



Estudio experimental y numérico de elementos estructurales de Hormigón Reforzado con Fibras

Santiago Infante

Mauricio Porcelli

Agustín Silveira

Programa de grado en Ingeniería Civil

Instituto de Estructuras y Transporte

Facultad de Ingeniería

Universidad de la República

Montevideo – Uruguay

Octubre de 2019



Estudio experimental y numérico de elementos estructurales de Hormigón Reforzado con Fibras

Santiago Infante

Mauricio Porcelli

Agustín Silveira

Tesina correspondiente a la asignatura Proyecto de Investigación e Innovación en Ingeniería Estructural de la Carrera Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República, como parte de los requisitos necesarios para la obtención del título de Ingeniero Civil, perfil Estructuras.

Tutor:

Prof. Dr.Ing. Luis Segura

Montevideo – Uruguay

Octubre de 2019

Estudio experimental y numérico de elementos estructurales de Hormigón Reforzado con Fibras / Santiago Infante, Mauricio Porcelli, Agustín Silveira. - Montevideo: Universidad de la República, Facultad de Ingeniería, 2019.

XVII, 82 p.: il.; 30 cm.

Tutor: Luis Segura.

Cotutor: Nombres del co tutor/a Apellidos del cotutor/a.

Tesina de grado - Universidad de la República. Facultad de Ingeniería, Instituto de Estructuras y Transporte, Programa de grado, Ingeniería Civil, 2019.

Referencias bibliográficas: 76 – 77.

1. Hormigón reforzado con fibras metálicas, 2. Ensayo de flexión a tres puntos, 3. Losas elevadas, 4. Diseño de Mezclas de Hormigón, 5. Líneas de rotura. I. Porcelli, Mauricio. II. Silveira, Agustín. III. Infante, Santiago. IV. Universidad de la República, Facultad de Ingeniería, Instituto de Estructuras y Transporte.

INTEGRANTES DEL TRIBUNAL DE DEFENSA DE TESIS

Dr.Ing. Gonzalo Cetrangolo

Arq. Iliana Rodriguez

Ing. Diego Figueredo

Montevideo – Uruguay

Octubre de 2019

Agradecimientos

Nos gustaría agradecer a Mauricio Montaña, Ramiro Rodríguez, Ignacio Horta y en general al personal de ABENGOA TEYMA, quienes siempre tuvieron gran disposición hacia nuestro trabajo, haciendo todo lo que estaba a su alcance para conseguir instalaciones, equipos, materiales y en general todo lo que les solicitamos para el desarrollo de nuestra investigación.

A Patricia y a todo el personal del laboratorio de la Dirección Nacional de Vialidad - MTOP, que fueron de gran ayuda compartiendo sus instalaciones, además de presentar gran interés en nuestro trabajo, participando de forma activa con nosotros.

A su vez, la realización del proyecto fue posible gracias al apoyo de los siguientes organismos y empresas: ANII, Ferrocement, Atenko y Guardia Republicana - Ministerio del Interior.

Por la UdelaR, agradecer a Alvaro Gutierrez, Mariano Neme, Nicolás García, Agustín Spalvier, Iliana Rodriguez, Diego Gonzalez, Guzman Rippe, Viviana Sfeir, Emiliano Espinoza y Juan Graña, cuyas colaboraciones fueron fundamentales a lo largo de la campaña experimental.

A Sergio Cavalaro, por aportar sus conocimientos en la materia.

A nuestras familias y amigos por apoyarnos en todo momento.

Y especialmente a Luis Segura, nuestro tutor, quien nos acompañó y guió durante todo este proyecto.

*”Todo debe hacerse tan simple
como sea posible, pero no más
simple que eso”*

Albert Einstein

RESUMEN

El hormigón armado ha sido uno de los materiales más utilizados en la industria de la construcción en el último siglo. Esta razón ha motivado al desarrollo de la tecnología del material en busca de optimizar su aplicación y minimizar sus desventajas. En la actualidad, el estudio de la aplicación de las fibras metálicas como único refuerzo en el hormigón de alta responsabilidad estructural, se perfila como un avance prometedor en cuanto a reducción de costos y tiempos de ejecución.

Hoy en día, las normativas europea (Model Code, 2010) y americana (ACI Committee 544, 2015) presentan guías y recomendaciones para el diseño, cálculo y ejecución del hormigón reforzado con fibras metálicas (HRFM) para uso estructural. A su vez, en el plano de la investigación, se han realizado modelos a gran escala de elementos estructurales de HRFM para estudiar el comportamiento del material y la viabilidad de su inserción en la industria de la construcción.

El objetivo principal de este trabajo es ejecutar y evaluar el comportamiento estructural de un prototipo de losa elevada a escala real de HRFM sin refuerzo tradicional. En particular se pone énfasis en conocer la capacidad de carga máxima y el grado de ductilidad de la estructura. Este proyecto no tiene antecedentes semejantes en el continente sudamericano, por lo que se basa en experiencias previas de grupos de investigación europeos.

Para conseguir el objetivo planteado, se llevaron a cabo una serie de etapas previas. Primero se buscó desarrollar una dosificación de hormigón autocompactante con fibras metálicas (HRFMAC), con materiales disponibles en el mercado local. Como concepto general, se apuntó a una mezcla autocompactante para que no requiera proceso de vibrado, manteniendo así la distribución homogénea y la orientación aleatoria de las fibras metálicas en la losa. Luego se buscó caracterizar la respuesta mecánica de la mezcla desarrollada implementando el ensayo de flexión a 3 puntos, según la norma EN 14651. Este ensayo es un estándar ampliamente adoptado a nivel mundial y establece un punto de referencia para todos los trabajos de investigación sobre el HRFM. Con la mezcla ya caracterizada se procedió a la construcción de la losa, que fue diseñada en base a geometrías típicas de edificios residenciales uruguayos.

Finalmente, se realizó el ensayo de la losa. Fue necesario diseñar un dispositivo de aplicación de carga puntual, haciendo uso de un gato hidráulico. De forma pa-

ralela, en base a los resultados de caracterización del material y aplicando análisis seccional, se calculó el momento de plastificación de la losa. Conocido este valor, se realizó un modelo computacional en el software (*Limit State: SLAB*, Limit State Ltd. (2019)) que basándose en la teoría de líneas de rotura determinó la capacidad de carga teórica, o fuerza pico, de la losa. Finalmente, se analizaron los resultados obtenidos en cada etapa.

En cuanto a los resultados, el diámetro promedio de la torta en el ensayo de cono invertido (según EN 12350 Parte 8) fue de 66 cm, por lo que la dosificación desarrollada clasifica como autocompactante según los requerimientos de la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE) (2008). La mezcla no presentó segregación del árido grueso ni de las fibras metálicas.

El ensayo de flexión a 3 puntos arrojó valores de tensiones residuales comparables con los resultados de los trabajos de investigación que se tomaron como referencia. Se encontraron similitudes en la respuesta estructural del material y su grado de ductilidad, completando el ensayo de manera satisfactoria al alcanzar los 4 mm de apertura de fisura. Los valores promedio de tensiones residuales en probetas elaboradas con la dosificación final fueron: 5,66 MPa para el límite de proporcionalidad (f_L), 9,54 MPa para 0,5 mm de apertura de fisura (f_{R1}) y 8,00 MPa para 2,5 mm (f_{R3}). La desviación estándar se ubica en el entorno del 20%. El ensayo de la losa se desarrolló según lo planificado. Se verificó una carga pico de 155,5 kN asociada a un descenso central de 20,3 mm. En términos de carga distribuida equivale a 17 kN/m², superando ampliamente las sobrecargas de uso usadas en el diseño de losas convencionales de un edificio de viviendas. Además, se observó una gran ductilidad del material manteniendo un 80% de la carga pico para un desplazamiento 2,5 veces superior al correspondiente a dicha carga. Se culminó con una carga aplicada de 125 kN para un desplazamiento de 59,3 mm. Los resultados obtenidos se consideran satisfactorios y motivan a continuar con el estudio del material.

Palabras claves:

Hormigón reforzado con fibras metálicas, Ensayo de flexión a tres puntos, Losas elevadas, Diseño de Mezclas de Hormigón, Líneas de rotura.

Lista de figuras

1.1	Organigrama del trabajo.	3
2.1	Geometría de la losa ensayada (Unidades en <i>cm</i>). [Parmentier <i>et al.</i> (2014)].	6
2.2	Descenso central en la losa en función del tiempo de carga. [Parmentier <i>et al.</i> (2014)]	7
2.3	Mecanismo de carga puntual y resultados. [Parmentier <i>et al.</i> (2014)]	8
2.4	Patrón de fisuración luego de la aplicación de la carga puntual.[Parmentier <i>et al.</i> (2014)]	9
2.5	Diseño de la losa (unidades en <i>mm</i>). [Salehian y Barros (2015)]	10
2.6	Resultados de la fase de carga distribuida sobre paños 1 y 3. [Salehian y Barros (2015)]	11
2.7	Mecanismos de carga sobre la losa. [Salehian y Barros (2015).]	12
2.8	Curva Fuerza-desplazamiento central del panel cargado puntualmente. [Salehian y Barros (2015)].	13
3.1	Fibras de acero encoladas.	18
3.2	Equipos e instrumentos en campaña experimental.	21
3.3	Probetas prismáticas de C1P2.	22
3.4	Probetas prismáticas de C1P3.	23
3.5	Probetas prismáticas de C2P1.	25
3.6	Ensayos de cono invertido para pastones de canchada 3.	26
3.7	Elaboración de la canchada 4.	28
3.8	Comparación de granulometrías.	29
4.1	Dispositivos de medición de desplazamientos. Fuente imagen (a): Controls-Group.	33
4.2	Dimensiones de probeta y entalla. Fuente: EN 14651.	34
4.3	Prensa hidráulica con control de desplazamientos en el Laboratorio de Vialidad del Ministerio de Transporte y Obras Públicas.	36
4.4	Probeta preparada para ensayar. Se ven: Horquillas, Puentes, LVDT y Prensa. En rojo, se marca el nivel de referencia para los desplazamientos verticales.	38

4.5	Diagramas de momento flector para ensayo de flexión con carga a los tercios (a) y carga centrada (b).	38
4.6	Probetas prismáticas para ensayo EN 14651.	39
4.7	Ejemplo de Curva de Carga (kN) vs CMOD (mm). Fuente: EN 14651.	40
4.8	Ejemplos de determinación de F_L . Fuente: EN 14651.	40
4.9	Distribución real de tensiones y distribución simplificada asumida. Fuente: EN 14651.	41
4.10	Gráfica de Carga contra Flecha para las probetas ensayadas de las canchadas 1 y 2	46
4.11	Gráfica de Carga contra Flecha para las probetas ensayadas de las canchadas 3 y 4	48
4.12	Gráfica de Carga contra Flecha, intervalo entre 0 y 50 micrómetros, para las probetas ensayadas de las canchadas 3 y 4	48
5.1	Ubicación del terreno donde se construyó la losa	53
5.2	Planta de la losa e indicación de los dos paños ensayados (dimensiones en m).	54
5.3	Alzado de la losa (dimensiones en m).	54
5.4	Jornada de hormigonado de la losa.	56
5.5	Esquema del recorrido del nivel de fuerza en función del tiempo para un ensayo escalonado. [Salehian y Barros (2015)].	58
5.6	Componentes principales del dispositivo de carga.	59
5.7	Distribución de los comparadores en la losa (unidades en m).	60
5.8	Fisuras en la cara inferior de la losa	60
5.9	Ingreso del modelo de la losa a LimitState.	63
5.10	Distribución simplificada de tensiones en la sección de la losa. [Código Modelo 2010]	63
5.11	Mecanismo de rotura para una losa sometida a fuerza puntual. [ACI Committee 544 (2015)]	64
5.12	Distribución de momentos en la losa para una fuerza puntual de 50 kN (unidades en kNm/m). [SAP2000].	66
5.13	Distribución de momentos en la losa para una carga distribuida uniforme de 20 kN/m^2 (unidades en kNm/m). [SAP2000].	67
5.14	Mecanismo de fallo de la losa modelada en LimitState.	68
5.15	Gráfica fuerza-flecha principal de la campaña experimental sobre la losa.	68
5.16	Relevamiento fotográfico del patrón fisuras producido en la losa.	70

5.17	Esquemas de los patrones de fisuración confeccionados.	70
1.1	Componentes de la celda de carga	79
1.2	Aproximación lineal de la curva fuerza-desplazamiento obtenida del proceso de calibración de la celda.	80
1.3	Proceso de calibración del gato hidráulico	82

Lista de tablas

2.1	Dosificación y cuantía de la mezcla empleada en la losa. [Parmentier <i>et al.</i> (2014)].	5
2.2	Características de fibras utilizadas. [Parmentier <i>et al.</i> (2014)].	5
2.3	Resistencias medias del HRFM empleado [<i>MPa</i>]. Tabla 3 de Parmentier <i>et al.</i> (2014).	6
2.4	Dosificación y cuantía de la mezcla. [Salehian y Barros (2015).]	10
2.5	Resistencias residuales medias de las probetas. [Salehian y Barros (2015).]	10
2.6	Escalones de carga aplicados en la etapa última del ensayo sobre el paño 2. [Salehian y Barros (2015)]	11
2.7	Tabla con dosificaciones utilizadas en artículos de referencia	14
3.1	Requisitos para el ensayo de escurrimiento (EHE-08).	16
3.2	Granulometría de áridos (% pasante por tamiz).	17
3.3	Dosificaciones utilizadas en cada pastón.	20
3.4	Canchada 1. Cantidad de materiales.	21
3.5	Canchada 2. Cantidad de materiales.	24
3.6	Canchada 3. Cantidad de materiales.	25
3.7	Canchada 4. Cantidad de materiales.	27
3.8	Dosificación final.	28
3.9	Secuencias de mezclado.	29
4.1	Relación entre <i>CMOD</i> y δ . Fuente: EN 14651	37
4.2	Identificación y Dimensiones de probetas ensayadas satisfactoriamente.	43
4.3	Resumen del proceso de ensayo EN 14651.	44
4.4	Resumen de resultados de todas las probetas ensayadas.	45
4.5	Tensiones residuales calculadas para las probetas de las canchadas 1 y 2.	47
4.6	Tensiones residuales calculadas para las probetas de las canchadas 3 y 4.	49
4.7	Tabla de tensiones residuales presentadas por Salehian <i>et al.</i> (2014).	50
5.1	Dosificación final del HRFMAC.	55

5.2	Resistencias residuales promedio de probetas confeccionadas a pie de obra.	57
1.1	Resultados calibración celda de carga.	80
1.2	Especificaciones más relevantes del gato empleado en el ensayo . .	81
1.3	Resultados de la calibración del gato	81

Tabla de contenidos

Lista de figuras	IX
Lista de tablas	XII
Tabla de contenidos	XIV
1 Introducción	1
2 Estado del Arte	4
2.1 El uso de HRFM en losas elevadas	4
2.2 Antecedentes de losas elevadas de HRFM	5
2.2.1 Parmentier, Van Itterbeeck y Skowron (2014)	5
2.2.2 Salehian y Barros (2015)	9
2.3 Dosificaciones empleadas para HRF	13
3 Diseño de una Dosificación de HRFM autocompactante	15
3.1 Introducción	15
3.1.1 Motivación	15
3.1.2 Objetivo	15
3.2 Metodología	16
3.3 Materiales	17
3.3.1 Áridos	17
3.3.2 Fibras metálicas	17
3.3.3 Otros	19
3.4 Campaña Experimental	19
3.4.1 Canchada 1	21
3.4.2 Canchada 2	24
3.4.3 Canchada 3	25
3.4.4 Canchada 4	26
3.5 Resultados	27
3.6 Conclusiones Parciales	29
4 Implementación del ensayo EN 14651:2005 en Uruguay	31
4.1 Introducción	31

4.1.1	Motivación	31
4.1.2	Objetivo	32
4.1.3	Definiciones de Interés y Normas de Referencia	32
4.2	Descripción del Ensayo	34
4.2.1	Requerimientos para las Probetas de Ensayo	34
4.2.2	Equipos Necesarios para el Ensayo	35
4.2.3	Desarrollo del Ensayo	37
4.3	Metodología	42
4.3.1	Post-procesamiento de los datos	44
4.4	Resultados de la campaña experimental	45
4.4.1	Canchadas 1 y 2	45
4.4.2	Canchadas 3 y 4	47
4.5	Conclusiones Parciales	50
5	Construcción y ensayo de losa elevada de HRFM	52
5.1	Introducción	52
5.1.1	Motivación	52
5.1.2	Objetivos	52
5.2	Metodología	53
5.2.1	Ubicación	53
5.2.2	Geometría	53
5.2.3	Dosificación de la mezcla y cuantía de fibras	55
5.2.4	Llenado	55
5.3	Ensayo de la losa	57
5.3.1	Organización del ensayo	57
5.3.2	Aplicación y control de la fuerza	58
5.3.3	Medición de descensos	59
5.3.4	Registro de fisuración	60
5.4	Predicción del comportamiento estructural de la losa	61
5.4.1	Régimen lineal entre fuerza y flecha	61
5.4.2	Estimación de la fuerza pico	62
5.5	Resultados	66
5.5.1	Modelos computacionales	66
5.5.2	Fuerza-flecha principal durante el ensayo	68
5.5.3	Fisuración	69
5.6	Conclusiones parciales	70

6 Conclusiones	73
6.1 Conclusiones generales	73
6.2 Trabajo a futuro	74
Referencias bibliográficas	76
Anexos	78
Anexo 1 Calibración de equipos	79
1.1 Celda de carga	79
1.2 Gato hidráulico	80

Capítulo 1: Introducción

El hormigón armado ha sido el material de construcción más utilizado en el mundo en las últimas décadas. Esto ha impulsado grandes avances en su tecnología, buscando disimular las desventajas inherentes de su uso como son la gran demanda de tiempo y mano de obra requerida para los procesos de encofrado, armado y colado. En este contexto, ha surgido interés por el estudio de refuerzos no tradicionales para el hormigón, en particular por las fibras metálicas. Empleando hormigón reforzado con fibras metálicas (HRFM) pueden sustituirse total o parcialmente las armaduras convencionales, permitiendo acelerar los tiempos de ejecución y debido al mayor control de la fisuración que las fibras proporcionan, mejorar las condiciones de servicio y vida útil de las estructuras.

Una de las aplicaciones más interesantes del HRFM, tanto desde el punto de vista estructural como económico, es su empleo en la ejecución de losas elevadas. En primer lugar, porque debido a su funcionamiento estructural en situaciones habituales, las losas no están sometidas a grandes esfuerzos localizados de tracción, como sí suele pasar en vigas. Por lo tanto, es estructuralmente viable sustituir totalmente el uso de varillas de acero por fibras. En segundo lugar, porque el ahorro en tiempo de ejecución y costo de mano de obra que se obtiene al no necesitar de trabajos de herrería puede ser maximizado en el caso de losas.

Los métodos actuales de diseño en HRFM se basan en resultados experimentales sobre prototipos realizados a escala real, volviéndolos lentos y costosos (Destrée y Mobasher, 2010) además de poco aplicables para el medio uruguayo. Para lograr introducir de lleno el HRFM en el mercado local se debe lograr una correcta caracterización del material, mejorar los mecanismos de control de calidad y refinar el método de diseño. Si bien ya se han presentado diversos estudios y trabajos de investigación que abarcan aplicaciones de HRFM en piezas de diversos niveles de responsabilidad estructural, su desarrollo todavía se encuentra en etapas iniciales. Sin embargo, se considera que dadas las condiciones actuales de la industria uruguaya de la construcción, si se dedican más recursos a la investigación en el área, las ventajas de esta nueva tecnología pueden ser aprovechadas de buena manera. Ya se han implementado en Uruguay varios ensayos novedosos que es necesario seguir desarrollando (Cañette *et al.*, 2017). Además se dejaron asentados los primeros pasos en el camino hacia un método formal de diseño, aplicado a diversos elementos en hormigón con fibras como pavimentos y losas. Si se logra dar con-

tinuidad a esta línea de investigación, existe una posibilidad real de que Uruguay sea el primer país en Sudamérica en construir un elemento de alta responsabilidad estructural ejecutado con hormigón reforzado únicamente con fibras metálicas.

Este trabajo pretende dar un paso más en el desarrollo del HRFM en Uruguay mediante la ejecución y ensayo del primer prototipo a escala real de una losa elevada (en adelante losa) de HRFM en la región. En la figura 1.1 se muestra de forma general un esquema con las tareas realizadas durante el trabajo. Primero se diseña y caracteriza una mezcla de hormigón reforzado con fibras metálicas autocompactante (HRFMAC), proceso detallado en los capítulos 3 y 4 respectivamente. Con la mezcla obtenida se ejecuta la losa según se muestra en el apartado 5.2 y posteriormente se ensaya (apartado 5.3). También se modela la losa en programas computacionales según se expone en el apartado 5.4. En el capítulo 6 se realiza un análisis de todos los resultados obtenidos.

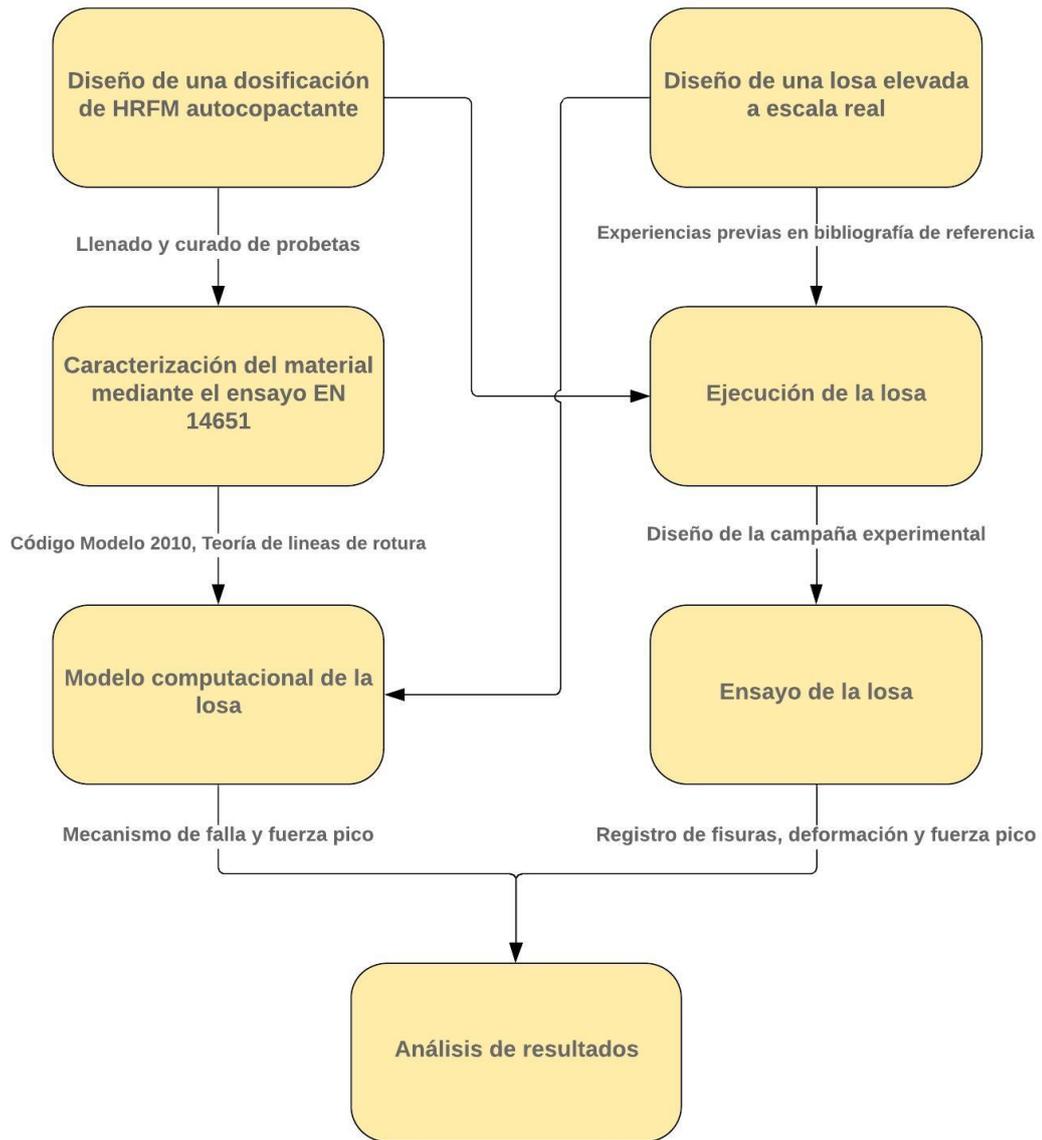


Figura 1.1: Organigrama del trabajo.

