conteo de fibras; testigos 10, 11 y 12.

		Número de Fibras								
		Testigo 10			Testigo 11			Testigo 12		
Cara Frontal	A	12	19	11	21	22	18	21	32	13
		12	12	16	7	13	11	12	26	15
		12	27	25	8	23	28	15	20	10
	B	36	19	19	17	12	22	21	19	14
		27	21	11	23	9	6	20	23	17
		36	19	14	42	27	21	15	13	32
	C	22	20	40	30	26	18	16	20	25
		20	30	30	29	42	31	17	19	29
		43	46	31	25	27	41	32	28	23
Cara Trasera	A	13	15	27	26	37	25	30	15	24
		12	18	10	15	23	13	46	34	10
		28	22	8	10	16	27	32	29	37
	B	16	14	19	13	18	22	26	40	11
		4	12	20	22	24	16	8	10	19
		20	26	39	34	13	22	38	30	30
	C	12	25	26	32	22	18	16	17	9
		26	37	25	31	21	22	32	7	20
		39	29	23	28	29	39	32	20	26
Caras Izquierda y Derecha	I	11	4	29	16	15	22	32	27	18
		32	31	10	26	29	21	36	21	20
		37	41	37	46	47	24	43	33	31
	D	20	19	12	25	15	18	4	7	11
		25	35	24	24	26	36	21	41	39
		26	50	35	40	36	35	40	33	45

#### 10.2.4 Resultado del conteo en sección de rotura

En la Tabla 20 se presenta la cantidad de fibras contadas en la sección de rotura de cada uno de los testigos ensayados. Las cantidades que allí se representan son el resultado de la suma de cantidades contadas en cada una de las caras, tomándose la hipótesis de que las fibras aparecen únicamente en una de las caras, es decir, que estas no se rompen en el medio, quedando la mitad en cada parte del testigo, sino que se arrancan.

Tabla 20 – Conteo en la sección de rotura.

		Número de Fibras								
		Testigo 1			Testigo 2			Testigo 3		
Sección de rotura		23	34	20	29	19	16	18	18	21
		26	14	35	24	23	22	19	42	52
		25	24	17	39	18	25	32	38	15
		Testigo 4			Testigo 5			Testigo 6		
Sección de rotura		33	29	21	22	28	19	26	19	26
		17	28	30	22	21	24	44	26	27
		19	27	29	29	27	29	32	26	32
		Testigo 7			Testigo 8			Testigo 9		
Sección de rotura		31	17	10	11	28	15	18	18	21
		27	15	22	41	24	27	19	42	52
		26	27	24	18	34	25	32	38	15
		Testigo 10			Testigo 11			Testigo 12		
Sección de rotura		28	17	22	34	22	29	20	14	14
		28	26	16	30	30	36	23	6	19
		30	34	29	33	14	20	37	46	39

### 10.3 ANOVA de una vía

En el transcurso de la investigación se trabajó con el test de Análisis de Varianza (ANOVA). La totalidad de la información que aquí se presente se basa en el artículo de Ferrero [36]. Se llama Análisis de Varianza ya que el procedimiento utiliza varianzas para determinar si las medias son diferentes. El procedimiento funciona comparando la varianza entre la media de grupo (entre-grupos) versus la varianza dentro de los grupos (intra-sujetos) como una forma de determinar si los grupos son más distintos entre sí que dentro de sí. Se trata de un ensayo de una vía debido a que se trabaja con una única variable explicativa o predictor, también llamada variable independiente. Esta variable, tal como se indicó, debe tener tres o más niveles o categorías.

En el caso particular de esta investigación, la variable independiente es la cantidad de fibras y las categorías que considerar es si el cuadrado en que se cuenta la fibra forma parte de la franja superior, media o inferior.

Los parámetros del ANOVA son:

- Hipótesis nula,  $H_0$ : las medias de todos los grupos considerados son iguales.  $\mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$ .
- Hipótesis alternativa,  $H_1$ : alguna de las medias es distinta.  $\mu_i \neq \mu_j$  para algún  $i$  y  $j$ .

Para determinar cuál es la hipótesis válida, se trabaja con un nivel alfa de significación, que en este caso se tomó del 5 %.

Elegido este valor alfa, el resultado del Test puede ser:

- Cuando el p-valor del estadístico de la prueba ANOVA es inferior al nivel alfa de significación elegido, entonces se rechaza la hipótesis nula.
- En caso contrario, no se puede rechazar la hipótesis nula. No existe diferencia estadísticamente significativa entre grupos evaluados.

Por último, en la siguiente lista se trata cada uno de los supuestos y se los evalúa para el caso particular de esta investigación.

- La variable independiente debe ser continua. Se cumple con esta hipótesis en la medida de que se trabaja con promedios de cantidades de fibras.
- La variable independiente debe estar formada por tres o más grupos. Nuevamente se cumple con la hipótesis, se trabaja con 3 categorías previamente identificadas.
- La variable independiente se distribuye normalmente en cada grupo que se compara. Este es un aspecto que será considerado en cada caso particular.
- Homogeneidad de las varianzas, es decir, las varianzas de las respuestas deben ser iguales. Este aspecto también se considera en cada caso particular.
- Las observaciones son independientes, es decir, la cantidad de fibras en un cuadrado no está influenciada por la cantidad en el cuadrado siguiente. Si bien la cantidad total de fibras está determinada por la dosificación utilizada, el hecho de trabajar con sectores particulares de la losa permite aceptar la hipótesis mencionada.
- No se debe trabajar con valores atípicos (outliers) influyentes. Estos valores son aquellos que no siguen el patrón habitual del grupo. Este ítem no fue tenido en cuenta en la investigación ya que los outliers son intrínsecos del material con el que se trabaja.

De modo de sortear las complicaciones del no-cumplimiento de alguna de las hipótesis, se sugiere:

- El ANOVA de una vía se considera una prueba robusta frente a la falta de normalidad, es decir, tolera las violaciones a este supuesto bastante bien siempre que no sea demasiada. Sin embargo, si el tamaño del grupo es pequeño, la falta de normalidad puede ser determinante. Las formas de resolver este problema son:
  - Transformar los datos para que la forma de la distribución sea normal
  - Elegir una prueba no paramétrica que no supone normalidad
- En el caso de no cumplir con la homogeneidad de varianzas, se puede aplicar el ANOVA de Welch y una prueba de Games-Howell en lugar de una prueba post-hoc de Turkey. Otra alternativa es aplicar una prueba no paramétrica.
- La falta de independencia es la falla más grave y se tiene que trabajar con otro test en caso de que no se cumpla. Tal como se identificó previamente, se trata de un supuesto que se considera correcto.

## 10.4 Procedimiento de ensayo inductivo

- Conectar las bobinas en serie con 1200 vueltas.
- Peinar los cables para que no interfieran.
- Configuración del equipo:
  - Medida de L (se elige con el botón ZLCR).

- En serie (se mantiene apretado ZLCR para indicar si es en serie o paralelo).
- Freq. 100 Hz.
- Registrar medida de L sin cerar.
- Apretar  $\Delta$ Null para cerar.
- Colocar la probeta en las bobinas (apuntar probeta ensayada).
- Dejar que se estabilice y registrar L (en la dirección correspondiente).
- Apretar  $\Delta$ Null (para sacar el cerado).
- Anotar nueva medida de L.
- Sacar la probeta
- Repetir para las otras direcciones.
- Desconectar, apagar y guardar.

### 10.5 Resultados de ensayo de losa – Paño 3

En la Tabla 21 se indican los valores de flecha para cada uno de los escalones de carga y descarga tomados por los comparadores el primer día de ensayo al Paño 3 de la losa. Por su parte, en la Tabla 22 se indican los datos correspondientes al segundo día de ensayo. Con las letras E y D se indican los escalones de carga y descarga respectivamente. Bajo las columnas Def., Carga y Pres. se colocan los valores de deformación, carga transmitida a la losa y presión en el manómetro. Por último, las columnas C1 a C7 muestran las lecturas de los comparadores en milímetros. Los campos vacíos se asocian a la decisión de prescindir de lecturas, que en la mayoría de los casos se debió a que se había alcanzado el fin del recorrido del comparador correspondiente.

Tabla 21 – Resultados de ensayo losa; paño 3; viernes.

Ciclo	Nº	Def.	Carga (kN)	Pres. (psi)	C1 (mm)	C2 (mm)	C3 (mm)	C4 (mm)	C5 (mm)	C6 (mm)	C7 (mm)
Est. Inicial	0	15	25,5	0	7,62	1,43	13,14	3,99	1,90	1,93	8,65
E1	1	19	32,3	400	7,68	1,42	14,19	4,03	1,95	2	8,65
D1	2	16	27,2	0	7,56	1,52	14,15	3,95	1,91	1,92	8,64
E2	3	25	42,5	600	7,31	1,78	14,34	4,16	2,09	2,13	8,5
D2	4	14	23,8	0	6,88	1,4	14,12	3,84	1,88	1,85	8,29
E3	5	33	56,1	800	8,93	2,2	14,62	4,42	2,35	2,36	8,83
D3	6	0	0	0	7,77	1,29	14,07	3,77	1,77	1,79	8,21
E4	7	45	76,5	1000	9,18	2,99	15,27	4,86	2,67	2,68	9,4
D4	8	9	15,3	0	7,98	1,38	14,21	3,8	1,81	1,8	9,15
E5	9	54	91,8	1200	10,11	3,63	15,83	5,3	3,5	3	9,9
D5	10	7	11,9	0	7,27	1,5	14,34	3,9	1,9	1,84	9,81
E6	11	64	108,8	1400	11,96	4,86	16,85	6,08	4,61	3,43	10,67
D6	12	7	11,9	0	8,76	1,78	14,68	4,14	2,09	1,96	10,08
E7	13	75	127,5	1600	14,34	6,5	18,74	7,3	5,43	4,22	11,82
D7	14	6	10,2	0	9,73	2,33	15,41	4,5	2,47	2,21	20,45
E8	15	83	141,1	1800	17,22	8,7	20,42	8,67	6,88	4,96	24,67
D8	16	6	10,2	0	10,04	3,14	16,37	4,78	3,26	2,53	20,85
E9	17	89	151,3	2000	21,9	11,1	23,92	10,36	7,91	5,94	26,54
D9	18	6	10,2		11,91	4,32	17,96	5,42	4,17	2,89	22,66
E10	19	92	156,4	2000	27,14	14,54	27,94	12,71	9,61	7,27	29,12
D10	20	6	10,2		14,63	5,97	20,26	6,45	5,13	3,53	23,95
E11	21	90	153	2000	31,2	16,81	31,87				
D11	22	90	153	2000	34,08	18,45	34,26	15,1	7,88	8,81	32,22
E12	23		0	0	18,14	8,02	23,3	7,61	2,44	4,25	24,6

Tabla 22 – Resultados de ensayo losa; paño 3; sábado.

Ciclo	Nº	Def.	Carga (kN)	Pres. (psi)	C1 (mm)	C2 (mm)	C3 (mm)	C4 (mm)	C5 (mm)	C6 (mm)	C7 (mm)
Est. Inicial	0	1	1,7	0	5,34	4,64	11,31	7,27	1,67	1,10	8,93
E1	1	32	54,4	800	10,96	8,67	15,13	9,83	3,30	2,66	11,05
D1	2	1	1,7	0	5,55	5,02	11,42	7,32	1,78	1,10	8,61
E2	3	70	119	1600	20,26	14,53	21,09	13,86	7,21	4,98	15,33
D2	4	1	1,7	0	6,10	5,28	11,72	7,55	1,89	1,22	8,81
E3	5	82	139,4	1800	25,19	17,37	24,53	15,75	7,88	6,10	17,56
D3	6	1	1,7	0	7,56	6,14	12,87	8,09	2,43	1,54	9,45
E4	7	84	142,8	1800	30,06	19,54	28,33	18,10	9,58	7,35	19,59
D4	8	2	3,4	0	10,89	7,76	14,89	9,71	3,49	2,34	10,91
E5	9	79	134,3	1700	35,01	22,20	31,47	20,74	10,49	8,60	21,49
D5	10	2	3,4	0	14,04	9,57	16,80	11,42	4,26	3,23	12,22
E6	11	72	122,4	1650	40,01						
D6	12	0	0	0	18,67						
E7	13	72	122,4	1600	42,4						
D7	14	0	0	0	18,82						
E8	15	70	119	1600	47,4						
D8	16	0	0	0	22,21						
E9	17	69	117,3	1600	50,38						
D9	18	0	0	0	24,65						

## 10.6 Resultados de ensayo de losa – Paño 2

La Tabla 23 muestra la totalidad de los datos recabados por los instrumentos de medida en el desarrollo del ensayo del Paño 2 de la losa. Ver Sección “10.5. Resultados de ensayo de losa – Paño 3” por la definición de los datos que se representan en las distintas columnas.

Tabla 23 – Resultados de ensayo losa; paño 2.

Ciclo	Nº	Def.	Carga (kN)	Pres. (psi)	C1 (mm)	C2 (mm)	C3 (mm)	C4 (mm)	C5 (mm)	C6 (mm)	C7 (mm)
Est. Inicial	0	0		0	5,67	13,08	30,91	3,59	4,39	6,88	11,19
E1	1			100							
D1	2			0							
E2	3	50	18,0	200	5,74	13,30	31,18	3,74	4,57	6,38	11,38
D2	4	19	-	0	5,72	13,24	31,07	3,74	4,47	6,30	11,21
E3	5	74	27,0	300	5,75	13,40	31,37	3,78	4,63	6,41	11,40
D3	6	12	-	0	5,30	13,09	31,05	3,27	4,48	6,27	11,23
E4	7	92	36,0	400	5,62	13,47	31,59	3,51	4,71	6,42	11,54
D4	8	11	-	0	5,40	13,10	31,03	3,56	4,49	6,28	11,22
E5	9	115	45,0	500	5,82	13,62	31,77	3,74	4,78	6,53	11,61
D5	10	6	-	0	5,70	13,56	31,01	3,74	4,49	6,29	11,14
E6	11	147	54,0	600	6,27	13,91	32,14	4,34	4,90	6,64	11,80
D6	12	8	-	0	5,69	13,87	31,05	3,78	4,48	6,26	11,16
E7	13	166	63,0	700	6,22	14,01	32,33	4,26	4,99	6,62	11,90
D7	14	5	-	0	5,60	13,07	31,04	3,61	4,48	6,26	11,16
E8	15	183	72,0	800	6,20	14,15	32,57	4,10	5,02	6,70	12,06
D8	16	7	-	0	5,30	13,07	31,05	3,34	4,48	6,26	11,21
E9	17	196	81,0	900	6,11	14,28	32,85	4,08	6,09	6,77	12,24
D9	18	5	-	0	5,46	13,11	31,16	3,47	4,54	6,30	11,24
E10	19	228	90,0	1000	6,59	14,57	33,30	4,44	6,30	6,90	12,46
D10	20	8	-	0	5,72	13,17	31,21	3,67	4,60	6,35	11,20
E11	21	254	99,0	1100	6,87	14,85	34,81	4,78	6,50	7,00	12,66
D11	22	6	-	0	5,74	13,20	31,31	3,82	4,67	6,34	11,30
E12	23	275	108,0	1200	7,02	15,23	34,42	5,03	6,70	7,06	13,04
D12	24	8	-	0	6,65	13,35	31,52	3,71	4,71	6,39	11,38
E13	25	300	117,0	1300	7,13	15,55	35,03	5,18	5,89	7,21	13,32
D13	26	12	-	0	5,32	13,40	31,79	3,79	4,79	6,48	11,51
E14	27	310	126,0	1400	6,78	15,73	35,38	5,26	6,00	7,30	13,50
D14	28	15	-	0	5,29	13,45	31,88	3,83	4,84	6,53	11,55
E15	29	334	135,0	1500	7,06	16,24	36,15	5,54	6,24	7,60	14,90
D15	30	16	-	0	5,31	13,58	32,09	3,90	4,89	6,65	11,65