Capítulo 2: Estado del Arte

2.1. El uso de HRFM en losas elevadas

Uno de los principales defectos del hormigón en masa es su comportamiento frágil, ya sea por tracción directa, flexión o por el efecto Poisson, la baja resistencia a tracción limita el uso eficiente y seguro del material. Por lo tanto, el concepto de ductilidad es de vital importancia a la hora de diseñar piezas, tanto de hormigón armado tradicional como de HRFM. Destrée y Mobasher (2010) analizaron la ductilidad de losas elevadas de HRFM desde dos puntos de vista, primero desde la perspectiva del material y luego desde una perspectiva estructural.

A nivel del material, constataron que para bajos contenidos de fibra, las fisuras que se producen por tracción tienden a abrirse y propagarse, dada la baja energía de deformación que este mecanismo presenta. Esto tiene como consecuencia un comportamiento frágil. A medida que la dosificación de fibras se incrementa, la energía requerida para la propagación de fisuras también lo hace. Esta tendencia se mantiene hasta llegado un punto que, en lugar de aumentar la apertura de las fisuras existentes, se generan nuevas, quedando las preexistentes con un comportamiento estacionario. Este efecto es altamente deseado tanto por motivos de ductilidad como de durabilidad, funcionalidad y estética.

Desde el enfoque de la ductilidad estructural, Destrée y Mobasher explican que la geometría de la losa y su grado de hiperestaticidad juegan un papel preponderante en su funcionamiento post-fisuración. En el caso de estructuras estáticamente determinadas, como el de una viga simplemente apoyada, la primer macro fisura que impida la transmisión de esfuerzos constituye una línea de rotura que induce un mecanismo de colapso. En contrapartida, las estructuras hiperestáticas como las losas apoyadas en su contorno requieren de la formación de varias líneas de rotura para provocar su falla. Esto implica que un material dúctil, capaz de redistribuir eficazmente las tensiones, incrementará en gran medida la capacidad de carga del elemento.

2.2. Antecedentes de losas elevadas de HRFM

2.2.1. Parmentier, Van Itterbeeck y Skowron (2014)

Parmentier *et al.* (2014) realizaron una campaña experimental sobre una losa a escala real de HRFM sin refuerzo tradicional con una cuantía de fibras de 70 kg/m^3 . Las propiedades principales de las fibras se detallan en la tabla 2.2. En la figura 2.1 se observa la geometría de la losa ensayada. Tiene un espesor de 20 cm y unas dimensiones totales de $18,3 \times 18,3 \text{ m}^2$. Se apoya sobre 16 pilares cilíndricos de 30 cm de diámetro y $2,70 \text{ m}$ de altura, determinando 9 paños. La mezcla empleada se expone en la tabla 2.1. Se generaron fisuras del orden de $0,3 \text{ mm}$ en el proceso de desencofrado debido al peso propio de la losa. Los autores atribuyen esto al tipo de cemento empleado.

Relación agua/cemento	0,5
Agregado fino [kg/m^3]	850,0
Agregado grueso [kg/m^3]	840,0
Agua [kg/m^3]	215,0
Cemento [kg/m^3]	400,0
Ceniza volante [kg/m^3]	73,0
Aditivo reductor de agua [lt/m^3]	1,6
Fibras [kg/m^3]	70,0

Tabla 2.1: Dosificación y cuantía de la mezcla empleada en la losa. [Parmentier *et al.* (2014)].

Tensión de rotura [MPa]	1450,0
Módulo de elasticidad [GPa]	210,0
Longitud [mm]	60,0
Diámetro [mm]	1,0

Tabla 2.2: Características de fibras utilizadas. [Parmentier *et al.* (2014)].

2.2.1.1. Caracterización del material

Para caracterizar el material, se ensayaron probetas del material endurecido. Los resultados principales se muestran en la tabla 2.3 extraída del artículo. Los resultados de la columna "Fase 1" refieren al hormigón utilizado en el llenado de la losa. Los de la "Fase 2", son de un lote de hormigón recibido dos días después del

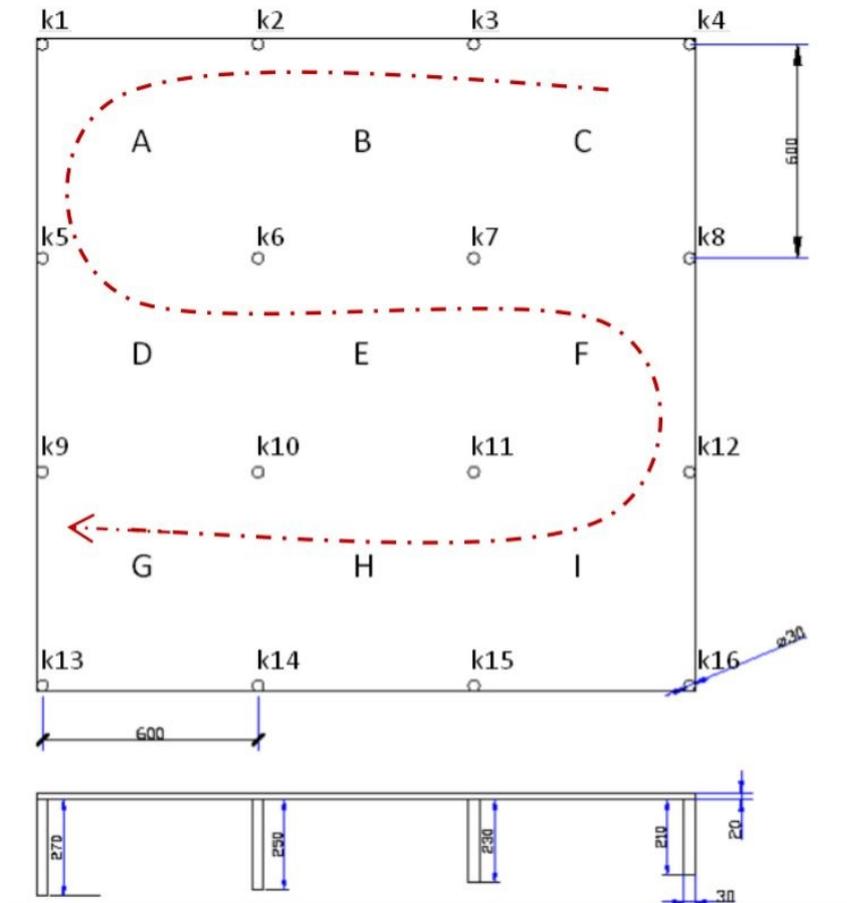


Figura 2.1: Geometría de la losa ensayada (Unidades en *cm*). [Parmentier *et al.* (2014)].

llenado, para evaluar la dispersión del material. Entre paréntesis se hace referencia al porcentaje de dispersión de los resultados.

	Ensayo (# probetas)	Losa Fase 1	Control Fase 2
Resistencia media a la compresión $f_{cm,cub}$	EN 12390-3 (5 probetas)	43,7 (2)	41,8 (1)
Limite de proporcionalidad f_L		5,1 (6)	4,5 (11)
Resistencia máxima f_{max}	EN 14651 (9 probetas para la fase 1 y 11 probetas para la fase 2)	9,2 (19)	7,1 (22)
Resistencia residual a 0,5 mm CMOD- $f_{R1,m}$		8,6 (19)	6,4 (25)
Resistencia residual a 1,5 mm CMOD- $f_{R2,m}$		8,7 (18)	6,8 (22)
Resistencia residual a 2,5 mm CMOD- $f_{R3,m}$		7,5 (20)	6,4 (20)
Resistencia residual a 3,5 mm CMOD- $f_{R4,m}$		6,9 (19)	5,7 (18)
Módulo de Young E_{cm}	NBN B 15-203 (3 probetas)	NA	33940 (2)

Tabla 2.3: Resistencias medias del HRFM empleado [*MPa*]. Tabla 3 de Parmentier *et al.* (2014).

2.2.1.2. Descripción del ensayo

El ensayo se separó en dos etapas. Una inicial donde mediante carga distribuida se caracterizó el comportamiento de la losa en situaciones de servicio. Y luego una etapa en donde se buscó llevar a la losa a su estado límite aplicando una carga puntual en su centro. En todo momento se registraron fisuras y desplazamientos verticales.

En la figura 2.2 se observa la curva de carga en función del tiempo transcurrido durante la primer etapa del ensayo realizada 36 días después del llenado de la losa. Durante esta etapa se cargaron los paños A y C (figura 2.1) mediante depósitos de agua, que se llenaron con un caudal de 8000 L/hora hasta llegar a 4 kN/m^2 . Se mantuvo la carga en los paños hasta un tiempo final de 1600 y 1300 horas respectivamente. Inmediatamente se descargaron los paños observándose flechas residuales de 10 mm aproximadamente en los centros de ambos paños.

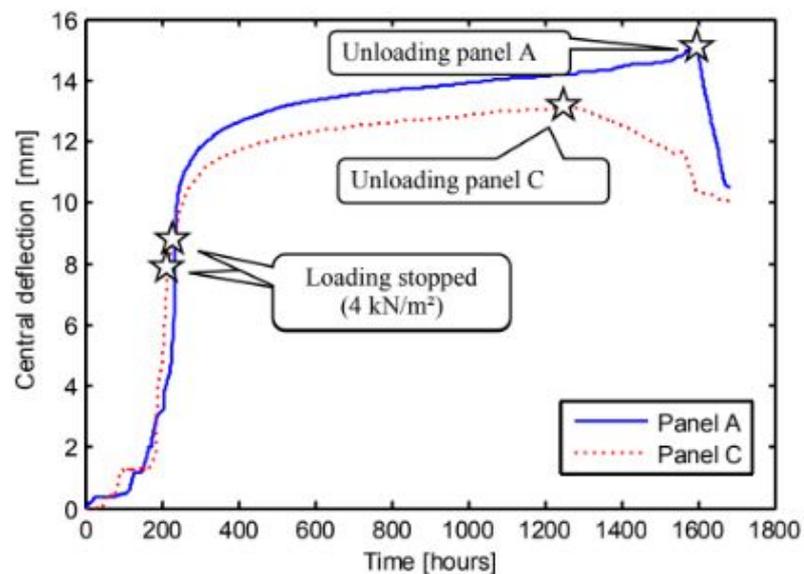


Figura 2.2: Descenso central en la losa en función del tiempo de carga. [Parmentier *et al.* (2014)]

La segunda etapa de carga se realizó 5 días luego de retirada la carga de agua en paños A y C. En esta etapa se cargó puntualmente los paños D, E y F de la figura 2.1 mediante el marco mostrado en la figura 2.3(a). Los incrementos de fuerza se dieron mediante escalones de 50 kN que se mantenían aproximadamente por 10 minutos para estabilizar las medidas. En la figura 2.3(b) se muestra una gráfica de la evolución del descenso central de cada paño ensayado respecto a la carga aplicada.

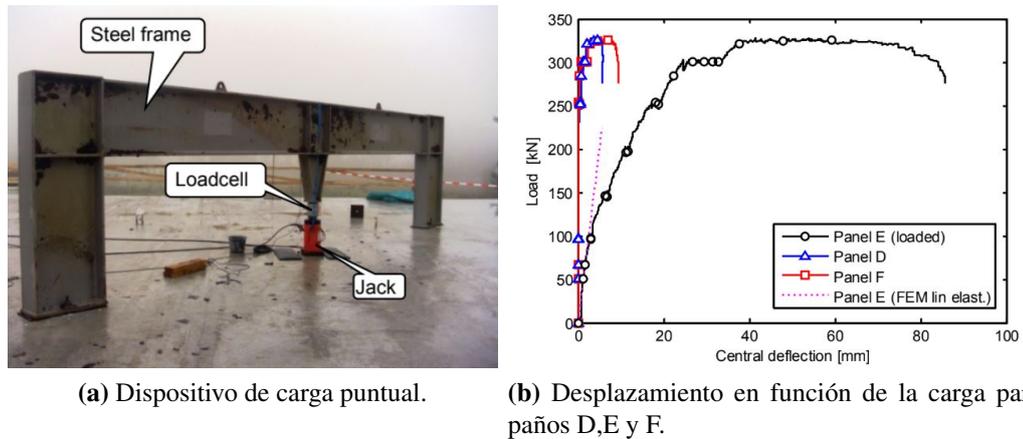


Figura 2.3: Mecanismo de carga puntual y resultados. [Parmentier *et al.* (2014)]

2.2.1.3. Análisis de los resultados obtenidos

Lo primero que aclara el autor es que considera que las fisuras iniciales que se produjeron al desencofrar la losa no influyeron en gran medida en los mecanismos de rotura generados. Esto se debió a que no fueron de gran entidad y se encontraban lejos de los paños ensayados. Además, al realizarse los ensayos relativamente cercanos en tiempo al desencofrado, no dio lugar a procesos corrosivos.

Respecto a la primer parte del ensayo, con la carga distribuida sobre los paños A y C, se observó que la respuesta de ambos paños fue muy similar, lo que era esperable por la simetría geométrica. Superados los 3 kN/m^2 aparece la primera grieta visible en la parte inferior del paño A y de forma similar más adelante en el paño C. Luego al cargar hasta hasta 4 kN/m^2 la apertura máxima de fisura alcanza respectivamente $0,4 \text{ mm}$ y $0,5 \text{ mm}$ para paño A y C. En ese punto la deflexión central es $9,4 \text{ mm}$ en A y $7,2 \text{ mm}$ en C.

En la segunda parte del ensayo como estaba previsto, el paño E resultó el de mayor capacidad con una carga máxima de 358 kN como se aprecia en la figura 2.3 (b). Este nivel de fuerza se considera la carga pico del ensayo y produjo un descenso de 40 mm aproximado en el centro del paño E. También se ve como los paños D y F resisten una carga máxima similar pero con una deformación apreciablemente menor. El autor adjudica este resultado al efecto de la bisagra plástica desarrollado en la parte superior de la losa a lo largo de las columnas k_2-k_{14} y $k_{15}-k_3$ (figura 2.4). Finalizado el ensayo del paño E se repitió el procedimiento en los paños H e I, los cuales arrojaron una carga de rotura de 143 y 54 kN respectivamente. Se asume la capacidad de estos paños fue afectada en gran medida por el ensayo ya realizado a los paños D, E y F.

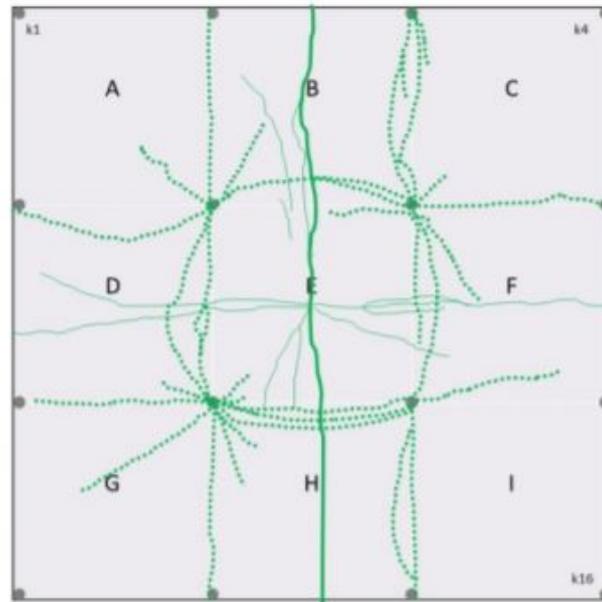


Figura 2.4: Patrón de fisuración luego de la aplicación de la carga puntual.[Parmentier *et al.* (2014)]

2.2.2. Salehian y Barros (2015)

Salehian y Barros (2015) estudiaron la losa elevada de HRFM mostrada en la figura 2.5 sin refuerzo tradicional y ejecutada con la mezcla autocompactante detallada en la tabla 2.4. La idea del autor fue basarse en una estructura residencial típica, aplicando un factor de escala de 1/4. Son 6 paños de $1,23 \times 1,05 \text{ m}^2$ con espesor de $7,5 \text{ cm}$, apoyados en 12 pilares cuadrados de 10 cm de lado y una altura de 1 m . La distribución en 6 paños permitió realizar varios ensayos, brindando variada información sobre la respuesta estructural del sistema. A nivel de suelo implementó como sistema de fundación otra losa. Se emplearon fibras con una longitud de 35 mm , diámetro de $0,5 \text{ mm}$, relación de aspecto 70 y tensión de fluencia de 1300 MPa .

2.2.2.1. Caracterización del material

El material se caracterizó primero mediante ensayos de compresión, según norma EN 206-1, sobre probetas cilíndricas de diámetro 150 mm y altura 300 mm . El resultado obtenido fue una resistencia media a la compresión de $63,3 \text{ MPa}$. Luego se buscó caracterizar el comportamiento post fisuración del material. En la tabla 2.5 se muestran las resistencias residuales medias obtenidas al aplicar el ensayo de 3 puntos y recomendaciones del Model Code (2010) sobre 6 probetas normalizadas.

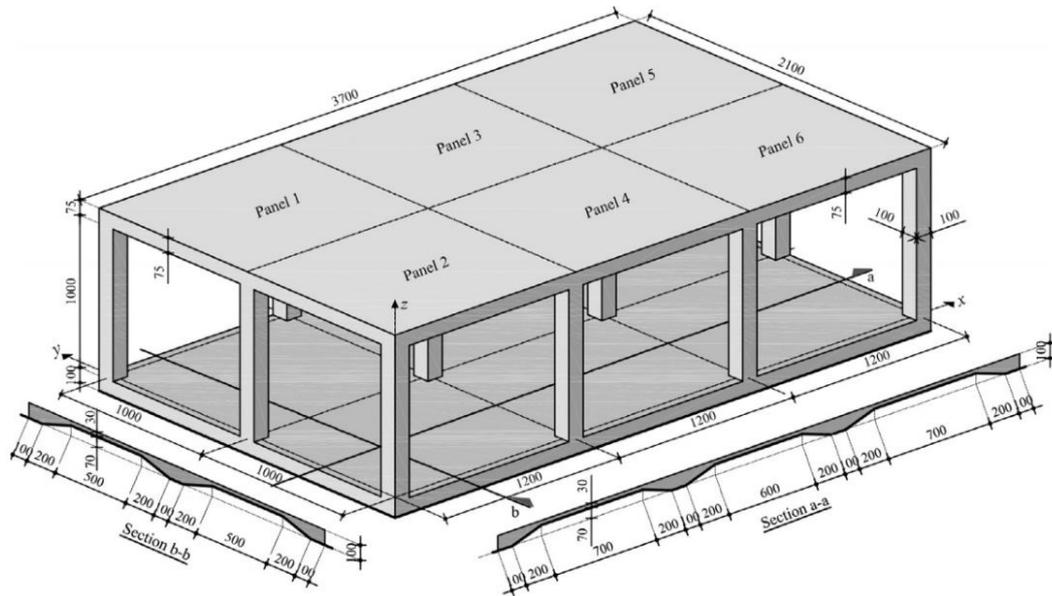


Figura 2.5: Diseño de la losa (unidades en mm). [Salehian y Barros (2015)]

Relación agua/cemento	0,4
Arena fina [kg/m^3]	263,0
Arena gruesa [kg/m^3]	658,0
Granito triturado [kg/m^3]	446,0
Agua [kg/m^3]	150,0
Cemento [kg/m^3]	408,0
Aditivo superplastificante [kg/m^3]	6,3
Filler [kg/m^3]	395,0
Ceniza volante [kg/m^3]	73,0
Fibras [kg/m^3]	90,0

Tabla 2.4: Dosificación y cuantía de la mezcla. [Salehian y Barros (2015).]

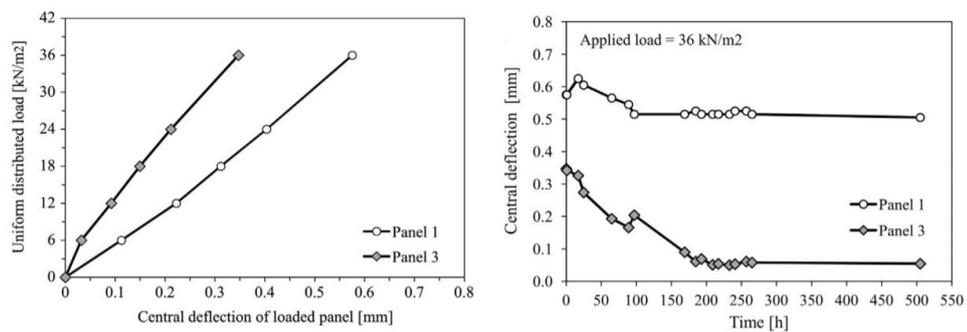
Fuerza [kN]	CMOD [mm]	$f_{Ri,m}$ [MPa]
19,50	0,5	11,94
16,78	1,5	10,28
11,80	2,5	7,23
8,93	3,5	5,47

Tabla 2.5: Resistencias residuales medias de las probetas. [Salehian y Barros (2015).]

2.2.2.2. Descripción del ensayo

Como se puede ver en la figura 2.7, el ensayo constó de dos etapas. Una en la cual se cargó la losa aplicando fuerza distribuida, mediante pallets con bolsas

cemento, buscando conocer el comportamiento en servicio de la estructura. Luego otra etapa donde se aplica una fuerza puntual, buscando llevar la losa a la rotura. En ambas etapas se registraron descensos y fisuración. Los resultados de la etapa de ensayo a servicio se muestran en las gráficas de la figura 2.6. En 2.6(a) se ve que se aplicó una carga distribuida creciente sobre los paños 1 y 3, en escalones de 6 kN/m^2 hasta llegar a 36 kN/m^2 . En 2.6(b) puede observarse que la carga de 36 kN/m^2 se mantuvo 500 horas con el propósito de estudiar la respuesta de la estructura frente a cargas de larga duración y estabilizar la medición.



(a) Deflexión central en función del tiempo para la máxima carga aplicada. (b) Fuerza aplicada vs deflexión central.

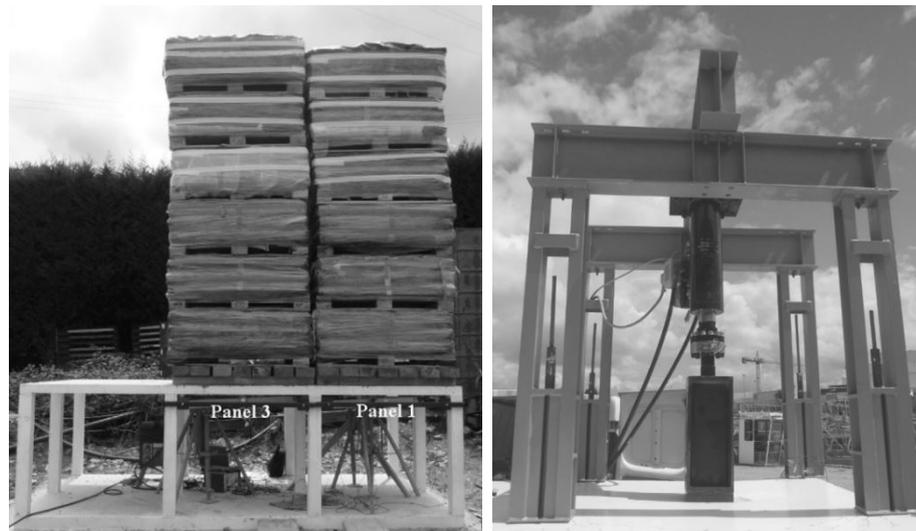
Figura 2.6: Resultados de la fase de carga distribuida sobre paños 1 y 3. [Salehian y Barros (2015)]

La segunda etapa del ensayo consistió en ensayar el paño 2 (figura 2.5) frente a la aplicación de una fuerza puntual en su centro mediante el dispositivo mostrado en la figura 2.7(b). Igual que en la primera etapa se midieron descensos y fisuras producidas.

La velocidad de fuerza aplicada al panel fue controlada en todo momento por el desplazamiento producido. Buscando no superar los $10 \mu\text{m/s}$. En la tabla 2.6 se detallan los escalones de fuerza que se realizaron. En la figura 2.8 se muestra una gráfica obtenida del ensayo de fuerza puntual sobre el paño 2.

Escalón	Fuerza [kN]	Descenso central [mm]
1	10,58	0,16
2	41,48	0,87
3	70,52	4,07
4	79,92	7,40

Tabla 2.6: Escalones de carga aplicados en la etapa última del ensayo sobre el paño 2. [Salehian y Barros (2015)]



(a) Aplicación de cargas distribuidas.