E16	31	362	144,0	1600	7,55	16,90	37,20	5,81	6,56	8,00	14,49
D16	32	15	-	0	5,47	13,80	32,47	3,86	5,01	6,94	11,88
E17	33	380	153,0	1700	7,90	17,47	38,16	6,14	6,81	8,35	14,94
D17	34	19,0	-		5,59	13,93	32,78	4,00	5,09	7,10	12,00
E18	35	404	162,0	1800	8,30	18,11	39,22	6,74	7,16	8,71	15,46
D18	36	19	-	0	5,74	14,23	33,15	4,18	5,22	7,33	13,22
E19	37	428	171,0	1900	8,90	19,17	40,70	7,38	7,64	9,33	16,28
D19	38	20	-	0	5,90	14,61	33,68	4,40	5,39	7,62	12,54
E20	39	444	180,0	2000	9,62	20,36	42,63	8,27	8,20	10,00	17,30
D20	40	19	-	0	6,53	15,06	34,45	4,45	5,59	8,00	13,00
E21	41	452	189,0	2100	10,72	21,72	44,86	8,97	9,02	10,77	18,51
D21	42	14	-	0	6,69	15,56	35,24	4,70	5,90	8,36	13,38
E22	43	463	193,5	2150	12,47	24,75	49,34	10,93	10,46	12,07	19,90
D22	44	25	-	0	7,40	16,62	36,34	5,54	6,56	8,97	14,59
E23	45	24	-	0	7,40	16,62	30,26	5,21	6,35	8,89	14,20
D23	46	498	200,7	2230	14,88	28,69	49,00	13,74	12,30	14,07	24,42
E24	47	28	-	0	7,45	18,60	33,39	6,71	7,41	10,10	16,04
D24	48	492	203,4	2260	17,56	32,74	54,60	16,84	14,32	16,38	27,84
E25	49	25	-	0	10,00	20,90	36,88	8,41	8,53	11,26	17,89
D25	50	482	198,9	2210	19,44	35,04	59,35	18,55	15,53	17,59	29,76
E26	51	24	-	0	11,18	20,22	39,15	9,35	9,32	12,17	19,00
D26	52	469	198,0	2200	21,11	41,20	69,75	23,52	18,07	21,93	36,15
E27	53	20	-	0	15,33	26,23	45,91	12,72	11,53	14,61	22,45
D27	54		-	0	15,23	20,90	28,10	12,65	11,48	14,57	22,20
E28	55		180,0	2000	34,91	47,91	71,43	40,44	23,14	27,66	44,52
D28	56	21	-		25,36	30,55	44,00	24,90	15,09	20,80	30,23

## 10.7 Resultados del test ANOVA

En la Tabla 24 se indican los resultados del Test Anova para cada una de las cinco discriminaciones con las que se trabajó (ver Sección “3.7.3. *Determinación de la concentración de fibras mediante ANOVA*”). Por su parte, la Tabla 25 muestra los resultados para cada testigo individual. Los datos representados en las tablas son la cantidad total de cuadrados considerados en cada caso, el p-valor asociado a los Test Anova, Kruskal-Wallis y Anova de Welch, si existe o no diferencia entre las variables

consideradas (así como el p-valor asociado a dicha diferencia cuando se utiliza el Test post-hoc de Turkey) y los valores que toman el promedio y la desviación estándar en cada caso.

Tabla 24 – Resultado del Test ANOVA para cinco discriminaciones.

Discriminación: por momentos																	
Discriminación: todos los testigos				Momento Positivo				Momento Negativo				Momento Medio					
Cuadrados Considerados		864		Cuadrados Considerados		288		Cuadrados Considerados		288		Cuadrados Considerados		288			
ANOVA		p-valor		ANOVA		p-valor		ANOVA		p-valor		ANOVA		p-valor			
Kruskal-Wallis		< 0,00001		Kruskal-Wallis		N/A		Kruskal-Wallis		< 0,00001		Kruskal-Wallis		< 0,00001			
ANOVA de Welch		2,01E-35		ANOVA de Welch		N/A		ANOVA de Welch		9,33E-11		ANOVA de Welch		8,37E-11			
Turkey	S vs M	S vs I	M vs I	Turkey	S vs M	S vs I	M vs I	Turkey	S vs M	S vs I	M vs I	Turkey	S vs M	S vs I	M vs I		
p-valor	Dif	Dif	Dif	p-valor	2,5E-06	1,2E-10	5,0E-05	p-valor	Dif	Dif	Dif	p-valor	Dif	Dif	Dif		
Superior		Media		Inferior		Superior		Media		Inferior		Superior		Media		Inferior	
Avg	18,8	24,8	30,3	Avg	17,7	24,7	30,7	Avg	20,5	26,0	31,1	Avg	19,5	24,8	29,4		
St Dev	8,4	8,9	10,8	St Dev	9,2	9,6	9,9	St Dev	8,8	9,5	11,5	St Dev	8,4	9,0	10,7		
Discriminación: por paños								Discriminación: por orientación respecto al borde									
Paño 1				Paño 2				Borde más cercano paralelo				Borde más cercano perpendicular					
Cuadrados Considerados		432		Cuadrados Considerados		432		Cuadrados Considerados		432		Cuadrados Considerados		432			
ANOVA		p-valor		ANOVA		p-valor		ANOVA		p-valor		ANOVA		p-valor			
Kruskal-Wallis		< 0,00001		Kruskal-Wallis		N/A		Kruskal-Wallis		N/A		Kruskal-Wallis		N/A			
ANOVA de Welch		N/A		ANOVA de Welch		< 0,00001		ANOVA de Welch		1,2E-23		ANOVA de Welch		8,3E-14			
Turkey	S vs M	S vs I	M vs I	Turkey	S vs M	S vs I	M vs I	Turkey	S vs M	S vs I	M vs I	Turkey	S vs M	S vs I	M vs I		
p-valor	5,8E-10	1,2E-10	1,1E-04	p-valor	Dif	Dif	Dif	p-valor	Dif	Dif	Dif	p-valor	Dif	Dif	Dif		
Superior		Media		Inferior		Superior		Media		Inferior		Superior		Media		Inferior	
Avg	19,6	27,0	31,7	Avg	18,8	23,3	29,1	Avg	17,5	24,3	31,0	Avg	20,9	26,0	29,8		

St Dev	9,5	9,5	9,8	St Dev	8,2	9,0	11,5	St Dev	9,1	8,8	11,2	St Dev	8,4	9,9	10,3
<b>Discriminación por subgrupos en cada paño</b>															
<b>Testigos 1-3</b>				<b>Testigos 4-6</b>				<b>Testigos 7-9</b>				<b>Testigos 10-12</b>			
<b>Cuadrados Considerados</b>		216		<b>Cuadrados Considerados</b>		216		<b>Cuadrados Considerados</b>		216		<b>Cuadrados Considerados</b>		216	
	p-valor				p-valor				p-valor				p-valor		
ANOVA	< 0,00001			ANOVA	< 0,00001			ANOVA	N/A			ANOVA	N/A		
Kruskal-Wallis	N/A			Kruskal-Wallis	N/A			Kruskal-Wallis	< 0,00001			Kruskal-Wallis	< 0,00001		
ANOVA de Welch	N/A			ANOVA de Welch	N/A			ANOVA de Welch	1,2E-09			ANOVA de Welch	8,1E-08		
Turkey	S vs M	S vs I	M vs I	Turkey	S vs M	S vs I	M vs I	Turkey	S vs M	S vs I	M vs I	Turkey	S vs M	S vs I	M vs I
p-valor	1,8E-04	1,1E-10	9,6E-08	p-valor	3,6E-07	1,1E-07	9,7E-01	p-valor	Dif	Dif	Dif	p-valor	No dif	Dif	Dif
	Superior	Media	Inferior		Superior	Media	Inferior		Superior	Media	Inferior		Superior	Media	Inferior
Avg	17,3	23,8	32,8	Avg	21,9	30,3	30,6	Avg	17,7	24,0	29,2	Avg	20,0	21,7	29,0
St Dev	9,5	9,6	9,2	St Dev	8,9	8,2	10,3	St Dev	8,6	6,8	12,7	St Dev	7,7	9,6	10,2

Tabla 25 – Resultado del Test ANOVA para cada testigo.