(b) Aplicación de carga puntual mediante un marco de reacción y un gato.

Figura 2.7: Mecanismos de carga sobre la losa. [Salehian y Barros (2015).]

2.2.2.3. Análisis de los resultados obtenidos

Los autores destacan el gran desempeño de la losa frente a cargas de niveles de servicio, llegando casi hasta soportar $40 \text{ kN}/\text{m}^2$ sin presentar fisuración visible. Esto significa una carga del orden de 6 veces la sobrecarga de uso aplicada para cálculo de losas de uso residencial.

Sobre la segunda etapa del ensayo se destacan los siguientes aspectos. En los primeros escalones de fuerza, llegando hasta $41,48 \text{ kN}$ no se presentó fisuración visible. Las primeras fisuras se produjeron al cargar el tercer escalón. A los 43 kN se fisura la zona inferior de la losa y a los 64 kN aparecieron fisuras en el contorno superior.

Se aprecia en la figura 2.8 que el ensayo se interrumpió a los 27 mm de desplazamiento en el centro del paño ya que las grietas en el contorno y en la parte central del panel eran apreciables. Esos 27 mm significan 3,6 veces el desplazamiento pico, hecho que indica una gran ductilidad en la estructura. En ese momento la losa estaba soportando una fuerza del orden de 50 kN , un 60% aproximado de la fuerza pico. Los autores concluyen que la losa resultó con una gran resistencia y ductilidad, muy por encima de los requerimientos de diseño habituales para estructuras convencionales.

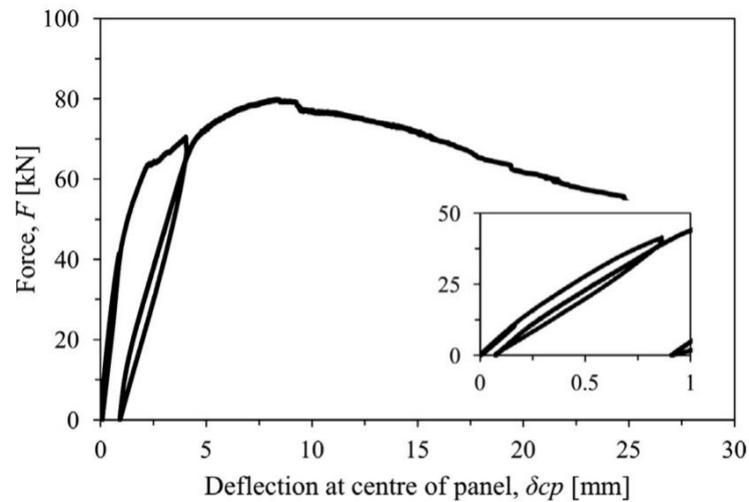


Figura 2.8: Curva Fuerza-desplazamiento central del panel cargado puntualmente. [Salehian y Barros (2015)].

2.3. Dosificaciones empleadas para HRF

En la tabla 2.7 se presentan las dosificaciones de hormigón reforzado con fibras (HRF) recopiladas durante el relevamiento bibliográfico realizado. Allí se enumeran y referencian los diferentes artículos de los cuales se toman los datos. Los parámetros que se consideraron más interesantes a la hora de caracterizar las dosificaciones fueron la resistencia a compresión obtenida, contenido de cemento, relación agua cemento, aditivo, adiciones y agregados.

En general se destaca la presencia constante tanto de aditivo superplastificante como de adiciones. El aditivo resulta fundamental para lograr la alta trabajabilidad y fluidez, mientras que las adiciones previenen la segregación de la mezcla y permiten una granulometría más compacta. El aditivo superplastificante se utiliza en cantidades que varían entre 1 % y 2 % del peso del cemento, mientras que el peso de las adiciones representa entre 5 % y 20 % del peso total de los agregados, cemento y adiciones. La relación agua cemento se ubica entre 0,4 y 0,5 en la mayoría de los casos, reduciéndose en los casos en que se busca mayor resistencia a la compresión. Las cuantías de fibras varían según el uso de cada dosificación, pero se encuentran en un rango de 20 a 125 kg/m^3 .

Tabla 2.7: Tabla con dosificaciones utilizadas en artículos de referencia

Fuente	$f_{c,m}$ MPa	C.P. kg/m^3	Agua kg/m^3	Rel. A/C	Adit. Superplastif. kg/m^3 %	Adición kg/m^3 %	Agregado Fino kg/m^3 %	Agr. Intermedio kg/m^3 %	Agr. Grueso kg/m^3 %	Fibras kg/m^3					
	15	220	105	0,48	6,08	2,76%	100	5,42%	437	23,69%	693	37,56%	615	33,33%	45
1	30	300	140	0,47	5,70	1,90%	200	11,37%	301	17,11%	755	42,92%	503	28,60%	45
	25	350	160	0,46	9,50	2,71%	150	9,03%	233	14,03%	698	42,02%	580	34,92%	60
	45	423	144	0,34	5,92	1,40%	362	20,76%	220	12,61%	671	38,47%	491	28,15%	90
2	63,63	408	150	0,37	6,26	1,53%	468	25,50%	263	14,33%	658	35,86%	446	24,31%	90
3	65,2	401,7	117,3	0,29	7,70	1,92%	344,3	19,01%	178,3	9,85%	688,1	38,00%	600	33,14%	45
	61,9	413	128	0,31	7,83	1,90%	344,3	19,64%	176,9	10,09%	644,2	36,75%	587,5	33,52%	60
4	45	370	181,3	0,49	4,07	1,10%	280	14,89%	838	44,57%	762	40,53%	-	-	25
	50,30	370	181,3	0,49	4,07	1,10%	280	14,89%	838	44,57%	762	40,53%	-	-	25
5	41,50	370	181,3	0,49	4,07	1,10%	280	14,89%	838	44,57%	762	40,53%	-	-	20
	45	370	181,3	0,49	4,07	1,10%	280	14,89%	838	44,57%	762	40,53%	-	-	25
6	[40 - 54]	350	175	0,50	4,41	1,26%	120	6,42%	700	37,43%	500	26,74%	550	29,41%	100
7	[87,8 - 97,8]	954,1	215,9	0,23	20,60	2,16%	73,8	6,52%	1058,1	93,48%	-	-	-	-	-
	[91,4 - 98]	954,1	215,9	0,23	20,60	2,16%	73,8	6,64%	1038,1	93,36%	-	-	-	-	62,8
8	60	460	205	0,45	12,80	2,78%	50	2,85%	985	56,09%	721	41,06%	-	-	125
9	45	287	164	0,40	-	-	123	8,92%	560	40,61%	696	50,47%	-	-	60
10	44,29	322	172,9	0,54	6,41	1,99%	178	9,82%	891	49,15%	123	6,78%	621	34,25%	35

1 [Salehian y Barros (2017)]; 2 [Salehian y Barros (2015)]; 3 [Salehian et al. (2014)];
 4 [Facconi y Minelli (2017)]; 5 [Facconi et al. (2016)]; 6 [Michels et al. (2012)]; 7 [Nguyen et al. (2017)]; 8 [Cuenca (2015)];
 9 [Maya et al. (2012)]; 10 [Fall et al. (2014)]

Capítulo 3: Diseño de una Dosificación de HRFM auto-compactante

3.1. Introducción

Para la correcta ejecución de elementos de HRFM es importante evitar el vibrado de la mezcla, ya que esto puede ser perjudicial para lograr el contenido uniforme y la orientación aleatoria de las fibras metálicas. Este aspecto actualmente es motivo de investigación, dado que un vibrado con equipos y parámetros específicos podría influir de forma beneficiosa en la re-orientación de las fibras en el plano de la losa. A efectos de este proyecto, se decidió evitar el vibrado de la mezcla por lo que la dosificación a desarrollar debía ser de un hormigón reforzado con fibras metálicas autocompactante (HRFMAC).

Según la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE) (2008) se define un hormigón autocompactante como aquel hormigón que, como consecuencia de una dosificación estudiada y del empleo de aditivos superplastificantes específicos, se compacta por la acción de su propio peso, sin necesidad de energía de vibración ni de cualquier otro método de compactación, no presentando segregación, bloqueo de árido, ni exudación de la lechada.

3.1.1. Motivación

La aplicación del HRFM en la construcción de una losa elevada requería de una dosificación de hormigón autocompactante, la cual debía lograrse utilizando los materiales disponibles en el medio local y sin la incorporación de adiciones.

Al no contar casi con experiencia previa en diseño de mezclas de hormigón, la dosificación inicial se basó en las desarrolladas en la tabla 2.7, bajo la limitante de los materiales disponibles en el medio.

3.1.2. Objetivo

Desarrollar una dosificación de hormigón autocompactante con fibras metálicas empleando materiales de uso común en la construcción Uruguaya.

Cumplir con los parámetros de control propuestos por la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE) (2008), aplicados al ensayo de escurrimiento, y control visual de segregación y exudación de la mezcla.

Conservar las propiedades de la mezcla al incorporar las fibras metálicas, estableciendo como objetivo un diámetro promedio de 65 *cm* en el ensayo de cono invertido con las fibras ya incorporadas.

3.2. Metodología

En el apartado 31.5 de la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE) (2008) se establece que la caracterización de la autocompactabilidad del hormigón se realiza a través de métodos de ensayo específicos que permiten evaluar las prestaciones del material en términos de fluidez, resistencia al bloqueo y resistencia a la segregación.

En este caso, se evaluaron las propiedades del HAC en estado fresco solo mediante el ensayo de cono invertido (escurrimiento). Ensayo realizado según la norma EN 12350-8 cuyo objetivo es determinar la capacidad de fluir, la velocidad con que lo hace, y la viscosidad relativa del hormigón.

En la tabla 3.1 se detallan los requisitos generales para la autocompactabilidad de un hormigón que establece la norma española. Donde T_{50} es el tiempo que demora en lograrse 50 *cm* de diámetro de torta y d_f es el diámetro final alcanzado. Se decidió que para este trabajo solo se registraría el diámetro final.

Ensayo	Parámetro medido	Rango admisible
Escurrecimiento	T_{50}	$T_{50} \leq 8 \text{ seg}$
	d_f	$550 \text{ mm} \leq d_f \leq 850 \text{ mm}$

Tabla 3.1: Requisitos para el ensayo de escurrimiento (EHE-08).

Para evaluar el comportamiento del material frente a la segregación, la EHE-08 indica que se puede aceptar la muestra si, en el ensayo de escurrimiento, se ve una distribución uniforme del árido grueso y ningún tipo de segregación o exudación en el perímetro de la torta al finalizar el ensayo.

Durante la experiencia, se consideraron factores como la humedad de los agregados, y la secuencia de colocación de los distintos materiales dentro de la hormigonera. La dosificación del hormigón se fue modificando hasta lograr una mezcla satisfactoria.

Para conocer las resistencias mecánicas de la mezcla, se llenaron vigas prismáticas rectangulares de 15x15x60 *cm*³, que luego serían ensayadas a flexión en tres

puntos según la norma EN-14651 como se verá detallado en el capítulo 4.

3.3. Materiales

Se trabajó con los materiales disponibles utilizados por la empresa Teyma para la fabricación de hormigón en la construcción del Antel Arena.

3.3.1. Áridos

Para los áridos finos se disponía de arena fina con origen en Ruta 1, km. 32, y arena gruesa proveniente de "Paso Pache". En el caso de los áridos gruesos, en primera instancia se utilizó piedra partida 5-14 y 5-20. Luego, en función de la necesidad de una curva granulométrica más continua, se cambió a pedregullo proveniente de la cantera La Paz y gravillín de la cantera Melilla. En la tabla 3.2 se presentan las granulometrías de los distintos áridos que determinaron la dosificación final.

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	0	0	0

Tabla 3.2: Granulometría de áridos (% pasante por tamiz).

3.3.2. Fibras metálicas

Las fibras fueron provistas por la empresa Ferrocement, caracterizadas como Ferrofiber AR65 (figura 3.1). Su material es acero, con recubrimiento superficial galvanizado, para proteger su oxidación. Son comercializadas en bolsas de 20 kg

y se encuentran encoladas en grupos de 20 fibras, lo que facilita su manipulación y evita la formación de erizos (acumulación de fibras enganchadas entre si). El pegamento se disuelve con el agua de mezclado, lo que resulta en una distribución homogénea en la masa de hormigón.



Figura 3.1: Fibras de acero encoladas.

En cuanto a su geometría, las fibras tienen un largo de 50 mm y un diámetro de $0,77\text{ mm}$, lo que equivale a una esbeltez de 65. Su forma corresponde con la clasificación de fibra con gancho, condición que influye principalmente en las condiciones de anclaje de la fibra, aportando adherencia con el hormigón. Dentro de las características geométricas, la longitud de las fibras (l_f) es un parámetro fundamental a la hora de desarrollar un hormigón que las incorpore. Se debe verificar la relación 3.1 entre l_f y el tamaño máximo del árido (TMA). Si las fibras son muy largas se dificulta su manipulación y aparecen de poros dentro de la masa de hormigón. Por el contrario, si son cortas, no desarrollan un buen anclaje, necesario para transmitir los esfuerzos.

$$l_f/2 > TMA \rightarrow \frac{50\text{mm}}{2} = 25\text{mm} > TMA \quad (3.1)$$

Según la granulometría de los áridos empleados (tabla 3.2), se puede observar que se cumple la relación 3.1, siendo el tamaño máximo del agregado de 19 mm .

Respecto a la cuantía de fibras, se optó por incorporar la cantidad de $90\text{kg}/\text{m}^3$ para garantizar el comportamiento dúctil del material. En las recomendaciones publicadas por el ACI Committee 544 (2015) se verifica que para dosificaciones de fibra entre 80 y $100\text{ kg}/\text{m}^3$ las losas desarrollan una gran capacidad de rotación en las líneas de rotura, lo que se traduce a un comportamiento dúctil del elemento estructural, permitiendo una buena redistribución de esfuerzos.

El tiempo de mezclado es también una variable de importancia en la ejecución de la mezcla ya que es necesario lograr una distribución homogénea de áridos y fibras dentro de la misma. Sin embargo no se recomienda prolongar innecesariamente

el mismo ya que un tiempo excesivo puede dar lugar a la formación de erizos.

3.3.3. Otros

El cemento utilizado fue CPN40 de ANCAP, que es el cemento de uso habitual en la construcción uruguaya en todo tipo de obras que no requieran de un cemento con propiedades especiales. Para la hidratación del cemento se empleó agua potable. Está verificado que no contiene elementos químicos que interfieran en las propiedades del hormigón en sus distintos estados. Se utilizó el aditivo Sika ViscoCrete-610, el cual fue provisto por la empresa Teyma.

3.4. Campaña Experimental

Se presentan en la tabla 3.3 las dosificaciones desarrolladas en la práctica. A su vez, se observa el proceso recorrido hasta la obtención de la mezcla definitiva para hormigonar la losa elevada.

Tabla 3.3: Dosificaciones utilizadas en cada pastón.

Parámetro	Unidad	Canchada 1		Canchada 2		Canchada 3		Canchada 4	
		Pastón 1	Pastón 2	Pastón 3	Pastón 1	Pastón 2	Pastón 1	Pastón 2	Pastón 1
Volumen Elaborado	(lt)	30	45	60	30	30	30	30	50
Arena Fina	(kg/m ³)	630,0 (39,6%) ²	630,0 (39,6%)	630,0 (39,6%)	619,0 (35%)	681,7 (40%)	681,7 (40%)	681,7 (40%)	681,7 (40%)
Arena Gruesa	(kg/m ³)	150 (9,4%)	150 (9,4%)	150 (9,4%)	265,3 (15%)	255,6 (15%)	255,6 (15%)	255,6 (15%)	255,6 (15%)
Piedra Partida 5-14	(kg/m ³)	660 (41,5%)	660 (41,5%)	660 (41,5%)	-	-	-	-	-
Piedra Partida 5-20	(kg/m ³)	150 (9,4%)	150 (9,4%)	150 (9,4%)	-	-	-	-	-
Gravillín	(kg/m ³)	-	-	-	619,0 (35%)	511,3 (30%)	511,3 (30%)	511,3 (30%)	511,3 (30%)
Pedregullo	(kg/m ³)	-	-	-	265,3 (15%)	255,6 (15%)	255,6 (15%)	255,6 (15%)	255,6 (15%)
Agua	(kg/m ³)	165,0	165,0	171,2 ¹	180,0	180,0	180,0	180,0	180,0
Cemento	(kg/m ³)	450,0	450,0	450,0	450,0	450,0	450,0	450,0	450,0
Aditivo	(kg/m ³)	6,0	6,0	8,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0
Fibras	(kg/m ³)	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0
Rel. Agua/Cemento		0,366	0,366	0,380	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400
Rel. Aditivo/Cemento	(%)	1,33%	1,33%	1,78%	2,00%	2,00%	2,00%	2,00%	2,00%

¹ Valores en negrita representan un cambio respecto a la dosificación anterior.

² El porcentaje representa la relación con la masa total de agregados.

La campaña experimental constó de cuatro jornadas de elaboración de mezclas de prueba (canchadas), realizadas en laboratorio. En figura 3.2 se puede visualizar parte del equipamiento utilizado.



Figura 3.2: Equipos e instrumentos en campaña experimental.

A continuación se desarrollan las cuatro canchadas, detallando los resultados de cada etapa y mostrando la evolución del proceso hasta llegar a la dosificación que se consideró adecuada para la ejecución del proyecto.

3.4.1. Canchada 1

3.4.1.1. Materiales

En la primer jornada se elaboraron tres pastones. A excepción del resto de las canchadas, la primera se realizó con piedra partida como agregado grueso. En la tabla 3.4 se detallan los materiales y las cantidades utilizadas.

	Pastón 1	Pastón 2	Pastón 3
Volumen de Hormigón (<i>lt</i>)	30,0	45,0	60,0
Arena Fina (<i>kg</i>)	18,9	28,4	37,8
Arena Gruesa (<i>kg</i>)	4,5	6,8	9,0
Piedra Partida 5-14 (<i>kg</i>)	19,8	29,7	39,6
Piedra Partida 5-20 (<i>kg</i>)	4,5	6,8	9,0
Agua (<i>kg</i>)	4,9	7,4	10,3
Cemento (<i>kg</i>)	13,5	20,3	27,0
Aditivo (<i>kg</i>)	0,2	0,3	0,5
Fibras (<i>kg</i>)	2,7	4,1	5,4

Tabla 3.4: Canchada 1. Cantidad de materiales.

3.4.1.2. Observaciones

Pastón 1

La incorporación de los materiales en la hormigonera se realizó mediante la siguiente secuencia. Se comenzó colocando el 75 % del agua de mezclado y luego los agregados, del más grueso al más fino, para luego agregar el cemento. Le siguió el 25 % restante del agua y por último el aditivo. Esta secuencia generó grandes problemas en el mezclado, ya que gran parte del agregado fino quedó adherido en el fondo de la hormigonera. Otro punto importante es que el aditivo tardó un tiempo considerable en actuar sobre la totalidad de la mezcla, dado que fue agregado solo (y no en conjunto con el agua de mezclado como es recomendado), por lo que su efecto en la masa del hormigón se demoró más de lo deseado. Por esta razón, fue necesario un tiempo de mezclado de aproximadamente 10 minutos antes de poder incorporar las fibras metálicas, las cuales se distribuyeron rápidamente en toda la masa de hormigón. El resultado final de la mezcla mostró una masa con exceso de agua y gran segregación de los áridos. Se llenó una sola probeta prismática rectangular.

Pastón 2

Para el pastón 2 se mantuvieron fijos todos los parámetros de la mezcla respecto al pastón 1. Se corrigió únicamente la forma de incorporar el aditivo, observándose así menos exudación y segregación en el resultado final sin dejar de ser insatisfactorio. En la figura 3.3) se muestran las dos probetas prismáticas que se llenaron con este pastón, las cuales presentaron una capa de lechada de cemento en la parte superior además de oquedades internas.



Figura 3.3: Probetas prismáticas de C1P2.

Pastón 3

Se mantuvieron las proporciones de agregados de los pastones anteriores pero se aumentó la relación agua cemento a 0,38 y el aditivo a 1,78 %, en busca de una mayor trabajabilidad. La mezcla volvió a resultar segregada y permanecieron los problemas al realizar el llenado de las probetas, quedando la capa de lechada de cemento en la parte superior y oquedades en su interior. En la figura 3.4 se observan las tres probetas prismáticas rectangulares que se llenaron de este pastón.



Figura 3.4: Probetas prismáticas de C1P3.

3.4.2. Canchada 2

3.4.2.1. Materiales

En la canchada 2 se realizó un solo pastón. Los materiales y las cantidades utilizadas se detallan en la tabla 3.5. Se sustituyeron los dos tamaños de piedra partida por pedregullo y gravillín, buscando con este cambio generar una pasta más compacta, que cumpliera con los requisitos de segregación y distribución de áridos.

Componentes	Pastón 1
Volumen de Hormigón (<i>lt</i>)	30,0
Arena Fina (<i>kg</i>)	18,6
Arena Gruesa (<i>kg</i>)	7,9
Gravillín (<i>kg</i>)	18,6
Pedregullo (<i>kg</i>)	7,9
Agua (<i>kg</i>)	5,4
Cemento (<i>kg</i>)	13,5
Aditivo (<i>kg</i>)	0,3
Fibras (<i>kg</i>)	2,7

Tabla 3.5: Canchada 2. Cantidad de materiales.

3.4.2.2. Observaciones

Pastón 1

Se aumentó la relación agua cemento a 0,40 y el aditivo a 2,00% del peso de cemento. Esto mejoró la trabajabilidad notablemente y se redujeron los problemas al momento del llenado de probetas que se observaban en la canchada 1. Por otro lado, se modificaron las proporciones de agregados buscando lograr una granulometría de mayor compacidad, que reduzca la segregación. De igual manera se notó algo de segregación, que se atribuyó a que los agregados finos seguían siendo insuficientes en la mezcla.

Para evitar los inconvenientes de la canchada 1 en el amasado de la mezcla, se cambió la secuencia de mezclado. Para comenzar se introdujo el 90% del agua. Le siguió el pedregullo, luego el cemento, y se esperó a que se mezclaran de forma homogénea. A continuación se agregó el resto de los áridos, del más fino al más grueso. Luego se agregó el aditivo con el agua remanente y por último se incorporaron las fibras metálicas. El resultado fue una mezcla más densa que en la anterior canchada, atribuido al cambio de agregados. Se llenó una probeta prismática rectangular.

En la figura 3.5 se observa el resultado del ensayo de cono invertido, que se realizó por primera vez en esta canchada. Se logró un diámetro de 55 cm que si bien no es del todo insatisfactorio, se consideró que para que la mezcla logre llenar la losa completamente sin vibrado, era necesario obtener un hormigón más fluido.



Figura 3.5: Probetas prismáticas de C2P1.

3.4.3. Canchada 3

Se realizaron dos pastones de esta canchada, en los cuales se modificó la dosificación y secuencia de mezclado en base a recomendaciones del Prof.Dr.Ing. Sergio Cavalaro, quien accedió a colaborar en la elaboración del hormigón.

3.4.3.1. Materiales

Componentes	Pastón 1	Pastón 2
Volumen de Hormigón (<i>lt</i>)	30,0	30,0
Arena Fina (<i>kg</i>)	20,5	20,5
Arena Gruesa (<i>kg</i>)	7,7	7,7
Gravillín (<i>kg</i>)	15,3	15,3
Pedregullo (<i>kg</i>)	7,7	7,7
Agua (<i>kg</i>)	5,4	5,4
Cemento (<i>kg</i>)	13,5	13,5
Aditivo (<i>kg</i>)	0,3	0,3
Fibras (<i>kg</i>)	2,7	2,7

Tabla 3.6: Canchada 3. Cantidad de materiales.

3.4.3.2. Observaciones

Pastón 1

La secuencia de hormigonado fue la siguiente. Se introdujeron en la hormigonera todos los áridos, del más fino al más grueso. Luego se incorporó el cemento, la totalidad del agua, el aditivo y las fibras. Se modificó la proporción de agregados de la mezcla, aumentando el porcentaje de finos con respecto a la dosificación de la canchada 2. Se llenó una sola probeta prismática rectangular de este pastón. Se apreció una fina capa de líquido en la superficie de los moldes llenados, que se atribuyó a una posible saturación de aditivo.

El aumento de porcentaje de finos redujo notoriamente la segregación y se observó mayor fluidez del hormigón, hecho que se reflejó en los ensayos de estado fresco. En la figura 3.6(a) se ve el resultado del ensayo de cono invertido para el pastón 1. Se alcanzó un diámetro de 65 *cm* logrando por primera vez el objetivo de escurrimiento propuesto.