<b>Testigo 1</b>				<b>Testigo 2</b>				<b>Testigo 3</b>				<b>Testigo 4</b>			
<b>Cuadrados Considerados</b>		72		<b>Cuadrados Considerados</b>		72		<b>Cuadrados Considerados</b>		72		<b>Cuadrados Considerados</b>		72	
	p-valor				p-valor				p-valor				p-valor		
ANOVA	3,05E-06			ANOVA	1,88E-08			ANOVA	6,89E-06			ANOVA	2,14E-05		
Kruskal-Wallis	N/A			Kruskal-Wallis	N/A			Kruskal-Wallis	N/A			Kruskal-Wallis	N/A		
ANOVA de Welch	N/A			ANOVA de Welch	N/A			ANOVA de Welch	N/A			ANOVA de Welch	N/A		
Turkey	S vs M	S vs I	M vs I	Turkey	S vs M	S vs I	M vs I	Turkey	S vs M	S vs I	M vs I	Turkey	S vs M	S vs I	M vs I
p-valor	8,2E-03	1,6E-06	4,4E-02	p-valor	<b>1,6E-01</b>	2,0E-08	3,2E-05	p-valor	Dif	Dif	Dif	p-valor	1,8E-02	1,2E-05	<b>7,8E-02</b>
	Superior	Media	Inferior		Superior	Media	Inferior		Superior	Media	Inferior		Superior	Media	Inferior
Promedio	14,6	22,0	28,0	Promedio	18,1	23,2	36,1	Promedio	19,3	26,1	34,4	Promedio	24,1	31,4	37,2
St Dev	8,5	9,3	7,3	St Dev	9,6	9,5	36,1	St Dev	10,2	9,8	9,4	St Dev	9,2	6,9	10,7

Testigo 5				Testigo 6				Testigo 7				Testigo 8			
Cuadrados Considerados		72		Cuadrados Considerados		72		Cuadrados Considerados		72		Cuadrados Considerados		72	
	p-valor				p-valor				p-valor				p-valor		
ANOVA	0,0056			ANOVA	0,0006			ANOVA	<b>0,123</b>			ANOVA	4,84E-10		
Kruskal-Wallis	N/A			Kruskal-Wallis	N/A			Kruskal-Wallis	N/A			Kruskal-Wallis	N/A		
ANOVA de Welch	N/A			ANOVA de Welch	N/A			ANOVA de Welch	N/A			ANOVA de Welch	N/A		
Turkey	S vs M	S vs I	M vs I	Turkey	S vs M	S vs I	M vs I	Turkey	S vs M	S vs I	M vs I	Turkey	S vs M	S vs I	M vs I
p-valor	7,9E-03	2,8E-02	<b>8,9E-01</b>	p-valor	4,2E-04	3,0E-02	<b>3,3E-01</b>	p-valor	<b>No dif</b>	<b>No dif</b>	<b>No dif</b>	p-valor	6,5E-02	1,5E-02	<b>8,3E-01</b>
	Superior	Media	Inferior		Superior	Media	Inferior		Superior	Media	Inferior		Superior	Media	Inferior
Promedio	21,1	29,2	28,0	Promedio	20,5	30,1	26,7	Promedio	19,2	23,8	24,3	Promedio	18,1	24,4	26,0
St Dev	8,9	9,1	9,3	St Dev	8,6	8,7	7,6	St Dev	6,4	8,1	12,5	St Dev	8,8	6,8	12,2

Testigo 9				Testigo 10				Testigo 11				Testigo 12			
Cuadrados Considerados		72		Cuadrados Considerados		72		Cuadrados Considerados		72		Cuadrados Considerados		72	
	p-valor				p-valor				p-valor				p-valor		
ANOVA	N/A			ANOVA	0,000491			ANOVA	0,007359			ANOVA	0,005884		
Kruskal-Wallis	< 0,00001			Kruskal-Wallis	N/A			Kruskal-Wallis	N/A			Kruskal-Wallis	N/A		
ANOVA de Welch	1,14E-08			ANOVA de Welch	N/A			ANOVA de Welch	N/A			ANOVA de Welch	N/A		
Turkey	S vs M	S vs I	M vs I	Turkey	S vs M	S vs I	M vs I	Turkey	S vs M	S vs I	M vs I	Turkey	S vs M	S vs I	M vs I
p-valor	Dif	Dif	Dif	p-valor	<b>8,2E-01</b>	7,8E-04	5,3E-03	p-valor	<b>9,9E-01</b>	1,4E-02	2,2E-02	p-valor	<b>5,1E-01</b>	Dif	<b>8,4E-01</b>
	Superior	Media	Inferior		Superior	Media	Inferior		Superior	Media	Inferior		Superior	Media	Inferior
Promedio	15,9	26,5	37,2	Promedio	19,2	20,8	29,7	Promedio	21,3	21,7	28,7	Promedio	19,5	22,6	28,6
St Dev	10,2	9,1	9,4	St Dev	8,3	9,2	10,9	St Dev	6,1	9,1	10,8	St Dev	8,8	10,8	9,3

## 10.8 Dimensiones de los testigos

Las dimensiones relevadas de los testigos se muestran en la Tabla 26.

Tabla 26 – Dimensiones de los testigos.

N° testigo	Paño	Largo (cm)	Ancho (cm)	Espesor (cm)
1	1	59,20	14,10	13,76
2	1	59,40	15,00	13,80
3	1	59,90	14,88	14,16
4	1	59,80	15,00	13,86
5	1	60,02	15,22	13,94
6	1	60,25	14,62	14,04
7	4	61,60	14,72	12,38
8	4	61,70	15,00	12,34
9	4	61,65	15,06	12,44
10	4	60,10	14,68	12,62
11	4	59,90	15,16	12,72
12	4	59,70	14,94	12,82
13	1	59,45	15,42	13,92
14	4	61,40	15,00	12,52
15	4	61,50	15,14	12,56
16	4	61,65	15,14	12,20
17	4	61,55	15,02	12,22

## 10.9 Resultados del ensayo Inductivo

Los resultados del Ensayo Inductivo se indican en la Tabla 27 y la Tabla 28. La nomenclatura elegida para representar los resultados resulta engorrosa y se sugiere adoptar una propia en caso de procesar datos similares. Lo importante es que en este caso se tomaron medidas de Inductancia en secciones separadas 5 cm entre sí y comenzando a una distancia de 7,5 cm del borde del testigo. La nomenclatura adoptada en este caso para cada una de las secciones consideradas se explica a continuación (ver Sección “10.2.2. Nomenclatura de las cuadrículas”):

- C101: corresponde a la sección que limita al cuadrado C con la parte no nombrada del testigo
- C12: corresponde a la sección que divide C1 con C2
- C23: corresponde a la sección que divide C2 con C3
- C31: corresponde a la sección que divide C3 con B1
- B12: corresponde a la sección que divide B1 con B2
- B23: corresponde a la sección que divide B2 con B3
- B31: corresponde a la sección que divide B3 con A1
- A12: corresponde a la sección que divide A1 con A2
- A23: corresponde a la sección que divide A2 con A3
- A310: corresponde a la sección que divide A3 con la parte no nombrada del testigo

Tabla 27 – Resultado del Ensayo Inductivo.

	T - 1 (L)	T - 2 (L)	T - 3 (L)	T - 4 (L)	T - 8 (L)	T - 9 (L)	T - 10 (L)
<b>C101</b>	33	49,9	36	35	45,39	56,8	39,8
<b>C12</b>	43	60,8	53,7	43,3	61,6	61,8	48,4
<b>C23</b>	48,5	69,5	63,4	49,2	62,2	62,8	50,7
<b>C31</b>	54,7	74,6	65,2	52,9	63,9	63,8	52,9
<b>B12</b>	60,9	78	69,2	54,1	64,5	64	57,7
<b>B23</b>	63,2	79,4	72,3	54,1	65,1	62,8	59,5
<b>B31</b>	65,8	80,5	73,3	52,7	65,6	61,9	61,1
<b>A12</b>	67,9	79,8	75,6	50,6	66,2	61,2	60,5
<b>A23</b>	68,2	75,7	73,4	45,1	66,24	57,8	56,9
<b>A310</b>	60,4	66,2	64	33,6	62,1	50,5	46

La nomenclatura asociada a la Tabla 28 es distinta y se indica a continuación:

- A101: corresponde a la sección que limita al cuadrado A con la parte no nombrada del testigo
- A12: corresponde a la sección que divide A1 con A2
- A23: corresponde a la sección que divide A2 con A3
- A31: corresponde a la sección que divide A3 con B1
- B12: corresponde a la sección que divide B1 con B2
- B23: corresponde a la sección que divide B2 con B3
- B31: corresponde a la sección que divide B3 con C1
- C12: corresponde a la sección que divide C1 con C2
- C23: corresponde a la sección que divide C2 con C3
- C310: corresponde a la sección que divide C3 con la parte no nombrada del testigo

Tabla 28 – Resultado del Ensayo Inductivo.