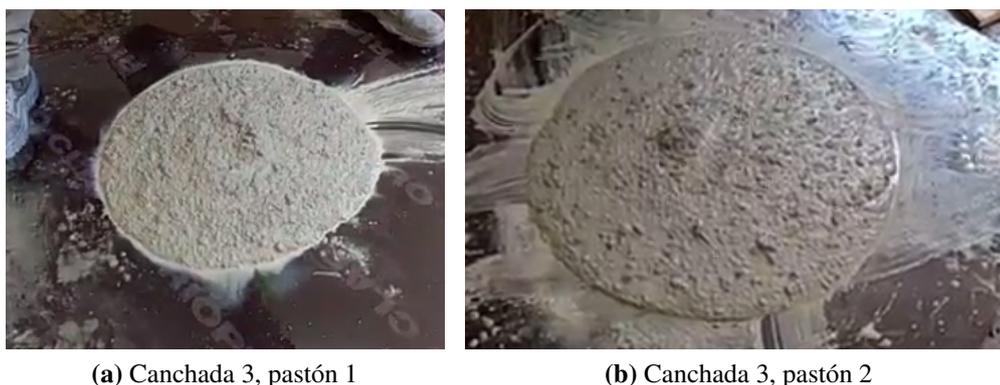


Figura 3.6: Ensayos de cono invertido para pastones de canchada 3.

Pastón 2

Durante la preparación del pastón se quiso reducir la cantidad de aditivo a 1,70%, pero como no se lograba la trabajabilidad deseada, se decidió completar el 2,00% que se venía usando, por lo que el diseño del segundo pastón resulta idéntico al anterior. Como era de esperar las características de ambos fueron muy similares. Se llenaron dos probetas prismáticas rectangulares y el ensayo de cono invertido resultó en un diámetro promedio de 66 *cm* (figura 3.6(b)).

3.4.4. Canchada 4

Se repite la misma dosificación y secuencia de mezclado que en la elaboración de la canchada anterior, buscando replicar los resultados en un volumen mayor de

hormigón. De esta canchada se realizó un solo pastón.

3.4.4.1. Materiales

En la tabla 3.7 se detallan los materiales empleados en la canchada 4 y el volumen total del hormigón que se confeccionó.

Componentes	Pastón 1
Volumen de Hormigón (<i>lt</i>)	50,0
Arena Fina (<i>kg</i>)	34,1
Arena Gruesa (<i>kg</i>)	12,8
Gravillín (<i>kg</i>)	25,5
Pedregullo (<i>kg</i>)	12,8
Agua (<i>kg</i>)	9,0
Cemento (<i>kg</i>)	22,5
Aditivo (<i>kg</i>)	0,5
Fibras (<i>kg</i>)	4,5

Tabla 3.7: Canchada 4. Cantidad de materiales.

3.4.4.2. Observaciones

La energía de mezclado de la hormigonera utilizada fue apenas suficiente para las primeras etapas de la elaboración, por lo que no resultó práctico aumentar el volumen del pastón a 50 *lt*.

Nuevamente se observó una buena trabajabilidad en el hormigón. En las figuras 3.7(a) y 3.7(b) se pueden ver distintas etapas del mezclado. En la figura 3.7(c) se muestra el resultado del ensayo de cono invertido, que resultó en un diámetro de 66 *cm*. Se destaca que en dicho ensayo hubo una mayor presencia del agregado grueso en el centro del círculo respecto a los bordes. Se llenaron tres probetas prismáticas rectangulares y se observó una disminución del líquido en la superficie respecto a la canchada 3.

3.5. Resultados

Se consideró que los resultados de la canchada 4 fueron satisfactorios, por lo que se dio por finalizada la campaña experimental. En la tabla 3.8 se describe la dosificación obtenida.



Figura 3.7: Elaboración de la canchada 4.

Arena fina (kg/m^3)	671,4	(40%) ¹
Arena Gruesa (kg/m^3)	251,8	(15%)
Gravillín (kg/m^3)	503,5	(30%)
Pedregullo (kg/m^3)	251,8	(15%)
Agua (lt/m^3)	180,0	
Cemento (kg/m^3)	450,0	
Aditivo (kg/m^3)	9,0	(2%) ²
Fibras (kg/m^3)	90,0	
Relación Agua Cemento	0,4	

¹ Porcentaje del total de áridos.

² Porcentaje del peso de cemento.

Tabla 3.8: Dosificación final.

El diámetro promedio de la torta de hormigón para el ensayo de cono invertido correspondiente a la dosificación final fue de 66 *cm* (figura 3.7(c)), logrando el objetivo propuesto. Además se logró constatar visualmente que la mezcla no presentaba segregación, alcanzando tanto el árido grueso como las fibras metálicas el borde de la torta. No se apreciaron fenómenos de exudación.

En la figura 3.8 se muestra una comparación de la granulometría de los áridos de la mezcla (canchadas 2,3 y 4) con la recomendación establecida en el artículo de Destrée y Mobasher (2010), sobre el diseño y construcción de losas elevadas de HRFM.

En la tabla 3.9 se presentan las dos secuencias de mezclado que resultaron ser

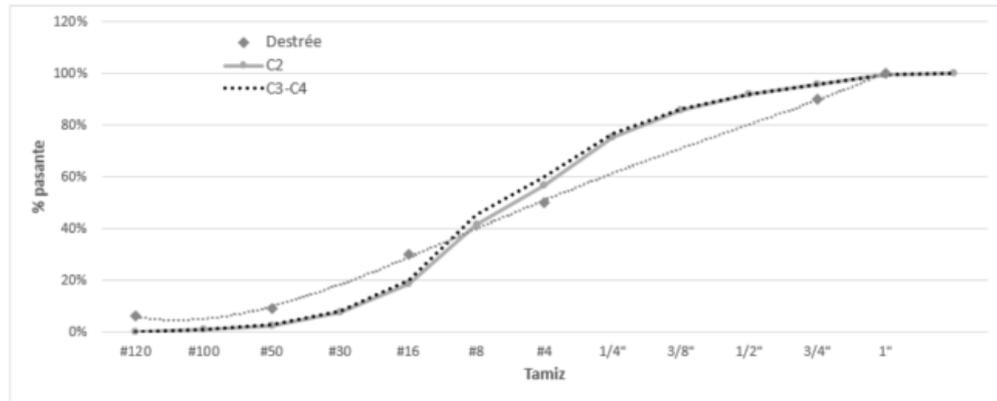


Figura 3.8: Comparación de granulometrías.

las más aptas para la elaboración del HRFM.

	Secuencia 1	Secuencia 2
1	Totalidad de agregados ¹	90 % Agua
2	Cemento portland	Pedregullo
3	85 % Agua	Cemento
4	15 % Agua con Aditivo	Agregados restantes ²
5	Fibras metálicas	10 % Agua con Aditivo
6		Fibras metálicas

¹ En orden: Del más fino al más grueso

² En orden: Del más grueso al más fino

Tabla 3.9: Secuencias de mezclado.

3.6. Conclusiones Parciales

El resultado final se considera satisfactorio y se establece la dosificación final (apartado 3.5) como material para la ejecución de los elementos definidos en el proyecto.

Se deberá estudiar en mayor profundidad las modificaciones a realizar para ejecutar una canchada a mayor escala de forma tal que mantenga las propiedades conseguidas en laboratorio.

En cuanto a la granulometría de los áridos, se observa que el punto de partida que se adoptó no fue el adecuado, pero con las sucesivas iteraciones se logró un resultado satisfactorio. A efectos prácticos, y teniendo en mente los objetivos plan-

teados para nuestra campaña experimental, no se consideró necesario seguir iterando con las proporciones de agregados. Sin embargo, a futuro se puede estudiar los efectos de una mezcla con una granulometría más aproximada a la recomendación planteada en Destrée y Mobasher (2010).

Consideramos que la incorporación de adiciones, como es habitual en la dosificación de HRFMAC según se constató en la bibliografía consultada, podría mejorar sus propiedades y permitiría reducir el contenido de cemento. Sin embargo, esta solución incrementaría notoriamente el costo de los materiales.

En lo que refiere a las secuencias de mezclado, se concluye que es un factor que incide en la ejecución de la hormigón. Al utilizar las secuencias de la tabla 3.9, se redujeron los tiempos de mezclado y se evitaron los inconvenientes observados inicialmente.

En función de nuestra experiencia en laboratorio, se destacan dos factores a tener en cuenta a la hora de ejecutar cualquier secuencia de hormigonado. El primero es incorporar el aditivo junto con una fracción del agua de mezclado, ya que de esta forma se distribuye rápidamente en la masa reduciendo el tiempo requerido para lograr el efecto deseado. El segundo es incorporar las fibras metálicas al final de la secuencia. En particular, las fibras encoladas se distribuyen de manera rápida en la masa, por lo que largos tiempos de mezclado pueden inducir a la formación de "erizos".

Otro aspecto importante a destacar es que para tiempos de mezclado de entre 5 y 15 minutos a partir de la incorporación de las fibras metálicas, no se constató la formación de erizos. Puede resultar interesante el estudio de cuánto tiempo de mezclado produce dicho fenómeno en condiciones de laboratorio o a gran escala.

Como conclusión final, dado el resultado del ensayo de cono invertido, en conjunto con el control visual de los parámetros de segregación, exudación, y distribución homogénea tanto del árido grueso como de las fibras metálicas, concluimos que la dosificación final clasifica como hormigón autocompactante.

Capítulo 4: Implementación del ensayo EN 14651:2005 en Uruguay

4.1. Introducción

La norma EN 14651:2005 define el procedimiento de ensayo para determinar la resistencia a la tracción por flexión en tres puntos para probetas prismáticas entalladas de HRFM.

A partir del ensayo propuesto se obtiene la tensión en el límite de proporcionalidad del material, así como un conjunto de valores de resistencia residual a la tracción por flexión, así llamadas por pertenecer al rango de deformaciones plásticas.

La aplicabilidad de la norma se limita a hormigones reforzados con fibras metálicas de hasta 60 mm de longitud. A su vez, contempla el uso tanto de fibras exclusivamente metálicas o una combinación de fibras metálicas con otros tipos de fibra, como pueden ser las plásticas.

La norma fue elaborada por el Comité Europeo de Normalización (CEN) en el año 2005 y recibió una modificación en el año 2017.

4.1.1. Motivación

El ensayo de flexión en tres puntos se ha convertido en un estándar ampliamente utilizado en todo tipo de aplicaciones y trabajos de investigación referidos al HRFM, y en particular para proyectos enfocados a elementos de alta responsabilidad estructural.

Con el objetivo de introducir el HRFM en el mercado local, es fundamental contar con la posibilidad de realizar un buen control de calidad a través del ensayo más utilizado para este fin. Esto implica una serie de ventajas a la hora de trabajar con el material:

- Permite cuantificar las propiedades resistentes del material.
- Establece una metodología clara para la comparación de distintas dosificaciones o variantes de HRF.

- Produce una curva de tensión contra deformación que puede ser utilizada en conjunto con los modelos estructurales o métodos analíticos existentes y de comprobada confiabilidad.
- Permite referenciar comparativamente la calidad del producto elaborado con los resultados obtenidos en otras regiones.

Por otro lado, el ensayo brinda información fundamental para el diseño y cálculo de cualquier elemento que utilice este tipo de material, permitiendo un análisis a nivel seccional de distribución de tensiones y deformaciones, y por ende un modelo teórico del comportamiento estructural tanto en estado límite último, como en servicio.

4.1.2. Objetivo

Implementar el ensayo a flexión en tres puntos para probetas entalladas de HRFM según las indicaciones y parámetros establecidos en la norma EN 14651.

Conseguir los materiales, equipos y conocimientos necesarios para que la ejecución del ensayo sea satisfactoria y repetible por terceros.

Estudiar la viabilidad de la mezcla desarrollada en el capítulo 3 para su uso en un elemento estructural de alta responsabilidad, sin necesidad de refuerzos de acero tradicionales.

4.1.3. Definiciones de Interés y Normas de Referencia

Para la correcta interpretación e implementación de la norma EN 14651 es necesario definir algunos términos.

4.1.3.1. Desplazamiento de Apertura de Fisura (*CMOD: Crack mouth opening displacement*)

Se trata de un parámetro relacionado al desplazamiento lineal, con unidades de longitud, que cuantifica la apertura de una fisura dada. Estas distancias están comprendidas entre 0 y 4 milímetros y deben ser medidas con un equipo especialmente dedicado a esta función, llamado *Clip Gage Transducer*, o simplemente *Clip*. En la figura 4.1(a) se puede observar el dispositivo presentado para su utilización en el ensayo de flexión a tres puntos.

Durante el ensayo, la apertura de fisura se mide en tiempo real en la sección central de la probeta entallada.

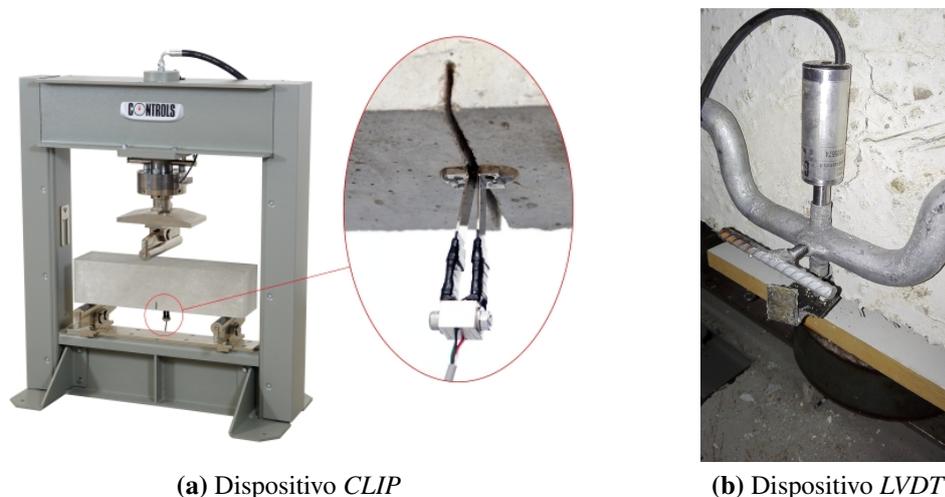


Figura 4.1: Dispositivos de medición de desplazamientos. Fuente imagen (a): Controls-Group.

4.1.3.2. Flecha

Es un parámetro de desplazamiento lineal vertical, medido en el punto medio de la longitud de la probeta. Usualmente, se mide con un Transformador Diferencial de Variación Lineal o *LVDT* por sus siglas en inglés. En la figura 4.1(b) se presenta una imagen ilustrativa del dispositivo.

4.1.3.3. Límite de Proporcionalidad

Se trata de un estado tensional, referido a la sección central de la probeta, para el cual se asume una distribución lineal de tensiones, y representa el límite entre el comportamiento lineal y no-lineal del material para la configuración de carga y apoyos establecida. Esto implica que se puede hacer referencia a la carga aplicada, desplazamiento o tensión máxima de tracción en el límite de proporcionalidad.

4.1.3.4. Resistencia Residual a la Tracción por Flexión

Tensión ficticia máxima, asumiendo una distribución lineal en la sección de la entalla, en un estado posterior al límite de proporcionalidad, para un determinado valor de deformación. El calificativo ficticio obedece a que se asume una distribución lineal de tensiones en una sección que se sabe está fisurada. La norma define cuatro valores de *CMOD* (0,5, 1,5, 2,5 y 3,5 *mm*) para los cuales se calculan los valores de tensión residual asociada. Estos cuatro valores de tensión ficticia son los resultados más importantes del ensayo, y se desarrollan en mayor profundidad en el

apartado 4.2.3.2.

4.2. Descripción del Ensayo

El comportamiento a tracción del Hormigón Reforzado con Fibras Metálicas (HRFM) se evalúa y cuantifica en función de los valores de resistencia residual a la tracción por flexión. Estos valores pueden ser determinados, para una probeta de características definidas, a partir de la curva de **fuerza contra apertura de fisura, medida en la sección de falla** de dicha probeta.

Las tensiones residuales son generadas por una única carga puntual que es aplicada en el centro de la luz de la probeta, la cual se apoya en dos soportes separados $500 \pm 2 \text{ mm}$ entre sí. Para asegurar que tanto los apoyos como la carga se generan puntualmente, se utilizan rodillos de acero de $30 \pm 1 \text{ mm}$ como se ilustra en la figura 4.2. El largo de los rodillos debe ser al menos 10 mm mayor que el ancho de la probeta.

4.2.1. Requerimientos para las Probetas de Ensayo

Las probetas de hormigón utilizadas para el ensayo deben seguir las indicaciones de la norma EN 12390 *Ensayos de hormigón endurecido*. En particular: la *Parte 1: Forma, medidas y otras características de las probetas y moldes* y la *Parte 2: Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia*.

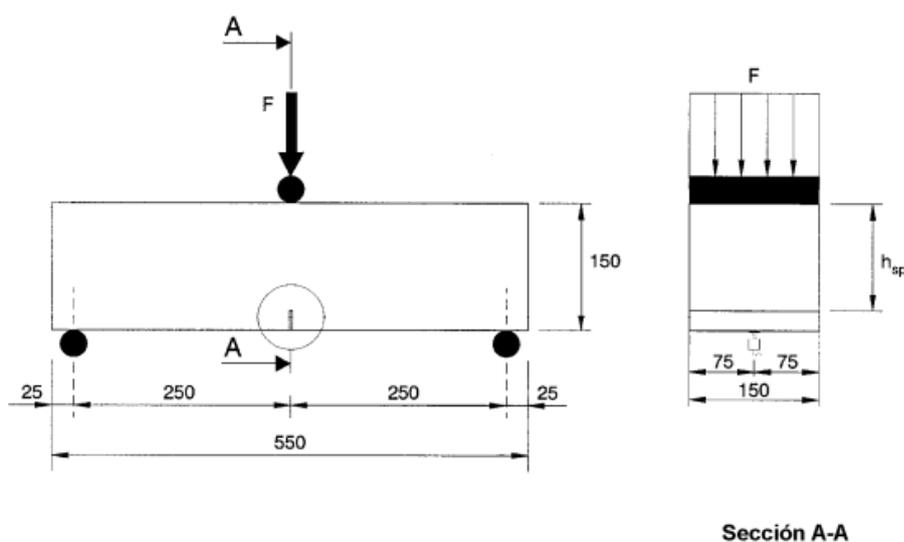


Figura 4.2: Dimensiones de probeta y entalla. Fuente: EN 14651.

En la figura 4.2 se diagrama una probeta de ensayo con sus correspondientes medidas. El largo total debe estar comprendido entre 550 *mm* y 700 *mm*, mientras que el ancho y alto nominales deben ser de 150 *mm*.

Tanto la forma como el tamaño de las probetas definidas por la norma se consideran adecuados para un tamaño máximo de árido de 32 *mm* y fibras de hasta 60 *mm* de longitud.

Para el proceso de llenado del molde, inicialmente debe verterse una fracción del hormigón en el centro del molde, para completar luego el restante en los extremos. Para mezclas no autocompactantes, se debe llenar hasta el 90% de la altura de la probeta antes de la compactación, y luego se completa el faltante mientras se compacta y enrasa. Para HRFMAC, el molde debe completarse y enrasarse sin compactación.

4.2.2. Equipos Necesarios para el Ensayo

4.2.2.1. Prensa hidráulica con control de desplazamiento

Para la aplicación de la carga puntual, es necesario emplear un dispositivo capaz de aplicar la fuerza de forma tal que las deformaciones que se desarrollan en la probeta aumenten a un ritmo controlado. Esto se consigue conectando medidores de desplazamiento, ya sean *LVDT* o *CLIP*, a la prensa permitiéndole regular la carga aplicada en tiempo real. La norma exige que el sistema de medición de desplazamientos sea capaz de transmitir la información con una frecuencia de por lo menos 5 *Hz*. Un ejemplo de este tipo de prensa con control de desplazamiento se muestra en la figura 4.3

4.2.2.2. Medición de los desplazamientos en tiempo real

El desplazamiento de mayor interés durante el ensayo de flexión es el de apertura de fisura, ya que se relaciona directamente con el estiramiento de las fibras. Para esto, es necesario medir dicha apertura de fisura en la sección de falla. Más adelante, en el apartado 4.2.3.1 se explica cómo se puede predecir con exactitud dónde se genera dicha sección de falla.

En el apartado 4.1.3.1 se definió qué es la apertura de fisura, y se menciona el dispositivo utilizado para medir este parámetro directamente, el *CLIP*. Este dispositivo mide en tiempo real la apertura de fisura, lo cual facilita el cálculo del estiramiento de las fibras, y por ende puede determinarse la tensión a la que las mismas están sometidas.

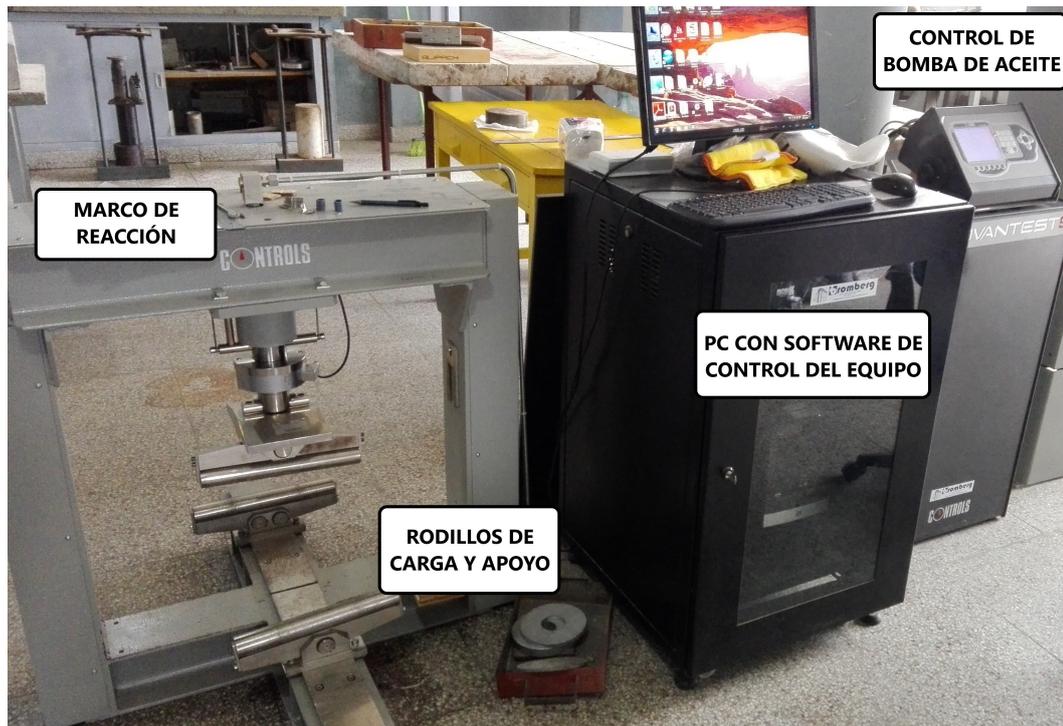


Figura 4.3: Prensa hidráulica con control de desplazamientos en el Laboratorio de Vialidad del Ministerio de Transporte y Obras Públicas.

Por otro lado, en el apartado 4.1.3.2 se define la flecha de la probeta y cómo medir su magnitud durante el ensayo. Para relacionar este parámetro y la apertura de fisura, debe hacerse una hipótesis muy relevante: La probeta de ensayo, luego de fisurar, se comporta como dos cuerpos rígidos unidos por una articulación plástica ubicada en la sección de falla. Esta hipótesis implica que existe una relación unívoca entre la flecha y la apertura de fisura, que la norma establece de la siguiente manera:

$$\delta \text{ (mm)} = 0,85 \text{ CMOD (mm)} + 0,04 \text{ (mm)} \quad (4.1)$$

Donde δ es la flecha en milímetros y *CMOD* es la apertura de fisura, en milímetros. A su vez, la norma presenta la tabla 4.1 con los valores de conversión entre ambos parámetros.

Esta relación empírica se obtiene de observaciones experimentales relevadas a partir de una gran cantidad de ensayos realizados, y permite realizar las mediciones del ensayo en función de la flecha o de la apertura de fisura indistintamente. Al ser una relación geométrica, depende en gran medida de las dimensiones de la probeta y el dispositivo de ensayo, sobre todo de la longitud entre apoyos y altura de la probeta.