	T - 5 (L)	T - 6 (L)	T - 7 (L)	T - 11 (L)	T - 12 (L)
<b>A101</b>	43,3	53,9	45,9	51,7	46,5
<b>A12</b>	57,3	62,5	54,2	60,3	59,4
<b>A23</b>	60,7	69,3	54,3	64	63,1
<b>A310</b>	64	74,4	56	66,4	65
<b>B12</b>	66,6	75,9	55,4	66,8	65,9
<b>B23</b>	65,6	75,6	49,8	66,4	66,2
<b>B31</b>	62,9	72,4	48,2	65,1	64,2
<b>C12</b>	59,6	65,2	47,7	62,3	61,7
<b>C23</b>	51,6	60,3	45,5	55,6	57,4
<b>C310</b>	42,5	51,2	38,7	47,2	49

### 10.10 Generación y propagación de fisuras en el ensayo a flexión

La intención del presente Anexo es mostrar la generación y propagación de fisuras. Tal como se identificará en las imágenes que se presentan, en la mayoría de los casos una única fisura principal es la cuál sufre la apertura. Desde la Figura 76 a la Figura 88 se muestra el patrón de fisuración asociado a cada uno de los ensayos a flexión. Con color rojo se indica el centro de los testigos y con color negro se resalta la posición de la fisura principal. En los casos en que la fisura se aproxima a una recta paralela al centro del testigo, se considera como posición de esta, una recta representada en color negro. Todas las figuras cuentan con la ubicación de la fisura principal respecto al centro del testigo calculada en centímetros.

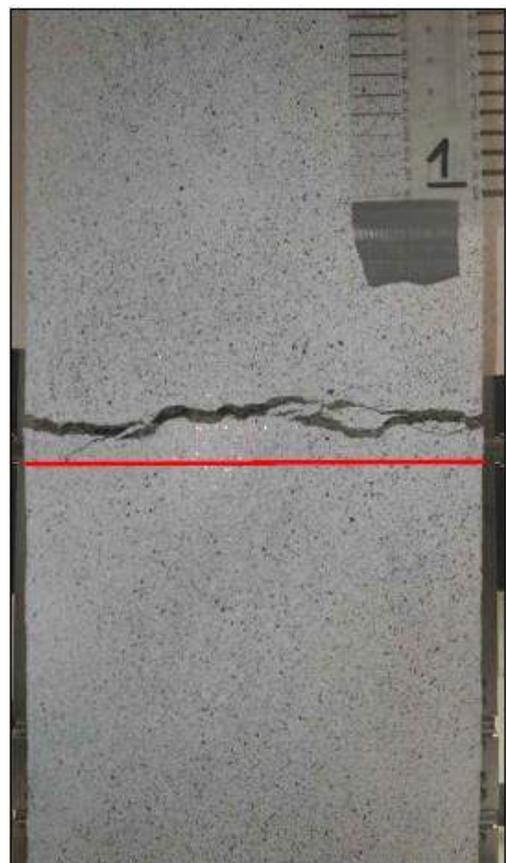
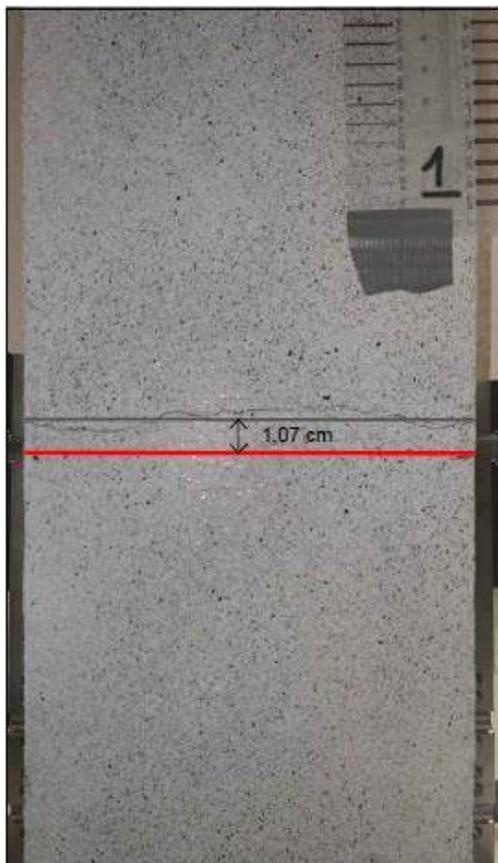


Figura 76 – Patrón de fisuración del Testigo 1.

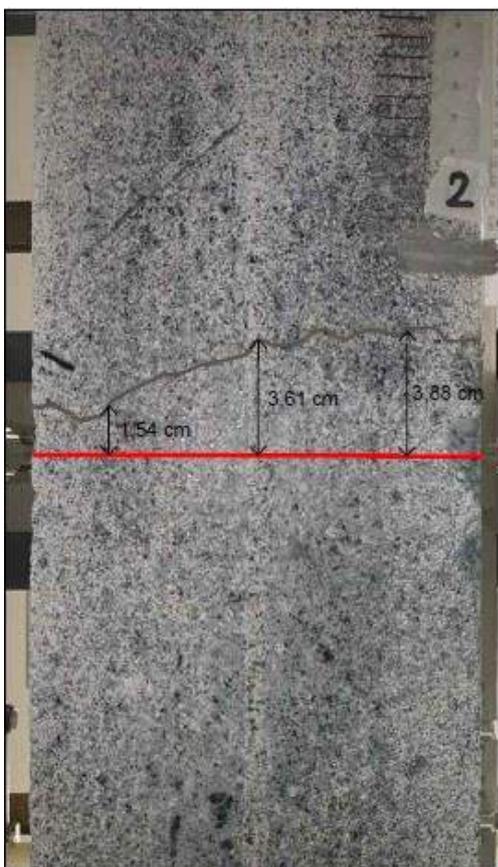


Figura 77 – Patrón de fisuración del Testigo 2.

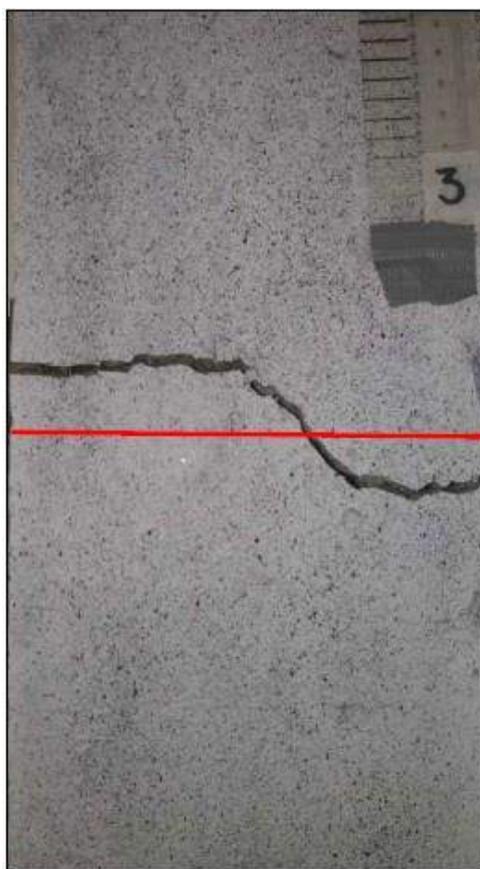
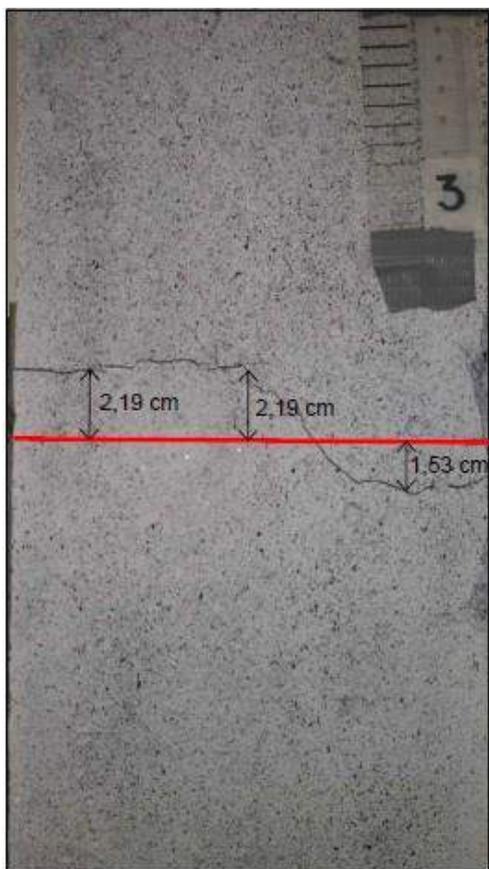


Figura 78 – Patrón de fisuración del Testigo 3.

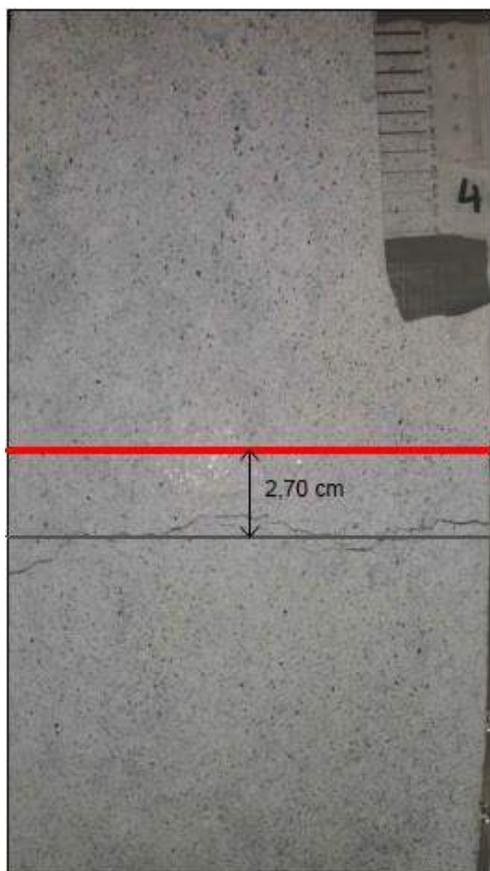


Figura 79 – Patrón de fisuración del Testigo 4.

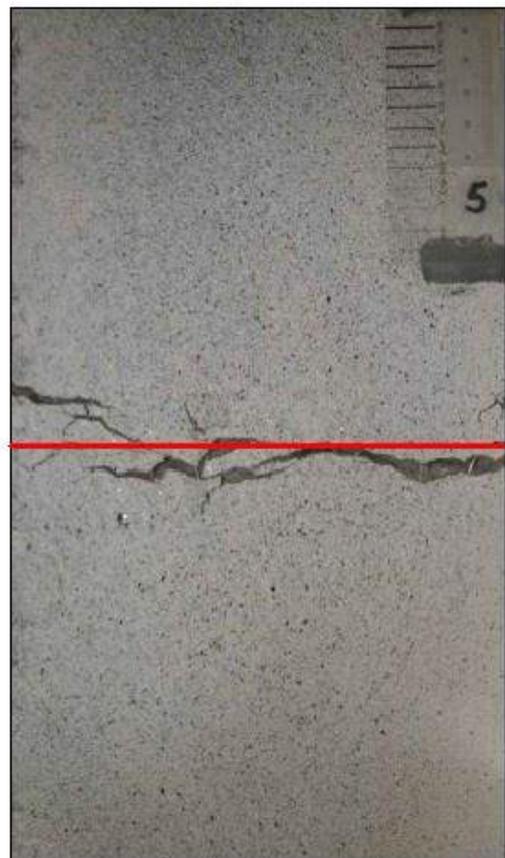
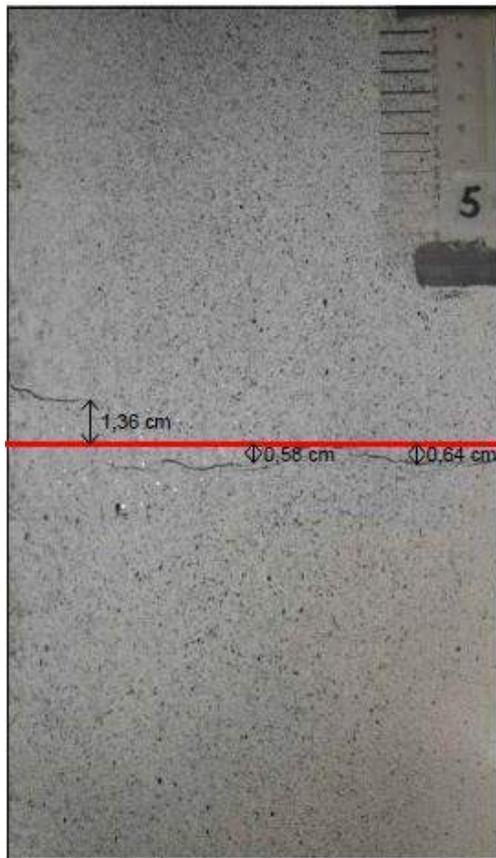


Figura 80 – Patrón de fisuración del Testigo 5.

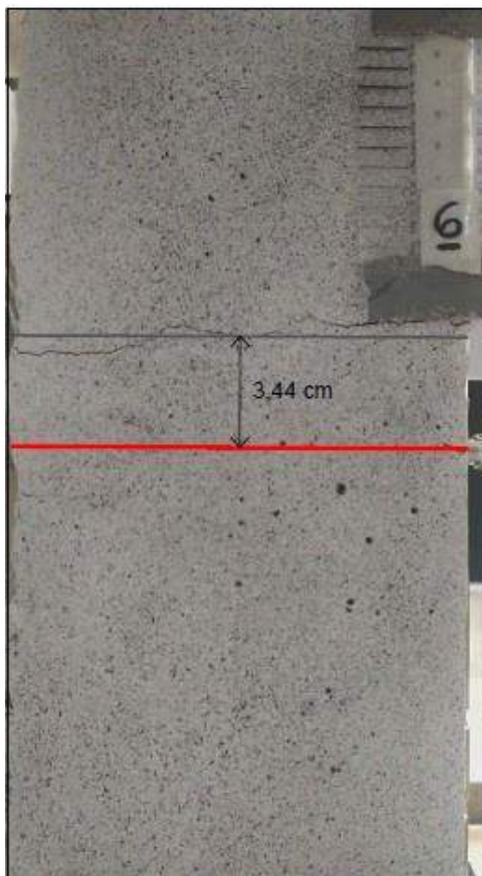


Figura 81 – Patrón de fisuración del Testigo 6.



Figura 82 – Patrón de fisuración del Testigo 7.

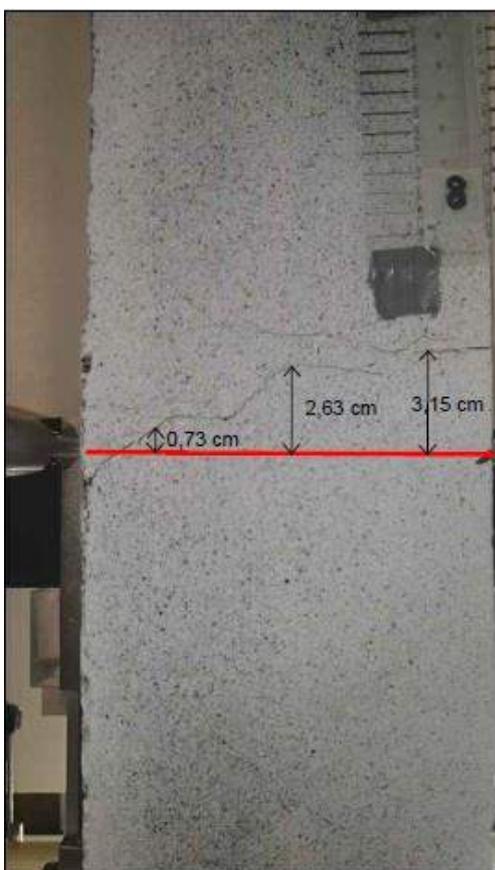


Figura 83 – Patrón de fisuración del Testigo 8.