En el apartado 4.2.3.1 se comenta extensamente sobre la necesidad de medir los

$CMOD$ (mm)	δ (mm)
0,05	0,08
0,10	0,13
0,20	0,21
0,50	0,47
1,50	1,32
2,50	2,17
3,50	3,02
4,00	3,44

Tabla 4.1: Relación entre $CMOD$ y δ . Fuente: EN 14651

desplazamientos en la sección de falla. Debido al alto costo del *Clip*, resultó difícil conseguir uno, por lo que se optó por la medición de la flecha con *LVDT*, para luego realizar la conversión a apertura de fisura. A su vez, esto implica la necesidad de contar con un dispositivo auxiliar para soportar el *LVDT* de forma independiente a la probeta, pero manteniendo un nivel de referencia constante. Para esto se colocan dos horquillas de soporte en las probetas sobre los apoyos como se puede ver en la figura 4.4. El nivel de referencia queda marcado entonces por la línea roja, que no es afectada por los desplazamientos de la viga durante el ensayo. A su vez, las horquillas soportan dos puentes, uno a cada lado de la probeta, que son los que permiten posicionar dos *LVDT* para medir la flecha de la viga en el centro de la luz de ensayo. De esta forma, los medidores se soportan de forma independientes a los desplazamientos de la probeta, permitiendo mantener un nivel de referencia constante durante el ensayo para la medición de la flecha en la sección central. Finalmente, las lecturas de ambos *LVDT* son promediadas y se grafica el valor medio de los desplazamientos registrados.

4.2.3. Desarrollo del Ensayo

4.2.3.1. Sección de falla

Con el fin de determinar con precisión el estado tensional de las fibras en la sección de falla, es necesario conocer el **momento flector que actúa en esa sección particular**. Por esta razón, históricamente se han utilizado para ensayos similares cargas a los tercios de la luz, que generan un momento flector constante en el tercio central de las probetas de ensayo, como se ilustra en la figura 4.5. Esto implica que, si se constata que la sección de falla se produce en la zona de momento uniforme,

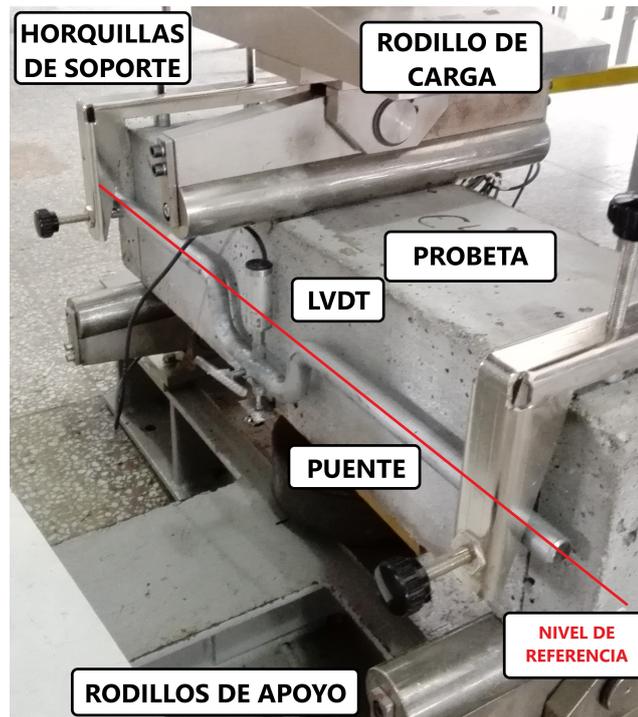


Figura 4.4: Probeta preparada para ensayar. Se ven: Horquillas, Puentes, LVDT y Prensa. En rojo, se marca el nivel de referencia para los desplazamientos verticales.

se conoce con certeza el momento que produjo dicha falla.

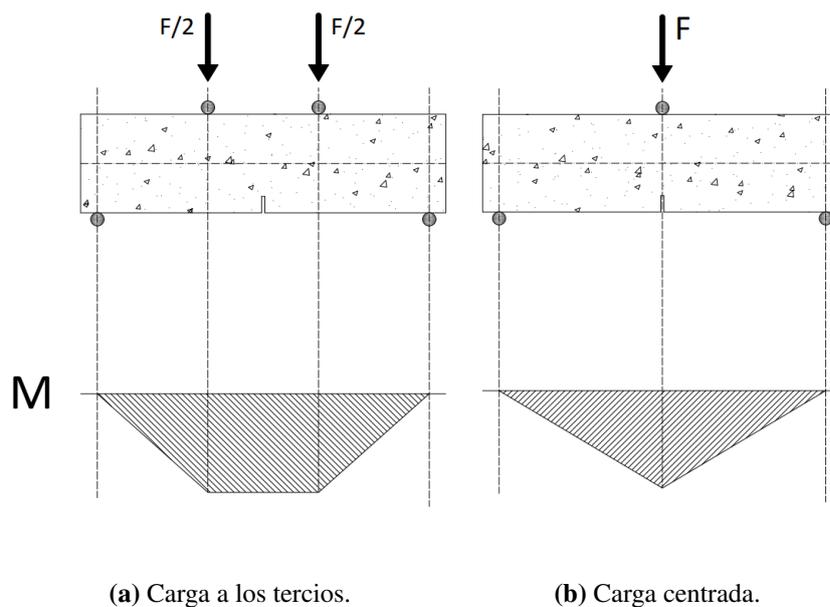


Figura 4.5: Diagramas de momento flector para ensayo de flexión con carga a los tercios (a) y carga centrada (b).

El estado tensional generado por la configuración descrita puede simplificarse a un problema plano, en el cual el diagrama de momento flector resulta ser triangular con su valor máximo debajo del punto de aplicación de la carga. Si se estudiara un material perfectamente homogéneo e isotrópico, se podría asegurar con alto grado de certeza que la rotura se generará en la sección de momento máximo. Esto no ocurre en el caso del HRFM, dado que la variabilidad intrínseca de la distribución y orientación de las fibras rompe con las hipótesis consideradas. Esto se refleja también en la práctica, observándose gran variabilidad en la ubicación de la sección de falla en probetas prismáticas.

Para resolver este problema, la norma introduce una reducción puntual en el centro de la probeta prismática, denominada **entalla**. La altura de la entalla debe ser tal que la altura de la sección reducida sea $125 \pm 1 \text{ mm}$, su espesor no puede superar los 5 mm y debe atravesar el ancho total de la probeta.

Se observa claramente en la figura 4.6(b), que la sección de falla presenta una porción de la sección con un corte limpio y recto, en contraste con el resto de la superficie de rotura que es aleatorio. Esto indica que la falla se generó efectivamente en la sección reducida por la entalla.



Figura 4.6: Probetas prismáticas para ensayo EN 14651.

4.2.3.2. Resultados del ensayo

El objeto del ensayo es registrar una curva de carga aplicada en función de la apertura de fisura en la sección de la entalla (*CMOD*). Un ejemplo de esta curva se puede ver en la figura 4.7. A partir de esta curva, se obtienen cinco valores de carga, correspondientes a determinados valores de *CMOD*: F_L , F_1 , F_2 , F_3 y F_4 .

El valor de la carga F_L se define como el límite de proporcionalidad (Ver apartado 4.1.3.3) y corresponde al máximo valor de fuerza en el intervalo de *CMOD* entre

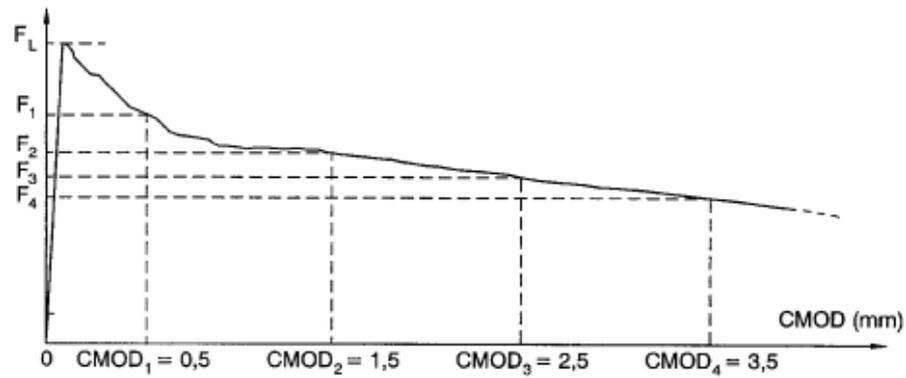


Figura 4.7: Ejemplo de Curva de Carga (kN) vs $CMOD$ (mm). Fuente: EN 14651.

0 y 0,05 mm , como se ilustra en los ejemplos de la figura 4.8.

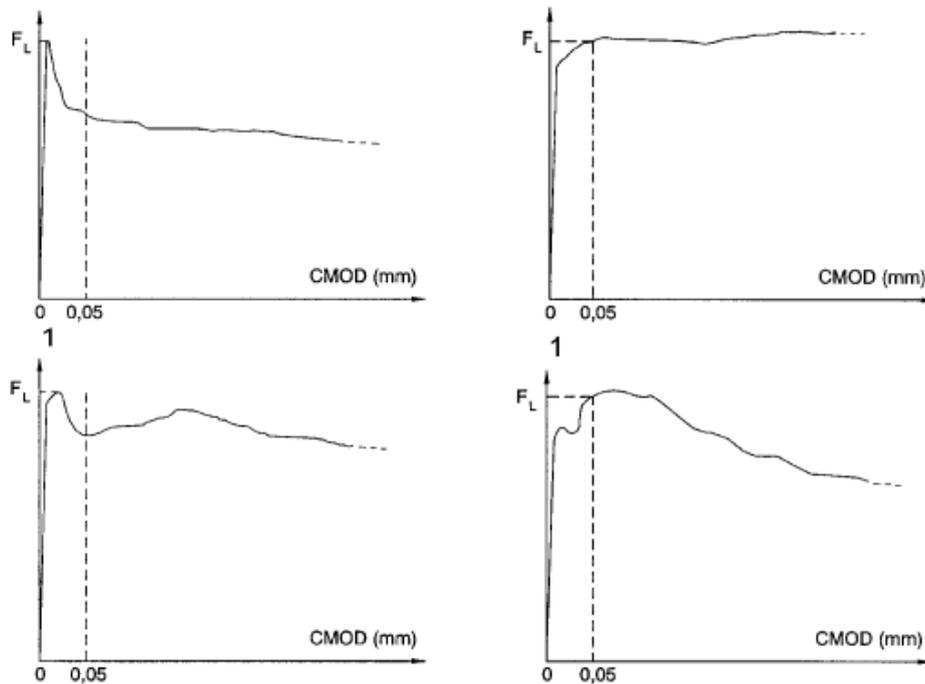


Figura 4.8: Ejemplos de determinación de F_L . Fuente: EN 14651.

Por otro lado, los valores de F_j (con $j = 1, 2, 3, 4$), corresponden al valor de la curva para $CMOD$ de 0,5, 1,5, 2,5 y 3,5 mm respectivamente. En función de estos valores de carga, se determinan las tensiones residuales

4.2.3.3. Determinación de las tensiones Residuales

La distribución de tensiones asumida para la sección de la entalla es lineal, con la línea neutra ubicada en el baricentro, como se puede apreciar en la figura 4.9.

Se trata de una simplificación respecto de la distribución compleja que se mide experimentalmente durante estos ensayos.

Como ventaja, esta simplificación permite aplicar las conocidas ecuaciones de resistencia de materiales elástico-lineales, en particular las de un momento puro aplicado en una sección rectangular. Sabemos entonces que el valor máximo (tanto positivo como negativo) de estas tensiones vale:

$$\sigma_{max} = \frac{M}{W} \tag{4.2}$$

Donde M es el momento flector aplicado, y W es el módulo resistente de la sección rectangular, que se puede calcular como:

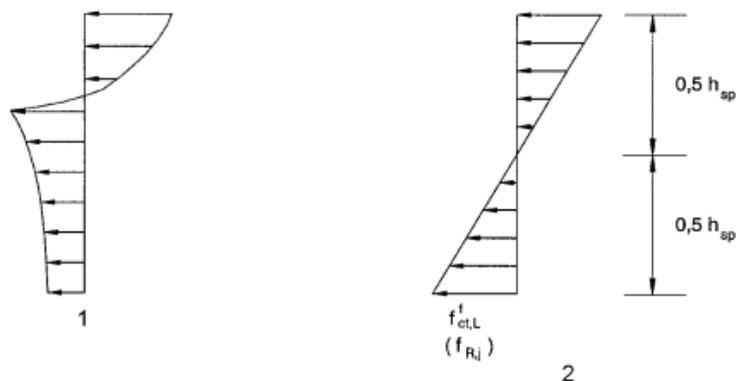
$$W = \frac{b \cdot h_{sp}^2}{6} \tag{4.3}$$

Donde b es el ancho de la probeta (15 cm) y h_{sp} es la altura de la misma en la sección de la entalla (12,5 cm). Sabiendo que el momento generado por una carga puntual aplicada en el centro del vano de una viga simplemente apoyada vale:

$$M = \frac{F \cdot L}{4} \tag{4.4}$$

Sustituyendo en la ecuación 4.2 se obtiene la fórmula para el cálculo de las tensiones residuales de la probeta ensayada:

$$f_{R,j} = \frac{F_j \cdot L}{4} \frac{6}{b \cdot h_{sp}^2} = \frac{3F_j L}{2bh_{sp}^2} \tag{4.5}$$



Leyenda
 1 Distribución real de tensiones
 2 Distribución adoptada de tensiones

Figura 4.9: Distribución real de tensiones y distribución simplificada asumida. Fuente: EN 14651.

4.2.3.4. Velocidad de crecimiento de la apertura de fisura

La velocidad de crecimiento del *CMOD* durante la primera parte del ensayo debe ser uniforme, con valor de $0,0500 \text{ mm/min}$, o equivalentemente, el crecimiento de la flecha debe ser de $0,0425 \text{ mm/min}$. Una vez alcanzado el valor de *CMOD* de $0,10 \text{ mm}$ (δ de $0,125 \text{ mm}$) se puede incrementar la velocidad de crecimiento de la apertura de fisura a $0,20 \text{ mm/min}$ para *CMOD*, que equivale a $0,17 \text{ mm/min}$ para la flecha. Esto obedece a que, una vez superado el límite de proporcionalidad y por lo tanto el tramo elástico, la ductilidad del material está determinada completamente por las fibras que *cosen* la sección fisurada. Al eliminar la componente frágil que representa el hormigón en tracción, se puede incrementar la velocidad de desarrollo de las tensiones sin que esto represente una variación significativa en la resistencia residual calculada.

El valor mínimo de *CMOD* que se debe alcanzar para considerar satisfactorio el ensayo es de $4,00 \text{ mm}$, o equivalentemente, $3,44 \text{ mm}$ de flecha.

4.3. Metodología

Para realizar los ensayos de nuestra campaña experimental se utilizaron las probetas obtenidas de las canchadas realizadas para el desarrollo de la dosificación de un HRFMAC, según lo detallado en el capítulo 3. Esto implica que no todas las probetas ensayadas tenían las mismas propiedades y esto se refleja en los resultados obtenidos.

4.3.0.1. Procedimiento de Ensayo

Como primer paso, se determinaron las dimensiones de las probetas a ensayar, con un calibre que permite una precisión de $0,1 \text{ mm}$, comprobando que se encontraban dentro de las tolerancias establecidas por la norma.

En la tabla 4.2 se detalla la lista de probetas ensayadas, su identificación, dimensiones y a qué canchada pertenecen.

Posteriormente, se limpiaron todas las superficies portantes, eliminando todo material extraño o polvillo que pueda encontrarse en las zonas de contacto de la probeta con los rodillos.

Se verificó que las probetas a ensayar sean colocadas en la máquina de ensayo correctamente centradas y con su eje longitudinal perpendicular al eje de los rodillos de carga.

Canchada	Pastón	Viga	H_{sp} (mm)	L (mm)	b (mm)
C1	P1	V1	125,5	450,0	151,0
C1	P3	V1	124,7	450,0	151,0
C2	P1	V1	125,8	450,0	150,9
C3	P1	V1	124,8	500,0	150,8
C3	P2	V1	125,3	500,0	151,0
C3	P2	V2	125,4	500,0	151,0
C4	P1	V1	125,6	500,0	150,9
C4	P1	V2	125,1	500,0	150,3
C4	P1	V3	125,5	500,0	151,0

Tabla 4.2: Identificación y Dimensiones de probetas ensayadas satisfactoriamente.

Una vez cumplidas todas las exigencias que propone la norma para la configuración del ensayo, se comenzó el procedimiento de ensayo propiamente dicho.

El primer paso consiste en la **carra de contacto**, en la cual la prensa hace un acercamiento del rodillo de carga sobre la probeta para asegurar el contacto firme entre ambos y generar un pequeño acomodamiento tanto de la probeta como de los equipos montados sobre ella, sin generar deformaciones significativas.

El segundo paso es la *precarga*, en la cual se introduce una carga relativamente pequeña de $0,50\text{ kN}$. Esta etapa del ensayo se realiza con control de fuerza, es decir que se introduce la velocidad de incremento de la misma, sin tomar en cuenta la medición de los *LVDT*. Una vez finalizado este paso, se completa la etapa previa al ensayo y el mismo puede comenzar.

Al iniciar el ensayo se resetean o *ceran* las lecturas de los *LVDT*. De esta forma las mediciones de los instrumentos coinciden con la flecha de la probeta.

El ensayo comienza con una etapa de *control de fuerza*, en la que se recorre la región de linealidad entre la fuerza y los desplazamientos. Esta etapa concluye al llegar al objetivo final de carga, que se definió en $2,00\text{ kN}$, aumentando a una velocidad de $60,00\text{ N/s}$, que resulta en una duración total de 33 segundos aproximadamente.

Inicialmente se miden las fuerzas y no los desplazamientos porque en el período lineal la relación entre estos dos parámetros es aproximadamente constante y no hace falta ajustar la carga en cada medición. Además, al independizar el incremento de carga de las medidas de los *LVDT*, se logra una aplicación más uniforme, sin escalones, generando una recta más prolija en el período elástico inicial.

Al llegar a la carga objetivo, se inicia la segunda etapa del ensayo y se debe pasar inmediatamente a *control de desplazamientos*, es decir que la velocidad de

aplicación de carga será gobernada por las mediciones de los LVDT.

La velocidad de crecimiento de los desplazamientos se estableció siguiendo las indicaciones de la norma, dividiendo la etapa en dos partes.

La primera parte se desarrolla desde la precarga hasta una flecha de $125 \mu m$, con una velocidad de $42,5 \mu m/min$, por lo que su duración es de aproximadamente 3 minutos. Además, en esta primera parte se encuentra la Carga Límite de Proporcionalidad (F_L) definida en el apartado 4.2.3.2.

Una vez alcanzado el valor límite de $125 \mu m$, se pasa a la segunda parte de la etapa de *control de desplazamientos*, en la que la velocidad de crecimiento de la flecha se aumenta a $170 \mu m/min$, y abarca el rango entre $125 \mu m$ y $4000 \mu m$, valor establecido como objetivo final para el ensayo. Por lo tanto, la duración total de la segunda parte es de 23 minutos aproximadamente, totalizando 26 minutos de ensayo total.

En la tabla 4.3 se observa un resumen del proceso de ensayo desarrollado.

Etapas:	Previa al Ensayo	Etapa 1	Etapa 2	
Duración:	-	0,5 min	3 min	23 min
Tipo de Control:	Acercamiento	Fuerza	Desplazamiento	
Velocidad de ensayo:	-	60 N/s	42,5 $\mu m/min$	170 $\mu m/min$

Tabla 4.3: Resumen del proceso de ensayo EN 14651.

4.3.1. Post-procesamiento de los datos

Una típica tabla de salida para este ensayo asigna una fila a cada paso o escalón de carga, e indica en sucesivas columnas el tiempo transcurrido desde el inicio del ensayo (en segundos), el nivel de carga aplicado para ese escalón (en kN) y el desplazamiento medido por los instrumentos (ya sea descenso o apertura de fisura, en mm).

Con estos datos se puede graficar la curva fuerza-desplazamiento, la cual brinda la información necesaria para comprender el comportamiento post-fisuración del material, y por ende su capacidad en estado límite último. Además, se obtienen los valores de carga necesarios para calcular las tensiones residuales con los que se cuantifica la resistencia del material.

Estos archivos de salida pueden ser trabajados en planillas de cálculo para hallar los valores exactos de carga que determinan las tensiones residuales. Además, presentan la complicación de ser difíciles de manejar dado que, al tener varias mediciones por segundo, se llega al orden de la 11000 mediciones de datos para cada

ensayo.

4.4. Resultados de la campaña experimental

Se estudian comparativamente las vigas de cada canchada definida en el capítulo 3 por separado, dado que las propiedades del HRFM utilizado en cada una difieren levemente por sus distintas dosificaciones.

En la tabla 4.4 se presenta un resumen de los resultados obtenidos de los ensayos satisfactoriamente realizados.

Nombre	F_{max} (kN)	F_L (kN)	F_1 (kN)	F_2 (kN)	F_3 (kN)	F_4 (kN)
C1 P1 V1	38,64 100 %	27,17 70,30 %	38,07 98,50 %	35,82 92,70 %	32,23 83,40 %	28,81 74,60 %
C1 P3 V1	30,72 100 %	28,08 91,40 %	30,06 97,90 %	25,03 81,50 %	22,67 73,80 %	19,55 63,60 %
C2 P1 V1	24,73 100 %	15,90 64,30 %	23,77 96,10 %	24,29 98,20 %	19,71 79,70 %	16,81 68,00 %
C3 P1 V1	34,83 100 %	15,18 43,60 %	34,75 99,80 %	32,31 92,80 %	28,77 82,60 %	25,99 74,60 %
C3 P2 V1	33,25 100 %	21,68 65,20 %	32,49 97,70 %	30,73 92,40 %	26,87 80,80 %	23,10 69,50 %
C3 P2 V2	21,86 100 %	16,88 77,20 %	21,72 99,40 %	20,63 94,40 %	19,07 87,20 %	17,41 79,60 %
C4 P1 V1	36,64 100 %	18,17 49,60 %	33,83 92,30 %	36,59 99,90 %	34,16 93,20 %	30,98 84,60 %
C4 P1 V2	27,46 100 %	17,52 63,80 %	27,37 99,70 %	26,36 96,00 %	23,30 84,90 %	21,00 76,50 %
C4 P1 V3	36,4 100 %	17,90 49,10 %	34,00 93,60 %	36,00 99,00 %	33,20 91,10 %	29,30 80,60 %

Tabla 4.4: Resumen de resultados de todas las probetas ensayadas.

4.4.1. Canchadas 1 y 2

Las primeras dos dosificaciones que se realizaron no lograron los requerimientos particulares que se plantearon como objetivo. Si bien sus resultados a flexión no fueron usados como referencia para los trabajos siguientes, se logró validar el

método de ensayo, completando los primeros ensayos en probetas de fibras metálicas llegando a los 4 mm de flecha en el centro de la probeta. En la figura 4.10 se observan las curvas de fuerza contra flecha obtenidas.

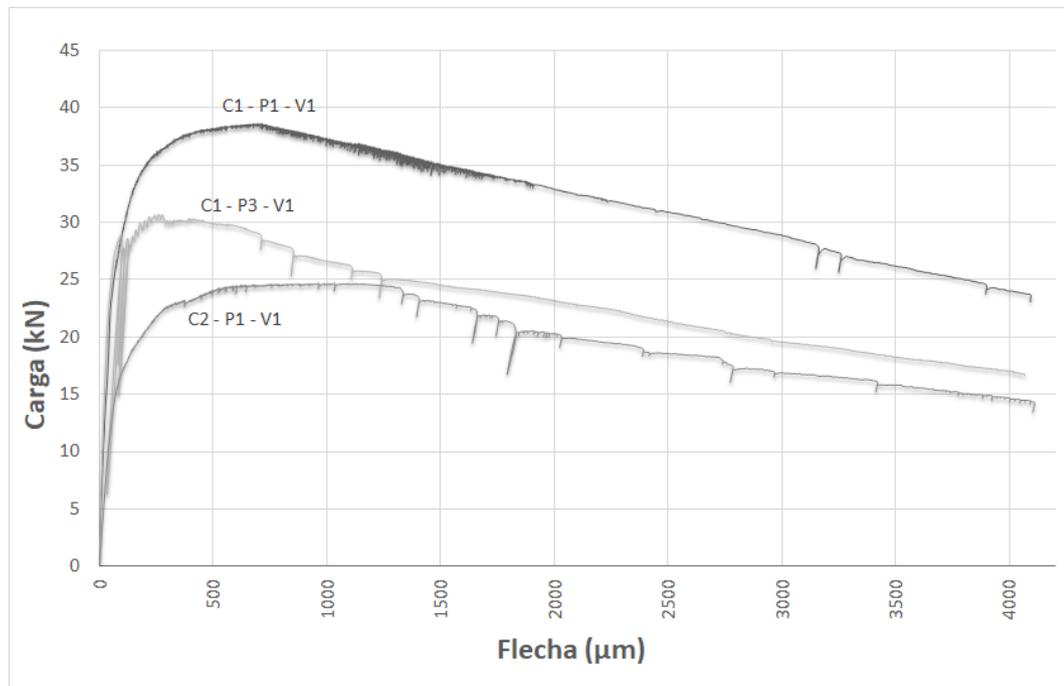


Figura 4.10: Gráfica de Carga contra Flecha para las probetas ensayadas de las canchadas 1 y 2

La variabilidad observada en la carga máxima obtenida puede explicarse con las modificaciones introducidas en cada pastón, buscando lograr mezclas más trabajables. Por ejemplo, el pastón 1 de la canchada 1 se elaboró con una baja relación agua cemento (ver apartado 3.4.1), lo que contribuye a una mejor resistencia del hormigón y por ende valores mayores de carga para los mismos desplazamientos que las otras probetas.