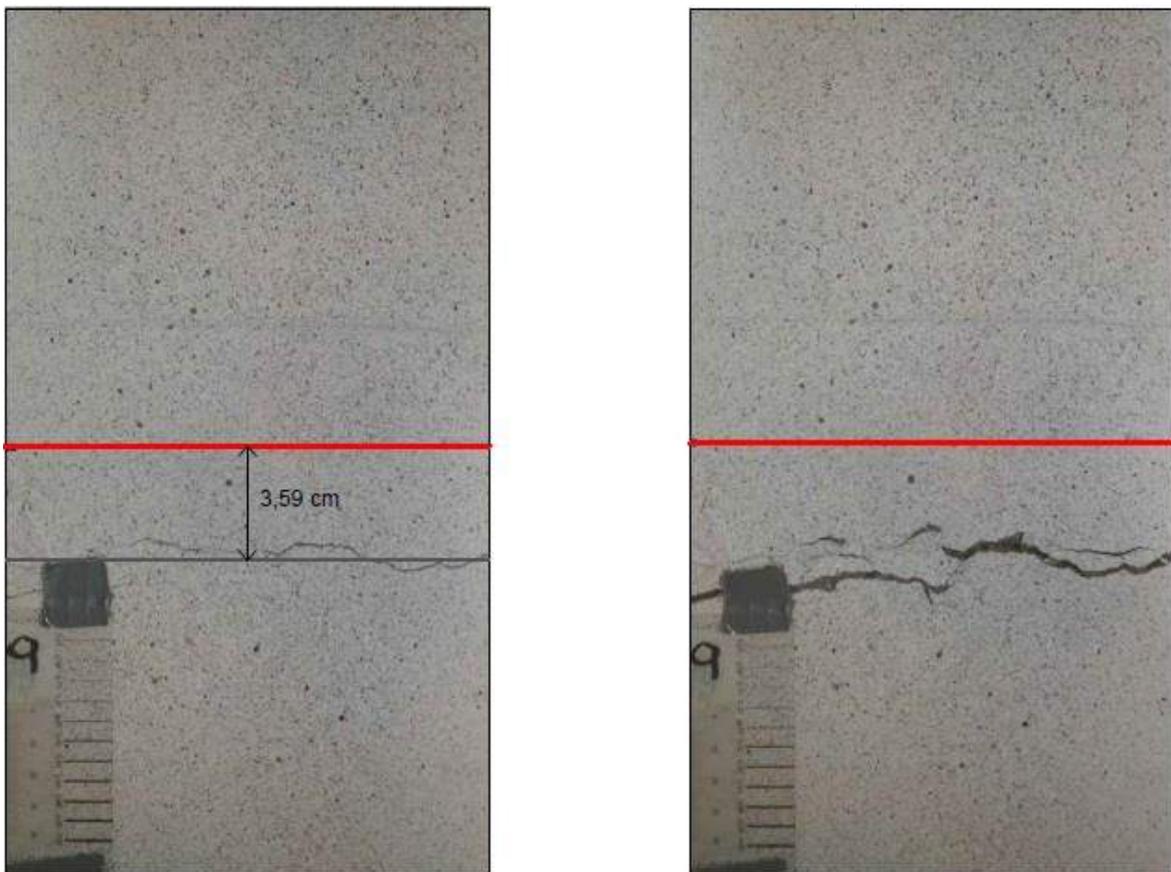


Figura 84 – Patrón de fisuración del Testigo 9.

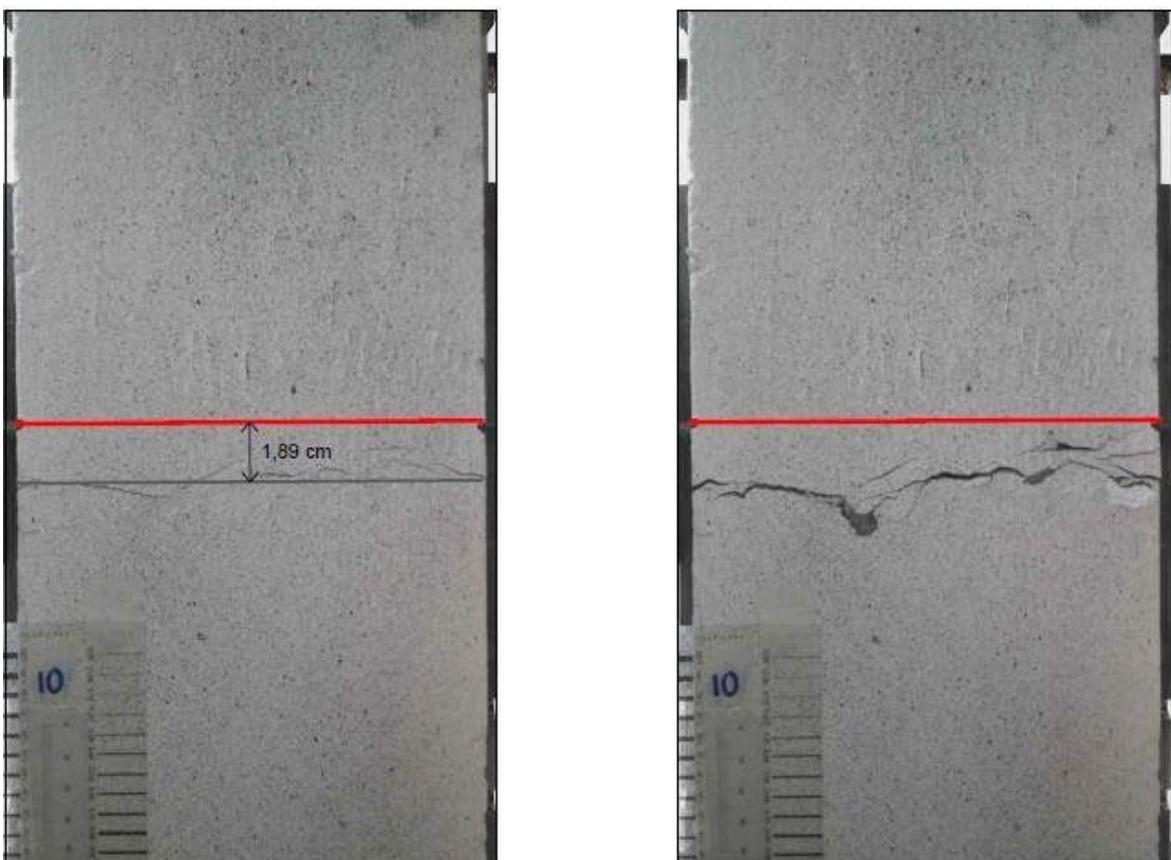


Figura 85 – Patrón de fisuración de Testigo 10.