La ductilidad del material se constata al comparar las cargas obtenidas al final del ensayo, por ejemplo F_4 correspondiente a una apertura de fisura de 3,5 mm, con la carga pico. En ningún caso esta proporción bajó del 63%.

A pesar de las diferencias en el valor de las cargas aplicadas entre las probetas, se puede apreciar una tendencia clara en la forma de los diagramas, alcanzando un valor máximo en el entorno de los 0,5 mm de apertura de fisura, para luego decaer de forma uniforme hasta el final del ensayo. Es razonable asumir que incluso para valores mayores de apertura de fisura esta tendencia se mantendrá, permitiendo desarrollar las deformaciones de las fibras hasta su límite. Esto se traduce en un Hormigón con gran ductilidad, que puede ser usado para el diseño de elementos

estructurales en estado límite último.

Resulta interesante apreciar el tramo inicial de las curvas, donde se produce un período ajustable a una relación lineal. La pendiente de este tramo inicial aparenta ser indistinta del valor de la resistencia pico para cada probeta.

Otro aspecto a destacar son las caídas puntuales de carga que se generan a lo largo de los ensayos. Se observan en las gráficas como pequeñas desviaciones, que luego retoman la tendencia previa a la caída. Estos fenómenos se asocian a eventos puntuales donde la propagación de fisuras en el hormigón provoca un aumento brusco en las tensiones de las fibras, incrementando el estiramiento de las mismas. Esto repercute en un descenso de la carga de la prensa, que retroactivamente intenta compensar ese aumento repentino en la velocidad de crecimiento del desplazamiento. Es importante destacar que el material tiene la capacidad de absorber estos cambios bruscos de funcionamiento, redistribuyendo las tensiones de tracción a las fibras de forma dúctil, incluso para valores grandes de apertura de fisura.

Al calcular las tensiones residuales de las primeras dos canchadas, se debe tener en cuenta que la luz del ensayo realizado fue de 450 *mm*, siendo la definida por norma de 500 *mm*. Esto se debe a que no se contaba con los equipos necesarios para poder implementar la luz de 500 *mm*. Los resultados se presentan en la tabla 4.5.

Nombre	f_L (MPa)	$f_{r,1}$ (MPa)	$f_{r,2}$ (MPa)	$f_{r,3}$ (MPa)	$f_{r,4}$ (MPa)
C1 P1 V1	7,71	10,19	9,16	8,17	7,50
C1 P3 V1	6,58	7,19	6,51	5,61	5,29
C2 P1 V1	4,49	6,87	5,56	4,76	4,47

Tabla 4.5: Tensiones residuales calculadas para las probetas de las canchadas 1 y 2.

El análisis probabilístico de estas tensiones residuales pierde sentido ante las mencionadas diferencias intrínsecas de los materiales que componen cada probeta. Se consigue, sin embargo, un conjunto de valores de tensión residual que está acorde a los resultados esperados según la bibliografía revisada, lo cual valida los procedimientos de ensayo empleados.

4.4.2. Canchadas 3 y 4

Como se describe en los apartados 3.4.3 y 3.4.4, las dosificaciones diseñadas para estas mezclas son idénticas, por lo que se decidió estudiarlas como una población única.

Las gráficas de fuerza contra flecha extraídas de los ensayos de estas probetas se presentan en la figura 4.11.

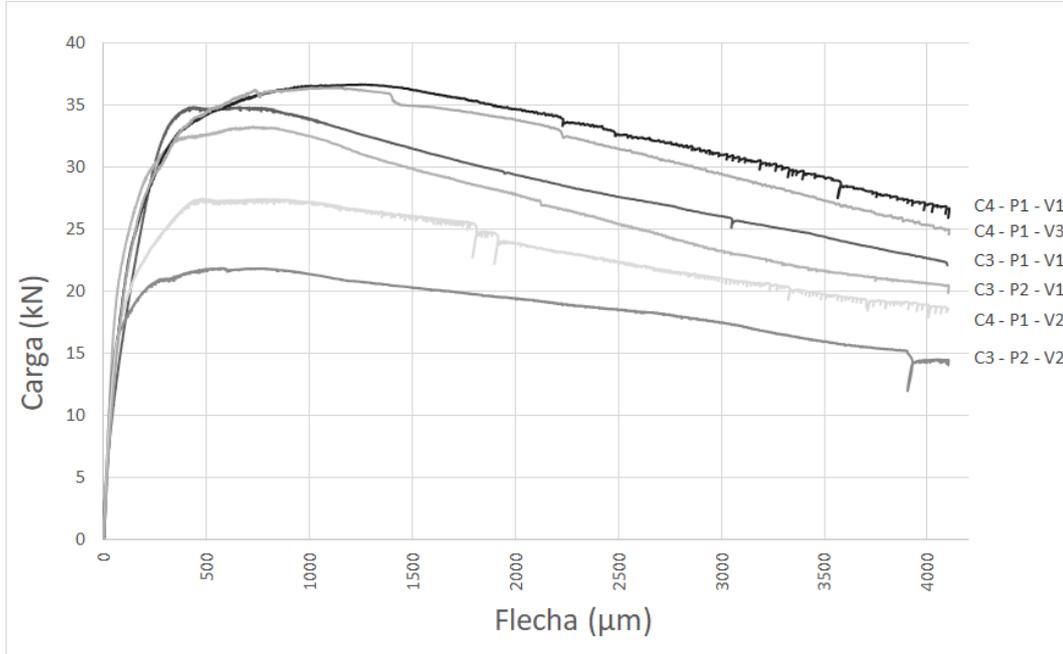


Figura 4.11: Gráfica de Carga contra Flecha para las probetas ensayadas de las canchadas 3 y 4

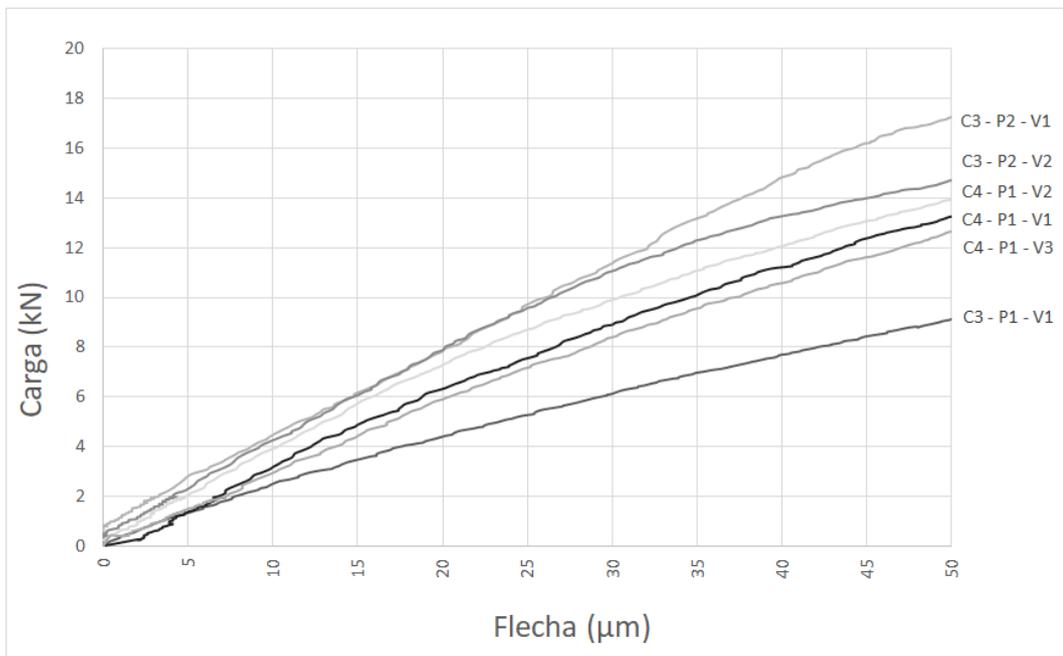


Figura 4.12: Gráfica de Carga contra Flecha, intervalo entre 0 y 50 micrómetros, para las probetas ensayadas de las canchadas 3 y 4

La uniformidad de las propiedades de la mezcla de hormigón repercute directamente en los resultados del ensayo, reflejándose en un período lineal inicial muy similar en todas las probetas ensayadas. Esto se ilustra en la figura 4.12 donde se amplifica el rango entre 0 y 50 micrómetros de flecha.

Además, se observó una clara tendencia en la forma del diagrama, con presencia del fenómeno de strain-hardening o endurecimiento. El mencionado fenómeno es uno de los posibles comportamientos observados en las probetas de HRF, caracterizado por un incremento de la fuerza aplicada luego de pasado el límite de proporcionalidad. El comportamiento con endurecimiento es típico de probetas con alto contenido de fibras, generalmente de alta resistencia (por ejemplo, fibras metálicas). En contrapartida, el comportamiento con ablandamiento presenta su carga pico al llegar al límite de proporcionalidad y luego se aprecia una caída en el valor de carga aplicada para desplazamientos mayores. Esto se asocia generalmente a cuantías de fibra bajas, y resistencias menores de las mismas (por ejemplo, fibras plásticas). En forma simplificada, definimos como condición para el comportamiento con endurecimiento la relación: $F_3 > F_L$, lo cual se constata en las 6 probetas ensayadas con los valores presentados en la tabla 4.4. En cuanto a la ductilidad del material, se aprecia que el valor de F_4 para cada una de las probetas se encontró por encima del 69,5% del valor de su carga pico correspondiente.

En la tabla 4.6 se presentan los valores de tensión en el límite de proporcionalidad, y las cuatro tensiones residuales para las probetas ensayadas de las canchadas 3 y 4. Además, se presentan los valores medios ($f_{r,i,m}$), la desviación estándar (σ_i) y el coeficiente de variación (COV) definido como el cociente entre la desviación y el valor medio ($COV = \sigma_i / f_{r,i,m}$).

Nombre	f_L (MPa)	$f_{r,1}$ (MPa)	$f_{r,2}$ (MPa)	$f_{r,3}$ (MPa)	$f_{r,4}$ (MPa)
C3 - P1 - V1	4,85	10,32	9,18	8,29	7,86
C3 - P2 - V1	6,86	9,71	8,48	7,31	6,88
C3 - P2 - V2	5,33	6,51	6,01	5,50	5,10
C4 - P1 - V1	5,73	11,53	10,77	9,76	9,26
C4 - P1 - V2	5,59	8,42	7,44	6,69	6,35
C4 - P1 - V3	5,63	10,73	11,35	10,45	9,24
Promedio:	5,66	9,54	8,87	8,00	7,45
Desviación:	0,61	1,66	1,84	1,71	1,51
COV:	10,70 %	17,40 %	20,70 %	21,40 %	20,30 %

Tabla 4.6: Tensiones residuales calculadas para las probetas de las canchadas 3 y 4.

En cuanto a los coeficientes de variación, se observa la particularidad de que el valor para la tensión en el límite de proporcionalidad (10,7 %) resultó ser aproximadamente la mitad del valor correspondiente a las tensiones residuales, los cuales se encontraron en el entorno del 20%. Esto puede deberse a que el límite de proporcionalidad es una variable que es gobernada por las características del hormigón, en particular, su resistencia a la tracción por flexión. Por ende, al uniformizar la composición de la mezcla de todas las probetas, se logra reducir la dispersión de los resultados a un valor razonable para un material como el hormigón con fibras. Por otro lado, la variabilidad en la distribución y orientación de fibras permite explicar el aumento en la desviación de resultados medios para las tensiones residuales, con el agregado de que dicha dispersión se mantuvo casi constante entre los distintos parámetros. Un coeficiente de variación de 20% para los resultados de las tensiones residuales resulta razonable cuando se las compara con las obtenidas en trabajos como el de Salehian *et al.* (2014), donde se tienen valores de coeficiente de variación entre 18% y 40%; o el de Facconi *et al.* (2016) con valores entre 23% y 30%.

Analizando los valores medios de las tensiones residuales, se observa que se encuentran dentro del rango esperado al compararlos con resultados de trabajos similares como el de Salehian *et al.* (2014), que se presentan en la tabla 4.7. Allí se observan los valores de fuerza, tensión residual media, tensión residual característica y desviación estándar para los valores de apertura de fisura de interés.

$CMOD_i$ (mm)	F_{im} (kN)	$f_{Ri,m}$ (MPa)	$f_{Ri,k}$ (MPa)	s_d (MPa)
0,5	19,50	11,94	7,17	2,19
1,5	16,78	10,28	4,00	2,88
2,5	11,80	7,23	0,65	3,02
3,5	8,93	5,47	0,33	2,36

Tabla 4.7: Tabla de tensiones residuales presentadas por Salehian *et al.* (2014).

Comparando los valores medios de tensión residual obtenidos en nuestra campaña con los presentados en el citado trabajo, existe un solape entre los rangos esperados de cada una de las variables.

4.5. Conclusiones Parciales

Se logró implementar el ensayo de flexión a tres puntos para probetas entalladas de HRFM, siguiendo las indicaciones de la norma EN 14651 y cumpliendo con sus requisitos. A su vez, se pudo configurar la prensa hidráulica del laboratorio de

vialidad del MTOP para completar el ensayo hasta 4 milímetros de flecha.

Se confirma la viabilidad de la mezcla de hormigón de las canchadas 3 y 4 para fines estructurales, ya que las probetas ensayadas presentan la ductilidad necesaria para alcanzar los 4 *mm* de apertura de fisura manteniendo más del 69% de la carga pico, y se observa un claro comportamiento con endurecimiento post-fisuración, al constatarse valores de F_3 mayores a los de F_L en todas las probetas ensayadas. A su vez, los valores hallados de tensiones residuales medias para la dosificación final se consideran razonables al compararlos con los resultados del mismo ensayo realizado en probetas de mezclas comparables a la diseñada, según artículos de referencia. En vista de estos resultados, se confirmó el uso de la mezcla final diseñada en el capítulo 3 para la losa elevada de alta responsabilidad estructural sin refuerzo tradicional, como se detalla en el capítulo 5.

Capítulo 5: Construcción y ensayo de losa elevada de HRFM

5.1. Introducción

5.1.1. Motivación

Existe hoy en día un gran interés desde la industria de la construcción por el estudio y desarrollo del HRFM para su aplicación a elementos de alta responsabilidad estructural, en particular a losas. Esto se debe fundamentalmente a su facilidad de ejecución respecto al hormigón armado tradicional. Si bien es un campo de estudio para el cual todavía queda mucho por avanzar, ya pueden verse en el mundo edificios con losas ejecutadas totalmente en HRFM. Sin embargo, en Sudamérica la aplicación de este material es escasa. En este contexto, la motivación de este trabajo consistió en construir el primer prototipo losa elevada de HRFM en la región.

5.1.2. Objetivos

En este capítulo se pretende plasmar todo el proceso del diseño geométrico, construcción y ensayo de un prototipo de losa elevada a escala real de HRFM. Se repasarán brevemente las características principales de la mezcla utilizada, y luego se hará énfasis en todos los aspectos relacionados a su ensayo, desde la metodología empleada hasta la presentación y análisis de los resultados obtenidos.

5.2. Metodología

5.2.1. Ubicación

En la figura 5.1 se puede ver la ubicación de la losa. Se encuentra dentro del terreno de la Guardia Republicana de Montevideo, ubicado sobre la Avenida José Pedro Varela. Se trata de un lugar abierto, sin ninguna limitación de espacio, por lo que este aspecto no influyó el diseño ni la planificación del ensayo de la losa.



Figura 5.1: Ubicación del terreno donde se construyó la losa

5.2.2. Geometría

La geometría completa de la losa se ve detallada en las figuras 5.2 y 5.3. En ellas se observa que se trata de una losa cuadrada de 13 cm de espesor y una extensión total en planta $6,20 \times 6,20 \text{ m}^2$. Se apoya sobre 9 pilares cuadrados de $20 \times 20 \text{ cm}^2$ y 2 m de altura separados 3 m entre ejes, por lo que quedan definidos 4 paños de $3,10 \times 3,10 \text{ m}^2$. Esta geometría responde a la búsqueda de mantener la losa dentro de los estándares de losas habituales de viviendas en Uruguay. Respecto al diseño de varios paños, inspirado en las experiencias de Parmentier *et al.* (2014) y de Salehian y Barros (2015), se decidió utilizar una grilla de 4 paños para permitir el ensayo de dos de estos de forma independiente. En la figura 5.2 se ve que en los paños ensayados (1 y 2) se dispuso un pase en su punto central, que es un hueco en la losa de 6 cm de diámetro, necesario para la realización del ensayo. Este documento se centra únicamente en el ensayo del paño 1, por lo que en adelante se referirá a dicho ensayo simplemente como ensayo de la losa. Los restantes paños (3 y 4)

fueron descartados de ser ensayados ya que se considera que el ensayo de los paños 1 y 2, debido a la evidente fisuración en las zonas de interfase, invalidan cualquier posible resultado. Sin embargo, se prevé la posibilidad de extraer testigos de las zonas sanas de los paños no ensayados.

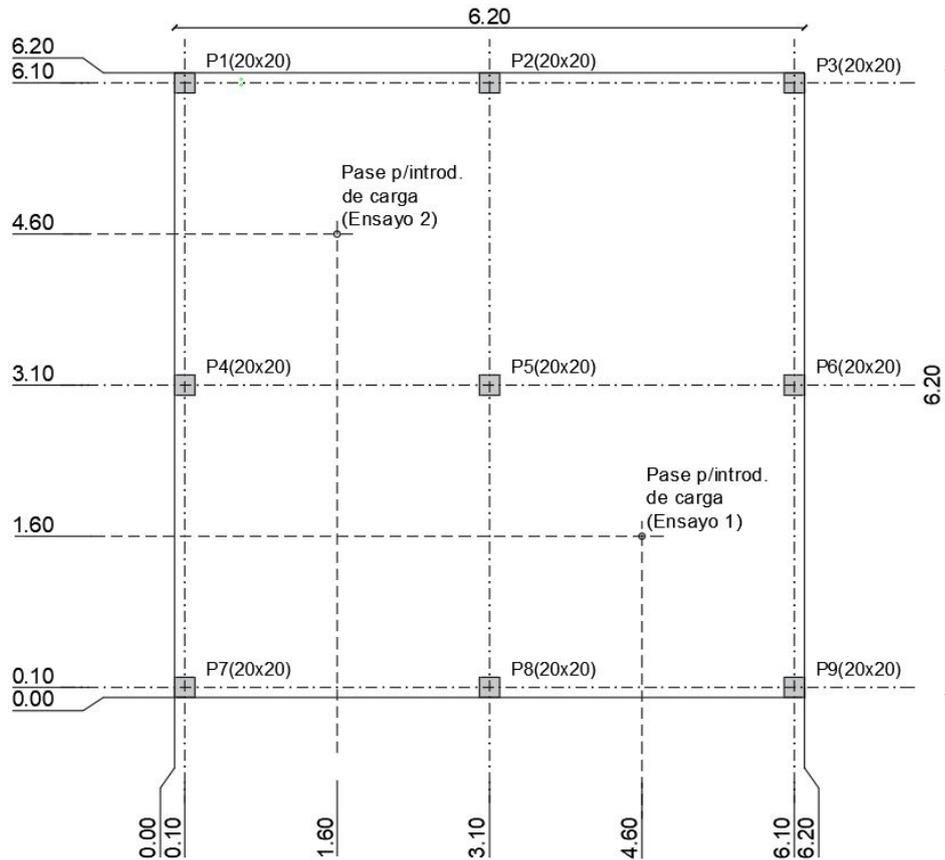


Figura 5.2: Planta de la losa e indicación de los dos paños ensayados (dimensiones en m).

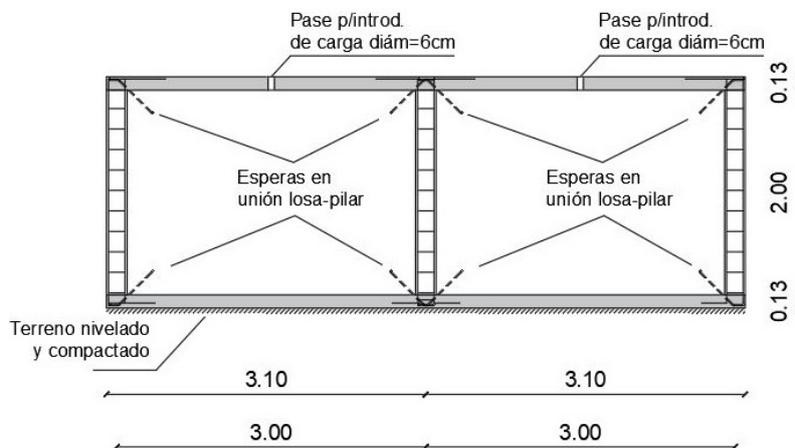


Figura 5.3: Alzado de la losa (dimensiones en m).

5.2.3. Dosificación de la mezcla y cuantía de fibras

La dosificación empleada en la mezcla de la losa se detalla en la tabla 5.1. El proceso de pruebas de dosificaciones hasta dar finalmente con una una que cumpla de forma aceptable con todas las especificaciones deseadas se expone en el capítulo 3.

Relación agua/cemento	0,4	
Arena fina (kg/m^3)	671,4	(40 %) ¹
Arena gruesa (kg/m^3)	251,8	(15 %)
Gravillín (kg/m^3)	503,5	(30 %)
Pedregullo (kg/m^3)	251,8	(15 %)
Agua (kg/m^3)	180,0	(15 %)
Cemento (kg/m^3)	450,0	
Aditivo superplastificante (kg/m^3)	9,0	(2 %) ²
Fibras metálicas (kg/m^3)	90,0	

¹ Porcentaje del total de áridos

² Porcentaje del peso de cemento

Tabla 5.1: Dosificación final del HRFMAC.

La cuantía de fibras de $90 kg/m^3$ es un valor elevado que responde a dos razones principales. La primera es la incertidumbre que en etapas de diseño implicaba la realización de una losa elevada sin ninguna experiencia previa. Eran muchos los factores que podían llevar a un fallo en el ensayo y se decidió ser conservador dentro de los márgenes razonables, según lo observado en el repaso de bibliografía. En segundo lugar, la incorporación de un mayor contenido de fibras permitiría en teoría una mayor capacidad y ductilidad de la losa, enriqueciendo el ensayo y permitiendo más cantidad de mediciones, lo que se traduce en una curva fuerza-flecha más precisa.

5.2.4. Llenado

En la figura 5.4 se muestran todos los aspectos referentes a la jornada del llenado de la losa. En 5.4(a) se ve la planta dosificadora desde donde se suministraron los agregados y el cemento y junto a ella el camión mixer que realizó la mezcla. En 5.4(b) se muestra un ensayo de cono invertido realizado al hormigón a pie de obra previo al llenado y en 5.4(c) se ve el encofrado. Se presentó el inconveniente de que la trabajabilidad de la mezcla obtenida en campo distaba mucho de la que se

obtenía en el laboratorio durante la etapa de diseño de la misma, donde se lograba gran fluidez sin perder cohesión. Esto ocasionó que en un principio existieran inconvenientes para el bombeado ya que no se lograba el asentamiento deseado. Para solucionarlo se realizaron pequeñas modificaciones a la dosificación de la tabla 5.1, como agregar un extra de cemento y agua o incrementar levemente el porcentaje de finos. Luego de las modificaciones, la trabajabilidad mejoró y se pudo realizar el proceso de hormigonado correctamente en pocos minutos sin necesidad de vibrado.



Figura 5.4: Jornada de hormigonado de la losa.

5.2.4.1. Probetas

En la tabla 5.2 se muestran las resistencias residuales promedio que caracterizan el hormigón de la losa. Fueron obtenidas de aplicar el ensayo EN 14651 (detalla-

do en el capítulo 4) a 5 probetas normalizadas llenadas a pie de obra. También se confeccionaron probetas cilíndricas, de 15 cm de diámetro por 30 cm de alto, para ensayar a compresión a los 28 días. El resultado fue una resistencia a compresión media de $f_{cm} = 64,4 \text{ MPa}$. Todas las probetas, tanto las prismáticas como las cilíndricas, se llenaron con la mezcla ya modificada en campo.

Resistencia residual	Resultado promedio [MPa]	CV [%]
f_{R1}	10,23	10
f_{R2}	9,81	12
f_{R3}	8,63	10
f_{R4}	7,70	10

Tabla 5.2: Resistencias residuales promedio de probetas confeccionadas a pie de obra.

5.3. Ensayo de la losa

El principal objetivo del ensayo fue conocer el comportamiento estructural de la losa, definida en apartado 5.2, al aplicarle una fuerza puntual en su centro. De esta manera poder visualizar de manera práctica todas las propiedades del HRFM expuestas en este documento.

5.3.1. Organización del ensayo

La estructura general del ensayo fue siguiendo escalones de fuerza como se aprecia de forma esquemática en la Figura 5.5. Cada escalón consta de tres etapas diferenciadas:

- Etapa de carga: se eleva la fuerza aplicada hasta llegar a un nivel establecido previamente.
- Meseta: se mantiene la fuerza constante durante un tiempo determinado.
- Descarga: se disminuye la fuerza hasta descargar totalmente la estructura.

Las etapas de carga y de descarga trataron de ser lo más graduales posibles, evitando aumentos bruscos de fuerza. Las etapas de meseta, en donde la fuerza se mantiene constante, se demoraron el mínimo tiempo necesario para realizar las mediciones correspondientes.

El nivel de cada escalón de fuerza fue determinado en función de la fuerza pico de la losa. Antes de superar la fuerza pico, los escalones fueron establecidos en

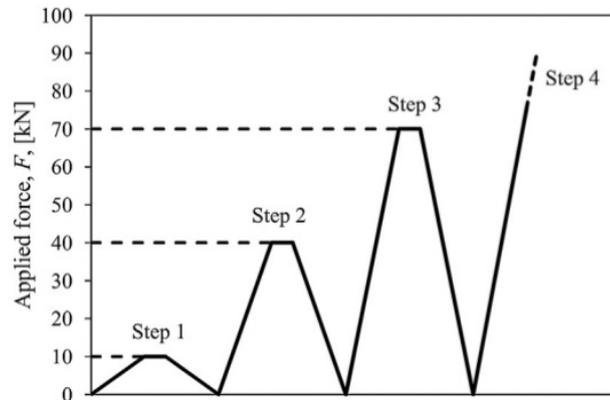


Figura 5.5: Esquema del recorrido del nivel de fuerza en función del tiempo para un ensayo escalonado. [Salehian y Barros (2015)].

aumentos del orden de 10 kN , independientemente de la flecha registrada en la losa. Una vez que se superó la fuerza pico, la losa empezó a sufrir descensos de forma muy acentuada, por lo que se decidió que a partir de allí cada escalón se defina por aumentos de 5 mm de descenso en su punto central.

Por cuestiones logísticas, el ensayo debió realizarse en dos jornadas distintas. Una primera jornada, en la cual se alcanzó la fuerza pico y se continuó cargando dos escalones más. Y una segunda jornada, realizada el día siguiente a la primera, en la cual se realizaron 9 escalones más. En total fueron realizados 20 escalones de fuerza en una duración de 448 minutos.

5.3.2. Aplicación y control de la fuerza

La fuerza puntual en el punto central de la losa, se materializó empleando el gato hidráulico de tracción-compresión que muestra en la figura 5.6 (a). El gato fue apoyado en la cara superior de la losa y conectado a una varilla roscada de 32 mm de acero inoxidable que atraviesa el pase dispuesto (figura 5.6 (e)). Como se ve en la figura 5.6 (d) la varilla se prolonga hacia abajo de la cara inferior de la losa, desde donde salen cuatro eslingas que conectan con malacates regulables (5.6 (c)), los cuales van conectados a las esperas dispuestas en la base de los pilares. La función de los malacates es poder regular el funcionamiento del dispositivo, dando margen para pequeños ajustes que sean necesarios. Con esta disposición, cuando el gato se estira, se comprime y empuja la losa hacia abajo, generando una presión distribuida que es idealizada como una fuerza puntual. En la Figura 5.6 (a) se ve la celda de carga que se colocó sobre el gato para medir la fuerza durante el ensayo. El proceso de calibración de estos equipos se encuentra en el anexo 1.

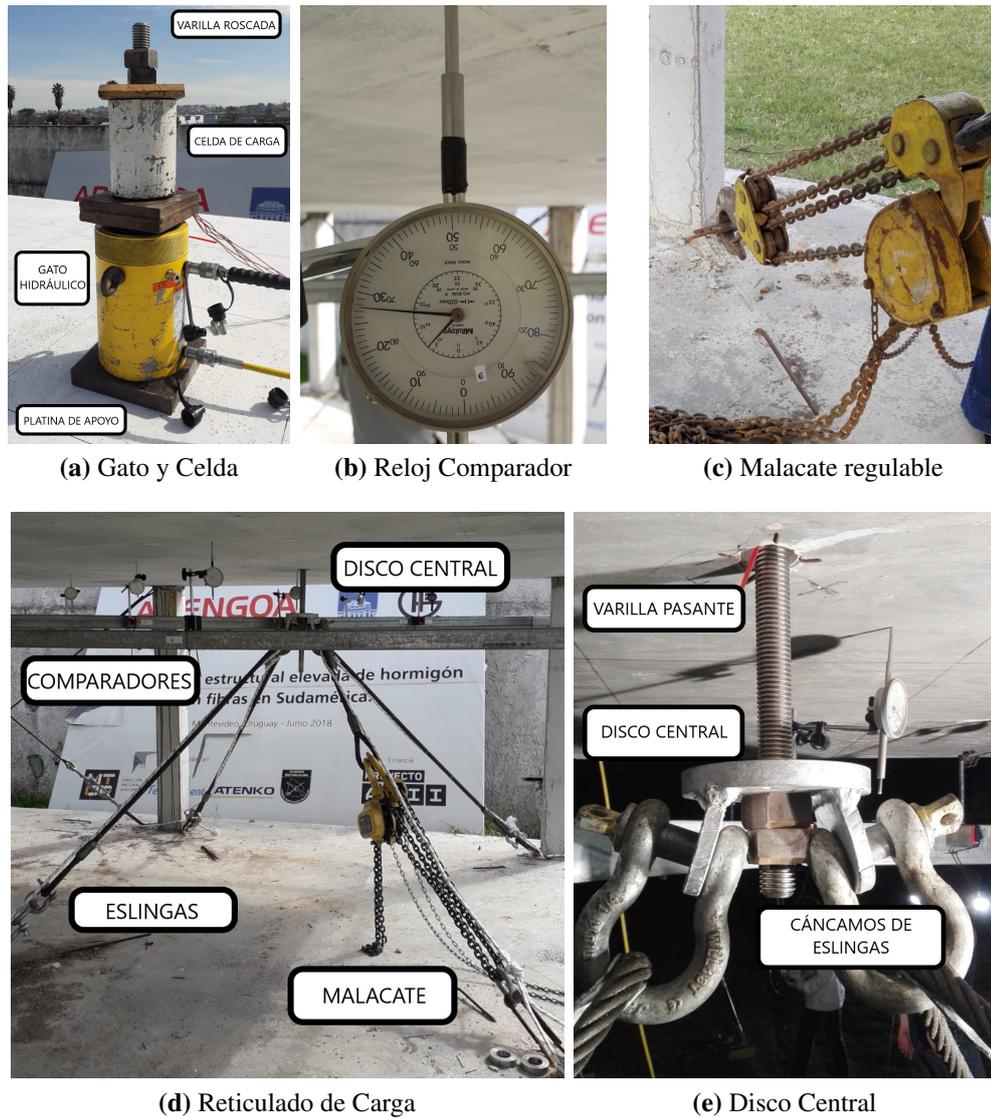


Figura 5.6: Componentes principales del dispositivo de carga.

5.3.3. Medición de descensos

Como se explicó en el apartado 5.3.2, en cada meseta y al descargar completamente cada escalón de fuerza se realizaron las mediciones. Los descensos de la losa se registraron mediante 7 comparadores ubicados según se detalla en la Figura 5.7. Un comparador principal, al que se le asignó el número 1, ubicado lo más próximo posible del centro de la losa. Este comparador es el de mayor importancia por registrar la zona de mayores flechas. Los restantes comparadores se distribuyen en los puntos medios de los lados y en la diagonal. Puede verse en la figura 5.6 (d) que los comparadores se colocaron sobre una estructura secundaria de perfiles tubulares metálicos, sujeta en los pilares. Así dispuestos se asume que los comparadores

están apoyados en una base independiente a los desplazamientos de la losa.

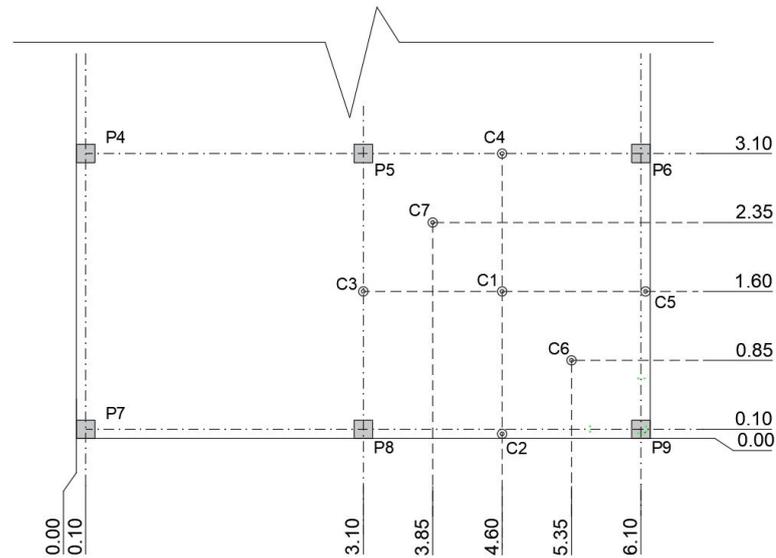


Figura 5.7: Distribución de los comparadores en la losa (unidades en *m*).

5.3.4. Registro de fisuración

Se realizó un registro fotográfico de las fisuras producidas al descargar cada escalón. Por cuestiones de seguridad las fotos no se tomaron con la fuerza aplicada. En la figura 5.8 se muestran a modo de ejemplo algunas de las fisuras registradas.



(a) Macrofisura luego de finalizado el ensayo.



(b) Fisuras en escalón de carga intermedio.

Figura 5.8: Fisuras en la cara inferior de la losa

5.4. Predicción del comportamiento estructural de la losa

Con el objetivo de afrontar el ensayo con algunos valores de referencia respecto a los potenciales resultados, se realizaron una serie de estimaciones previas. Se buscó por un lado conocer el nivel de fuerza aplicado que daría comienzo a la fisuración en la losa, para lo cual se desarrolló un modelo elástico lineal. Luego, aplicando el método de líneas de rotura, tanto de forma computacional como analítica, se obtuvieron estimaciones de la capacidad de carga máxima de la losa.

5.4.1. Régimen lineal entre fuerza y flecha

Se buscó predecir el nivel de fuerza aplicado a la losa que provocase el inicio de fisuración en la matriz de hormigón, produciendo así la pérdida de linealidad en la estructura. Para ello se realizó un modelo de elementos finitos en el software SAP2000. Allí se modeló la losa como simplemente apoyada en cada uno de sus 9 pilares, con un mallado en elementos rectangulares de $10 \times 10 \text{ cm}^2$.

Se caracterizó al material con un peso propio de 25 kN/m^3 y un módulo de deformación longitudinal estimado según la EHE-08 con la expresión 5.1. Se usó que $f_{cm} = 64,4 \text{ MPa}$, obtenido de los ensayos a compresión realizados a las probetas cilíndricas confeccionadas en obra, mencionados en el apartado 5.2.4.1.

$$E_c = 8500 \sqrt[3]{f_{cm}} = 8500 \cdot \sqrt[3]{56,4} = 32597,1 \text{ MPa} \quad (5.1)$$

La introducción de la fuerza puntual al centro del paño se aplicó mediante una carga de superficie uniforme aplicada en un elemento de área. Se aumentó el valor de la fuerza aplicada hasta observar que se alcance el momento de fisuración M_{fis} en algún punto. Para el cálculo del momento de fisuración, primero se determinó la resistencia a flexo-tracción del hormigón, también según indicaciones de la norma española, mediante la expresión:

$$f_{ct,m,fl} = \left(1,6 - \frac{e}{1000}\right) f_{ct,m} \quad (5.2)$$

donde:

- $e = 130 \text{ mm}$ es el espesor de la losa.
- $f_{ct,m} = 0,58 f_{ck}^{1/2}$ la resistencia media a tracción del hormigón en MPa .
- f_{ck} la resistencia característica del hormigón a los 28 días en MPa .

Se estima f_{ck} como $f_{ck} = f_{cm} - 8,0 = 56,4 \text{ MPa}$ (EHE-08). Entonces la resistencia a flexo-tracción del hormigón resulta:

$$f_{ct,m,fl} = \left(1,6 - \frac{h}{1000}\right) f_{ct,m} = \left(1,6 - \frac{130}{1000}\right) 0,58 \cdot (56,4)^{1/2} = 6,4 \text{ MPa} \quad (5.3)$$

Luego se procede a calcular el momento de fisuración por unidad de longitud M_{fis} , suponiendo una distribución lineal de tensiones en la sección, donde se alcanza el valor de $f_{ct,m,fl}$ en las fibras extremas:

$$M_{fis} = \frac{f_{ct,m,fl} \cdot e^2}{6} = \frac{6400 \text{ kN/m}^2 \cdot (0,13 \text{ m})^2}{6} = 18,0 \text{ kNm/m} \quad (5.4)$$

5.4.2. Estimación de la fuerza pico

Para predecir el comportamiento de la losa luego de fisurada y conocer una estimación de su fuerza pico, se realizó un modelo computacional en el software LimitState: SLAB (Limit State Ltd., 2019).

LimitState: SLAB es un software diseñado específicamente para calcular la capacidad de carga de elementos de losa, aplicando el método de las líneas de rotura. Este método propone que al ser cargada la losa, a la par que aumenta la fuerza aplicada, se van formando líneas de fisuras que trabajan como rótulas plásticas. Finalmente, para cierto nivel de fuerza, existirá una cantidad tal de rótulas que la estructura actuará como un mecanismo, dándose su colapso. El método lleva inherente la hipótesis de que el material tiene ductilidad suficiente para soportar los giros en las líneas plastificadas durante los estados intermedios, hasta alcanzar el mecanismo final.

En la figura 5.9(a) se muestra la geometría introducida al programa, asignando un color verde al HRFM. Como no se permite aplicar apoyos puntuales, los pilares se modelaron como huecos de $20 \times 20 \text{ cm}^2$ y en sus bordes se impusieron apoyos lineales simples. En la figura 5.9(b) se muestra la caracterización del material dentro el modelo.

Se debe ingresar el valor del momento plástico M_p que actúa sobre las líneas de rotura. Para ello se aplica la distribución de tensiones mostrada en la figura 5.10 extraída de las recomendaciones del Model Code (2010). En ella se aprecia que en estado límite último, en una sección de HRFM puede suponerse que toda la compresión está concentrada en la fibra superior, mientras que las tracciones se distribuyen uniformemente en todo el alto. El valor de la tracción f_{Fu} se estima



(a) Geometría ingresada. (b) Ventana de ingreso de parámetros del material.

Figura 5.9: Ingreso del modelo de la losa a LimitState.

como un tercio de f_{R3} , siendo ésta la resistencia residual correspondiente a una fisura de 2,5 mm en el ensayo EN 14651 según se detalla en el capítulo 4.

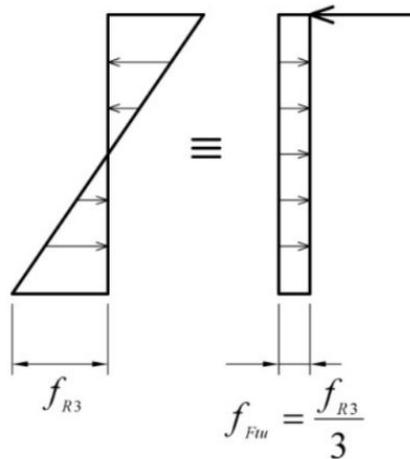


Figura 5.10: Distribución simplificada de tensiones en la sección de la losa. [Código Modelo 2010]

Para modelar la losa, el valor de f_{R3} empleado es el promedio de los ensayos de las 5 probetas confeccionadas a pie de obra como se expuso en el apartado 5.2.4.1, resultando que $f_{R3}=8,63 MPa$. Luego, se calcula el valor de las tracciones f_{Ftu} :

$$f_{R3} = 8,63 MPa \Rightarrow f_{Ftu} = \frac{f_{R3}}{3} = 2,88 MPa \tag{5.5}$$

Entonces, el momento de plastificación por metro de longitud según la distribución de tensiones adoptada se calcula como:

$$M_p = \frac{f_{Ftu} \cdot e^2}{2} = 24,3 \text{ kNm/m} \quad (5.6)$$

Donde $e = 13,0 \text{ cm}$ es el espesor de la losa.

El valor de M_p obtenido se aplica en el modelo tanto a líneas de rotura de momento positivo como negativo y en todas direcciones, ya que se asume que las fibras están perfectamente distribuidas y orientadas en la masa de la mezcla. El peso propio considerado es de 25 kN/m^3 .

A modo de comparación con el modelo, se realizó una estimación analítica de la fuerza pico, también mediante la teoría de líneas de rotura, según las especificaciones de la ACI Committee 544 (2015). En la figura 5.11 se muestra el mecanismo de falla que se propone para un paño de losa cargado puntualmente en su centro. Puede observarse que es un paño central y no de esquina como el caso que se busca modelar (figura 5.2) por lo que los resultados obtenidos se deben adecuar a la situación real. L_x y L_y son las distancias entre ejes de apoyos, en este caso ambas son 3 m . M_p^+ y M_p^- son los momentos plásticos, positivos y negativos respectivamente, que como se mencionó anteriormente se suponen de igual magnitud $M_p = 24,3 \text{ kNm/m}$.

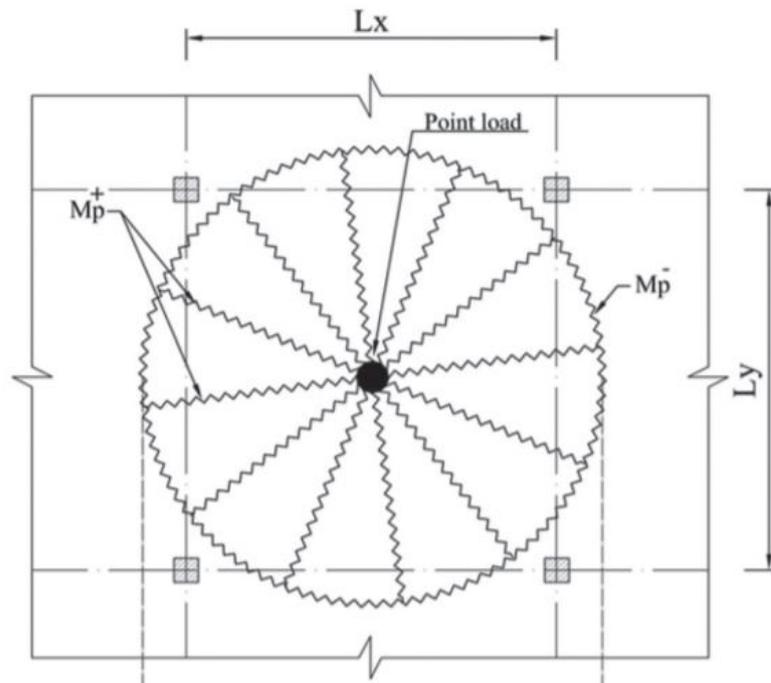


Figura 5.11: Mecanismo de rotura para una losa sometida a fuerza puntual. [ACI Committee 544 (2015)]

En la situación de la figura 5.11 la norma estima la fuerza pico como:

$$F_{pico} = 2\pi M_p^+ (1 + \phi_h) \left(\frac{3R + 2a}{3R} \right) \quad (5.7)$$

donde:

- $M_p^+ = M_p = 24,3 \text{ kNm/m}$ es el momento plástico de la sección.
- $\phi_h = 1$, es la el cociente entre momento plástico positivo y negativo.
- $R = \sqrt{\left(\frac{L_x}{2}\right)^2 + \left(\frac{L_y}{2}\right)^2} = 2,12 \text{ m}$, es el radio del círculo que forma la fisura por momentos negativos, estimado como la distancia entre el punto de aplicación de la fuerza y el eje de los apoyos.
- $a = 0,2 \text{ m}$, es el diámetro en el cual se aplica la fuerza, estimado como el diámetro exterior del gato hidráulico (apartado 5.3.2).

Para el caso particular del presente trabajo, donde el paño a ensayar se encuentra en una esquina, Destrée y Mobasher recomiendan modificar la ecuación 5.7 reduciendo el valor de F_{pico} a la mitad, debido a que el círculo que forma la fisuración por momento negativo se reduce aproximadamente en esa proporción. Entonces, se estima la fuerza pico de un paño de esquina como:

$$F_{pico} = \pi M_p (1 + \phi_h) \left(\frac{3R + 2a}{3R} \right) \quad (5.8)$$

Sustituyendo los valores, resulta que $F_{pico} = 162,3 \text{ kN}$

5.5. Resultados

5.5.1. Modelos computacionales

5.5.1.1. Elástico-lineal: SAP2000

En la figura 5.12 se observa la distribución de momentos máximos en la losa, obtenida en SAP2000, para una fuerza puntual aplicada de 50 kN , junto la referencia de colores correspondiente. La convención de signos es la usual, donde los momentos positivos traccionan la cara inferior de la losa y los negativos la superior. Puede verse que para los 50 kN aplicados ya se alcanza el momento de fisuración $M_{fis} = 18\text{ kNm/m}$ en la zona de aplicación de la carga, representada en color azul oscuro. Se dan algunos picos elevados de momento negativo sobre los apoyos que se omiten ya que se disipan en un área muy pequeña y se adjudican al mallado utilizado para discretizar la losa.

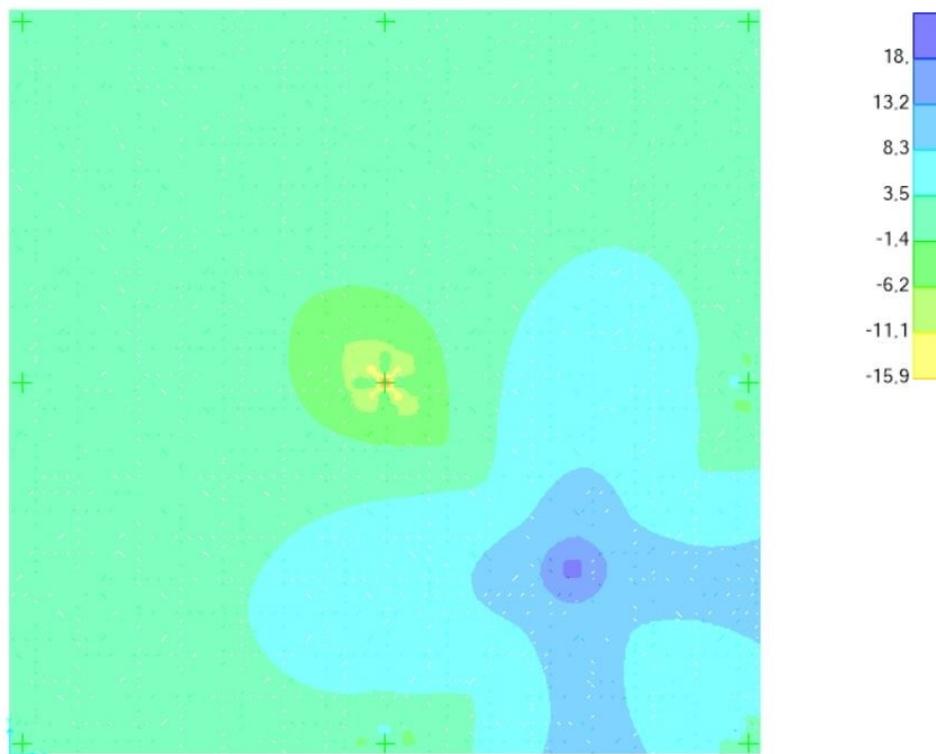


Figura 5.12: Distribución de momentos en la losa para una fuerza puntual de 50 kN (unidades en kNm/m). [SAP2000].