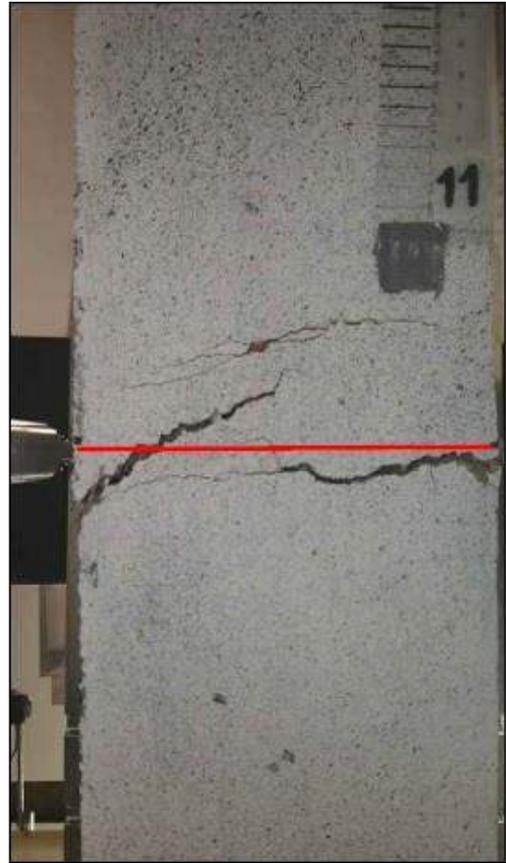
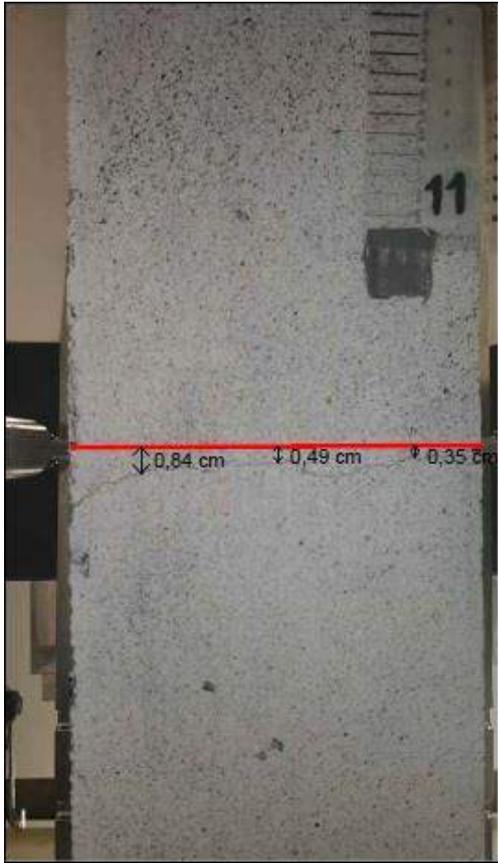


Figura 86 – Patrón de fisuración del Testigo 11.

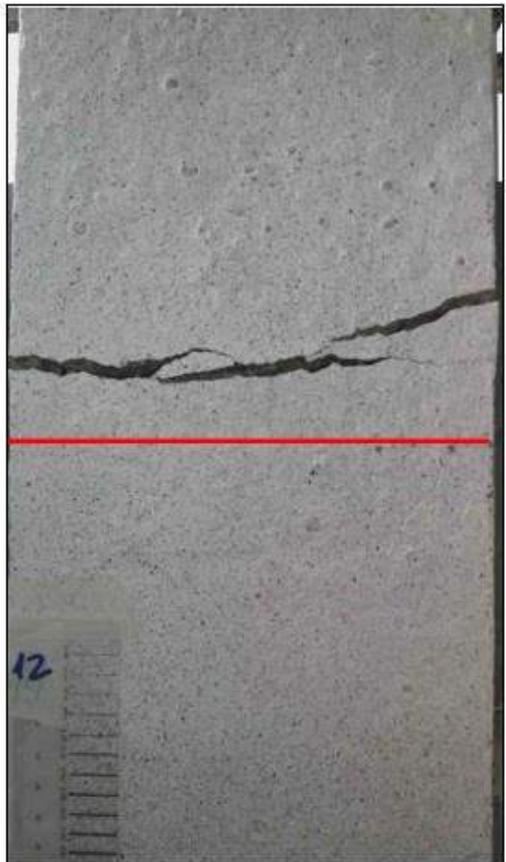
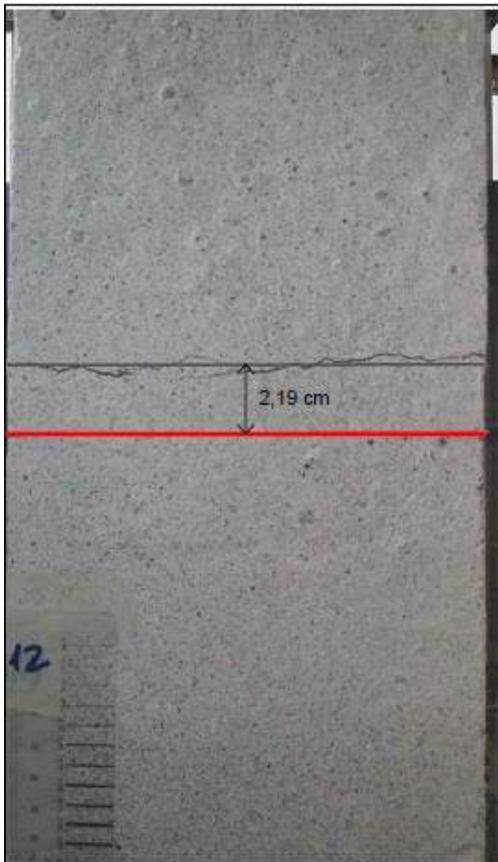


Figura 87 – Patrón de fisuración del Testigo 12.

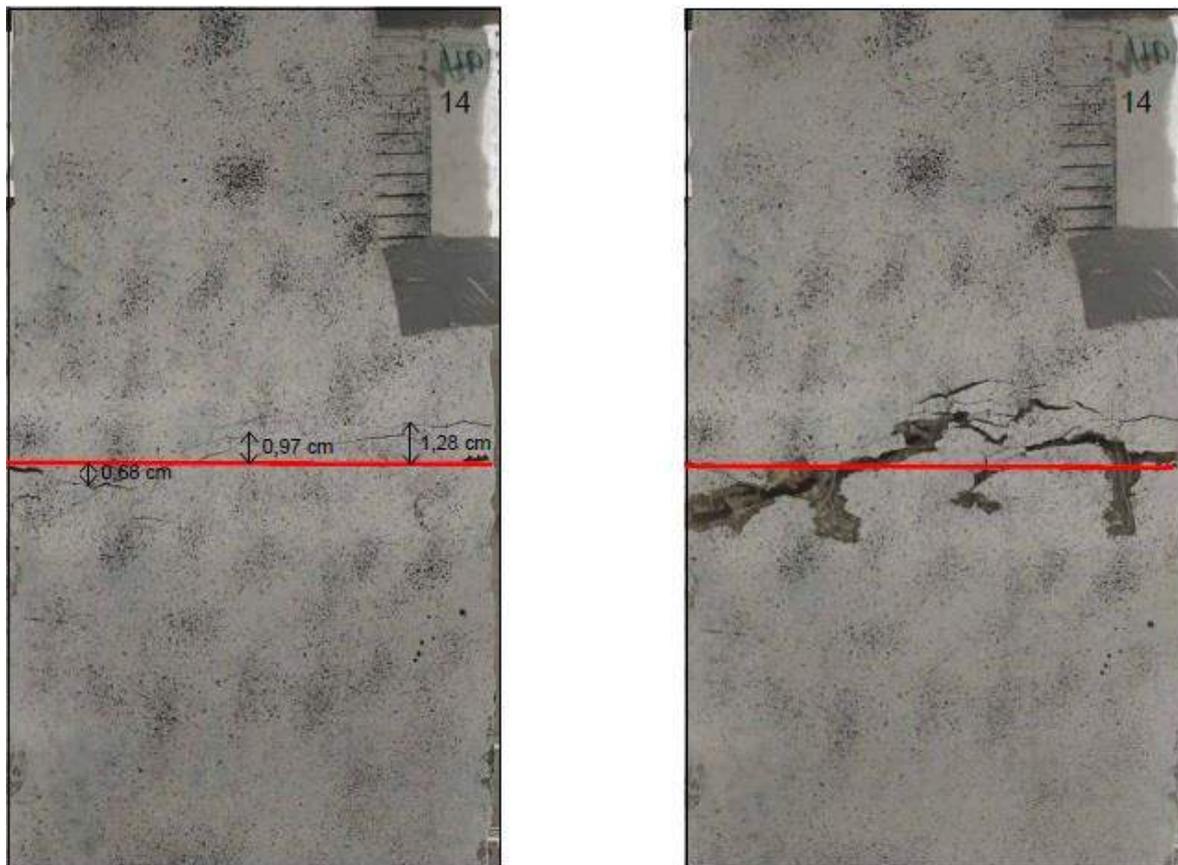


Figura 88 – Patrón de fisuración del Testigo 14.

### 10.11 Curvas fuerza – flecha para el paño 2 de la losa

A continuación, se adjunta la Figura 82 que corresponde a la ampliación de la Figura 42 de la Sección “5.2. Ensayo a la losa”.

# Proyecto de Investigación e Innovación en Ingeniería Estructural