Análogamente, empleando el mismo modelo de SAP, se determinó carga distribuida uniforme equivalente que llevaría a fisurar la losa. En la figura 5.13 se muestra la distribución de momentos máximos para una carga uniforme de 20 kN/m^2 , carga

para la cual se alcanza el momento de fisuración en la zona que rodea al apoyo de esquina.

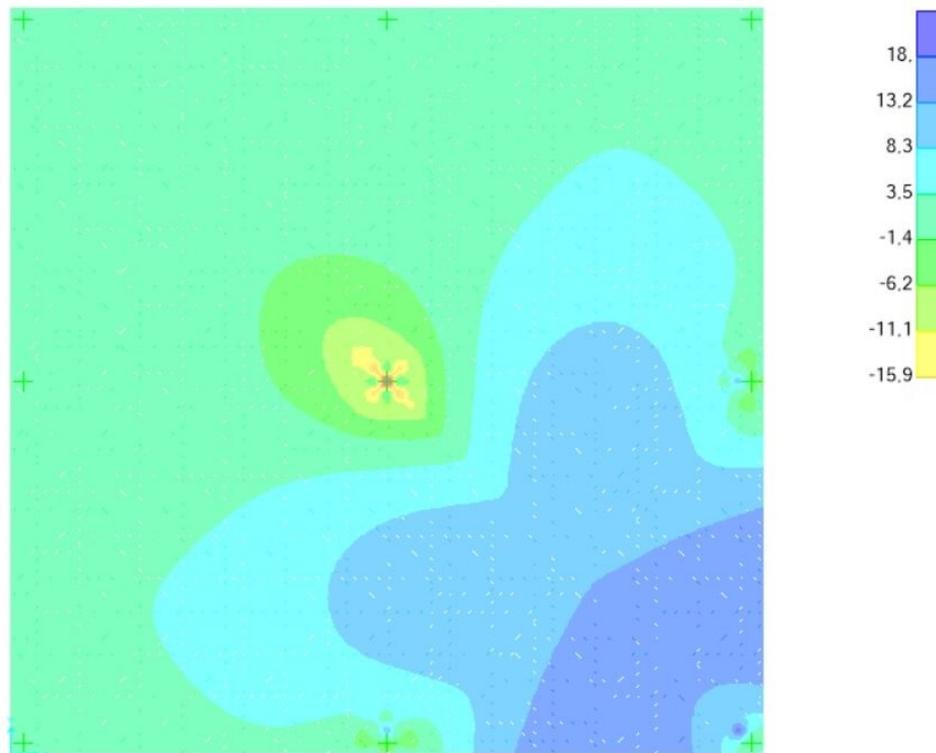


Figura 5.13: Distribución de momentos en la losa para una carga distribuida uniforme de 20 kN/m^2 (unidades en kNm/m). [SAP2000].

5.5.1.2. Líneas de rotura: LimitState

La fuerza pico de la losa arrojada por el modelo de LimitState, presentado en el apartado 5.4.2, es de $F_{pico} = 210,8 \text{ kN}$. En la Figura 5.14 se muestra el mecanismo de falla y las líneas de rotura obtenidas, que son los únicos resultados que devuelve el programa. Puede apreciarse en la figura 5.14(b) que se diferencian las líneas de momento positivo y negativo, asociándolas a color azul y rojo respectivamente.

En la práctica, por imperfecciones constructivas, la losa quedó en varias zonas con un espesor menor al teórico de 13 cm . Por esta razón, decidió calcularse mediante LimitState nuevamente la fuerza pico de la losa, pero para un espesor de 12 cm , resultando que $F_{pico} = 178,6 \text{ kN}$.

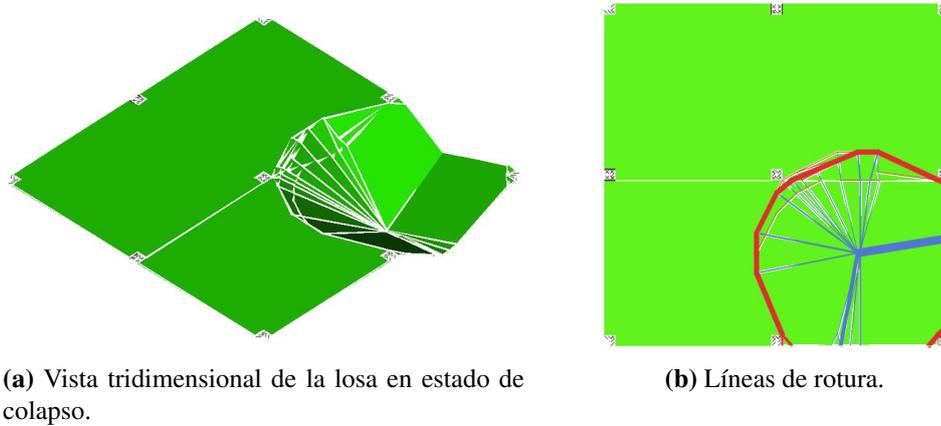


Figura 5.14: Mecanismo de fallo de la losa modelada en LimitState.

5.5.2. Fuerza-flecha principal durante el ensayo

En la Figura 5.15 puede observarse toda la información obtenida del ensayo de la losa respecto a niveles de fuerza en función del desplazamiento vertical principal (comparador 1 en figura 5.7).

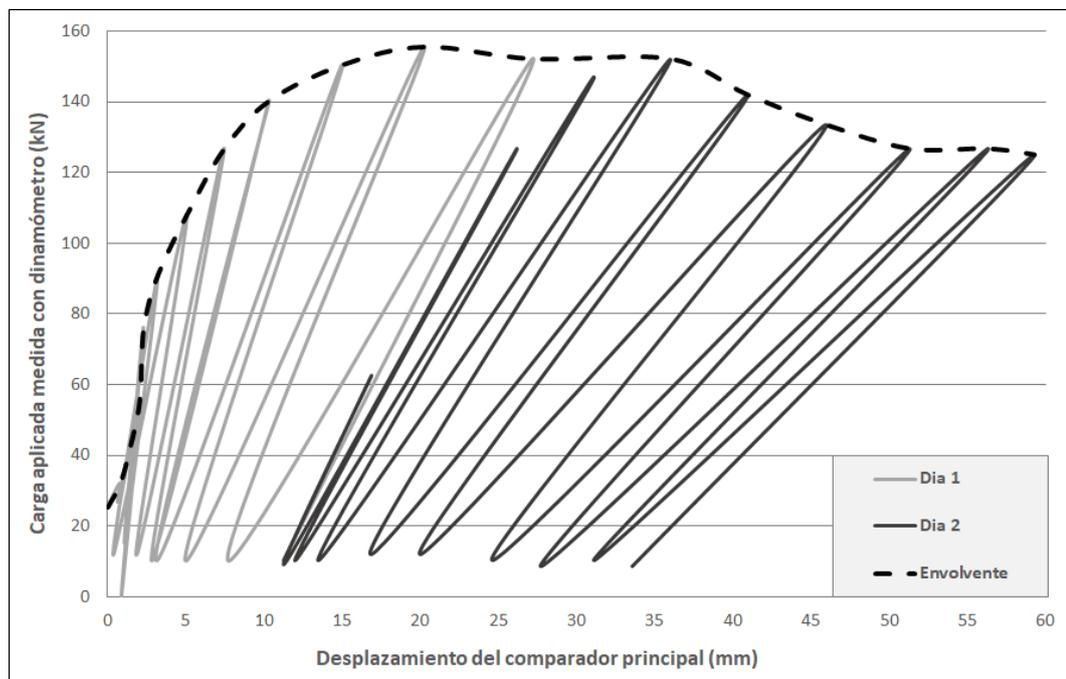


Figura 5.15: Gráfica fuerza-flecha principal de la campaña experimental sobre la losa.

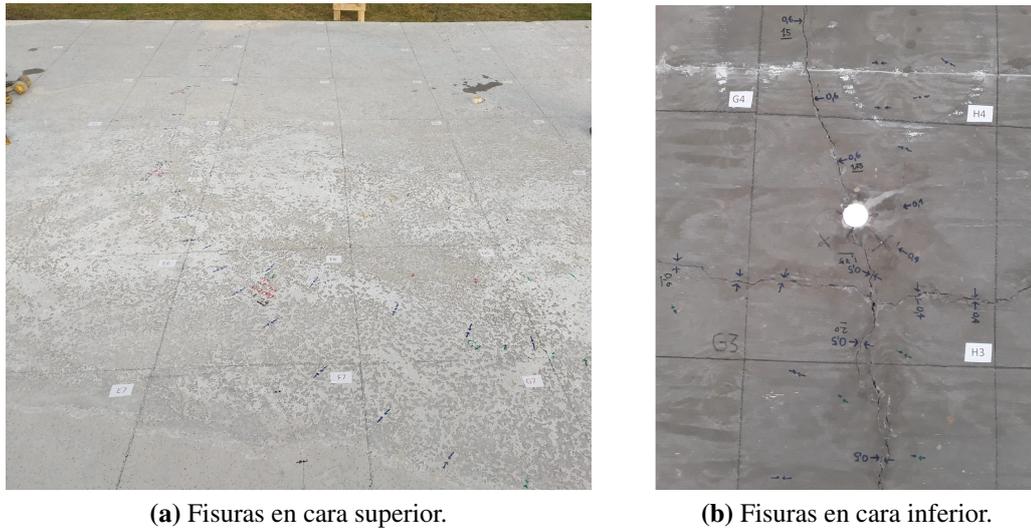
Respecto a la tendencia general de la curva envolvente, que se muestra punteada, se aprecia un tramo inicial recto con una pendiente acentuada hasta valores de fuerza cercanos a los 80 *kN* que se corresponden con una flecha del orden de 2,5 *mm*.

Superado los 80 kN , comienza a distinguirse una clara disminución de la pendiente de la curva. Esto indica que los incrementos de flecha son cada vez más grandes en relación a los incrementos de fuerza debido a la pérdida de rigidez en la estructura por el avance de la fisuración. La tendencia se mantiene hasta alcanzar la fuerza pico de la losa que resultó 155,5 kN con un descenso de 20,2 mm . Pasado este punto, la losa no admite mayores niveles de fuerza, por lo que la curva envolvente empieza a decrecer a la par que los descensos siguen incrementándose. Finalmente el ensayo se finaliza con una carga de 125 kN y una flecha principal de 59,3 mm .

Por otro lado, se ve también en la figura 5.15, a trazo continuo, el recorrido de la fuerza durante todo el ensayo determinado por los escalones de fuerza. En gris claro los del día 1 y en un tono más oscuro los del día 2. Cabe destacar que el recorrido se presenta a modo de visualización gráfica del proceso de carga, sin embargo no representa la realidad, simplemente se unieron los puntos conocidos por las sucesivas mediciones. Se puede ver como los primeros tres escalones del día 2 no tienen contacto con la envolvente. Esto es producto que en la jornada de ensayo del segundo día, por precaución, se hicieron aproximaciones antes de retomar los niveles de fuerza aplicados al terminar el día anterior. El hecho de descargar totalmente la losa luego de cada escalón de fuerza aportó información valiosa sobre los desplazamientos remanentes que se fue generando a medida que avanzó el ensayo.

5.5.3. Fisuración

En la figura 5.16 se muestran las fotos más representativas del patrón de fisuras producido sobre la losa. Fueron tomadas recién después de terminado el ensayo por cuestiones de seguridad. En 5.16 (a) se ve como en la cara superior se formó un patrón que envuelve el paño ensayado pasando por los pilares. En 5.16 (b) se observa una foto tomada desde abajo de la losa. Allí se ve que próximo al punto de aplicación de la carga, salen fisuras radiales en dirección de los bordes del paño. En base a todas las fisuras relevadas se confeccionaron los esquemas de la figura 5.17 buscando recrear los patrones. En (a) se muestra el patrón sobre la cara superior y en (b) de la cara inferior. Puede notarse que los patrones relevados se corresponden con las líneas de rotura arrojadas por el modelo de la losa en LimitState (Figura 5.14). Se concluye entonces que el modelo computacional, de forma cualitativa, funciona correctamente y aproxima el verdadero funcionamiento estructural de la losa.



(a) Fisuras en cara superior.

(b) Fisuras en cara inferior.

Figura 5.16: Relevamiento fotográfico del patrón fisuras producido en la losa.

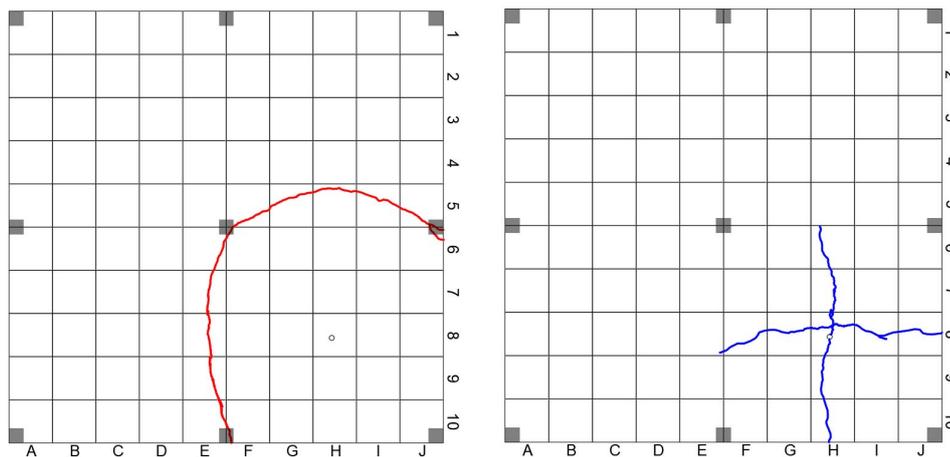


Figura 5.17: Esquemas de los patrones de fisuración confeccionados.

5.6. Conclusiones parciales

Respecto a la jornada de hormigonado y a la baja trabajabilidad que mostró la mezcla en campo respecto a la que se observaba en laboratorio, se consideran los siguientes factores como principales causantes. Primero, el hecho de trabajar en un espacio abierto, con viento y expuesto directamente al sol, pudo haber ocasionado una pérdida significativa de agua en los agregados entre el momento que se registro su humedad y cuando fueron agregados a la mezcla. Y segundo, el que se considera el factor más decisivo, el haber mezclado en un equipo totalmente distinto y de una capacidad superior. El día del llenado la mezcla se realizó en un mixer con capacidad aproximada de 8 m^3 . Este equipo suministra una energía de mez-

clado más elevada que la hormigonera del laboratorio y se cree que eso generó el problema. Ya superados los inconvenientes de trabajabilidad, luego de realizar los cambios mencionados a la dosificación, la losa se hormigonó con mucha facilidad. No fue necesario en ningún momento guiar el material para que cubra el encofrado de forma correcta y se culminó en poco más de 5 minutos sin necesidad de vibrado.

En términos estructurales, la losa se comportó durante el ensayo dentro de los márgenes esperados. Destacándose una gran ductilidad, permitiendo a la estructura asumir grandes desplazamientos después de superar su capacidad de carga máxima. La fuerza pico obtenida fue de $155,5 \text{ kN}$ con una flecha central de $20,2 \text{ mm}$. El ensayo se continuó hasta lograr una flecha de $59,3 \text{ mm}$ con 125 kN aplicados, por lo tanto, se pudo triplicar la flecha manteniendo un 80% de capacidad de carga de la estructura. Se concluye que este es un nivel de ductilidad más que aceptable, sobre todo si se considera que el ensayo se interrumpió por causas de seguridad y no por fallo estructural de la losa.

Los modelos de rotura en LimitState habían arrojado una fuerza pico de 210 kN , para 13 cm de espesor, y $178,6 \text{ kN}$, para un espesor de 12 cm , sobreestimando la capacidad real en un 35% y un 15% respectivamente. Por lo tanto, si bien son una buena aproximación, se considera que necesitan algunos ajustes para ser utilizados para diseño, ya que arrojan valores del lado de la inseguridad estructural. Un aspecto interesante a considerar es la distribución de fibras. Se supuso que quedan distribuidas de forma homogénea en el alto de la losa, por lo tanto el momento plástico para líneas de rotura negativas y positivas es igual dentro de los modelos. Esta suposición puede no cumplirse en la práctica, por ejemplo si la mezcla no es lo suficientemente cohesiva, haciendo que las fibras se concentren más sobre la cara inferior. Si esto sucede, los valores de momento negativo disminuyen y los positivos aumentan, modificando los resultados del análisis, ya sea aumentando o disminuyendo la fuerza pico. Por otro lado, la estimación analítica de la fuerza pico dio un resultado muy aceptable teniendo en cuenta la gran simplificación que se realizó para calcularla.

Sobre el tramo de proporcionalidad entre fuerza aplicada y flecha en la losa, se pudo observar en el ensayo que éste se cortaba aproximadamente a los 80 kN , con una flecha registrada de $2,5 \text{ mm}$. A partir de ese nivel de fuerza, la curva fuerza-flecha se empieza a curvar debido a la fisuración y se pierde esa proporcionalidad que se venía observando. El modelo de elementos finitos en SAP2000 predijo que se daría la primer fisura a los 50 kN . Si bien esto significa casi un 40% de error, se

destaca que en este caso el error es hacia el lado de la seguridad. Además la fisuración es un proceso gradual del cual se pierde algo de información por la estructura escalonada del ensayo.

Usando el mismo modelo de SAP, la carga uniforme distribuida equivalente arrojada fue de 20 kN/m^2 , lo que implica una resultante de 180 kN totales aplicados sobre los 9 m^2 de extensión de la losa. Este valor es 260% más elevado que los 50 kN concentrados en el centro del paño. Si se extrapola esta relación a los resultados obtenidos del ensayo, la resultante de la carga uniforme de fisuración sería 288 kN , lo que distribuido de manera uniforme son 32 kN/m^2 . Este valor es solo una estimación sin verificación experimental, ya que no se cargó la losa con cargas distribuidas para poder contrastarlo. Sin embargo se considera que es un buen indicador sobre el potencial de la losa, dado que las sobrecargas de diseño usuales para este tipo de elemento están por debajo de 10 kN/m^2 en la mayoría de normativas.

Capítulo 6: Conclusiones

6.1. Conclusiones generales

En cuanto a la dosificación de un HRFM autocompactante, se concluye según los resultados prácticos obtenidos que la mezcla desarrollada satisface la necesidades establecidas en el comienzo del proyecto. Se logró un hormigón en estado fresco cohesivo y con buena trabajabilidad. Los ensayos de cono invertido así lo demostraron, aun con la alta cuantía de fibras empleada. El control visual de segregación y exudación también fue aceptable. La distribución, tanto del árido grueso como de las fibras metálicas, fue homogénea en toda la mezcla. Estos resultados permitieron clasificar al hormigón como autocompactante según los requerimientos de escurrimiento de la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE) (2008).

La dosificación se ajustó desde su primera versión hasta la definitiva. En el proceso, se observa la importancia del estudio detallado de la granulometría de los áridos y de la secuencia de mezclado. Si bien en la bibliografía consultada se recomienda la incorporación de una adición como el filler, el hecho de haber podido desarrollar satisfactoriamente el material utilizando componentes de uso común en nuestro medio, abre la posibilidad de su puesta en práctica.

El resultado obtenido presenta un buen avance para el desarrollo de hormigones autocompactantes con fibras metálicas en el medio uruguayo, y aporta las bases para profundizar el desarrollo y estudio de su dosificación.

Pasando a las propiedades de la mezcla en estado endurecido, se destaca que se pudo implementar correctamente el ensayo de flexión a tres puntos para probetas entalladas de HRFM, siguiendo las indicaciones de la norma EN 14651 y cumpliendo con sus requisitos. Se logró verificar la ductilidad del material, la presencia del fenómeno de strain-hardening y cuantificar los valores de resistencia residual para grandes aperturas de fisura, validando las hipótesis de los métodos de cálculo utilizados.

Respecto a la losa, el hecho de poder construir y ensayar exitosamente la primera losa elevada de Sudamérica, cumplió con creces las expectativas que se tenían para el presente trabajo.

Se optó por una geometría conservadora debido a la poca experiencia existente. Se prefirió generar un antecedente con éxito que oficie de puntapié inicial y base para futuros proyectos más ambiciosos.

De la ejecución, se destaca la diferencia de trabajabilidad de la mezcla realizada en obra respecto a la obtenida en laboratorio. Se puede atribuir este cambio al control deficiente de la humedad de los agregados en campo y sobre todo al empleo de un equipo de mezclado de mayor capacidad y energía.

El ensayo de la losa se desarrolló de acuerdo a la planificación propuesta y no se presentaron mayores inconvenientes durante el proceso. Teniendo en cuenta que el reticulado de aplicación de carga puntual fue la mayor diferencia frente a los artículos de referencia, en donde predominan los marcos de reacción rígidos, se concluye que la solución adoptada fue adecuada e incluso de más fácil implementación. Estructuralmente la losa respondió dentro de los parámetros que se esperaban. Se logró llegar a una carga pico considerable y se destacó la gran ductilidad de la estructura, aumentando los desplazamientos un 300% después de superar su capacidad de carga máxima. Se considera que la ductilidad real de la losa es incluso superior a la registrada ya que el ensayo se cortó por cuestiones logísticas y no por consideraciones estructurales.

6.2. Trabajo a futuro

Con respecto a la dosificación del hormigón, se deberá continuar con su desarrollo para mejorar las propiedades de la mezcla en estado fresco. Será de utilidad realizar nuevas dosificaciones con cuantías de fibras variadas de forma de estudiar el comportamiento de la mezcla al modificar este parámetro. A su vez, analizar la posibilidad de incorporar adiciones en la dosificación. Esto mejorará la trabajabilidad y permitirá reducir la cantidad de cemento, cuyo alto contenido genera problemas de retracción.

En lo que refiere al ensayo de flexión a tres puntos, se deberá investigar más el efecto de la cuantía de fibras en el valor de las tensiones residuales, identificando cuáles de estas tensiones son más afectadas por la variación de este parámetro, así como determinar un rango óptimo para su uso con funciones estructurales. Además, se debe estudiar cómo afecta la forma, relación de esbeltez y dimensiones de las fibras en el resultado de los ensayos de flexión, así como su interacción con distintas granulometrías de áridos. Por último, se podría profundizar en la vinculación entre los resultados de este ensayo con el ensayo Montevideo detallado en el trabajo de Cañette *et al.* (2017), permitiendo cuantificar las tensiones residuales del material mediante un procedimiento con menos requerimientos específicos y probetas de dimensiones reducidas.

Queda planteada para futuros ensayos la posibilidad de cambiar los parámetros geométricos de la losa en busca de diseños más esbeltos, ya sea con un menor espesor o con mayor luz entre los apoyos. Por otro lado, se pueden implementar mezclas de HRFM con cuantías menores a 90 kg/m^3 y menos contenido de cemento, modificaciones que abaratarían el material.

Referencias bibliográficas

- ACI Committee 544 (2015). Report on design and construction of steel fiber-reinforced concrete elevated slabs. *ACI Publications*.
- Cañette, P., Giménez, M., y García, V. (2017). Diseño y control del Hormigón Reforzado con Fibras en Uruguay. *Proyecto de investigación e innovación en ingeniería estructural. Universidad de la República. Montevideo, Uruguay*.
- Cuenca, E. (2015). On Shear Behavior of Structural Elements Made of Steel Fiber Reinforced Concrete. *Phd Thesis. UPV. Valencia, España*.
- Destrée, X. y Mobasher, B. (2010). Design and Construction Aspects of Steel Fiber-Reinforced Concrete Elevated Slabs. *ACI Special publication 274-7. Report on Design and Construction Aspects of Steel Fiber-Reinforced Concrete Elevated Slabs*.
- Faconi, L. y Minelli, F. (2017). Verification of structural elements made of FRC only: A critical discussion and proposal of a novel analytical method. *Engineering Structures*, 131:530–541.
- Faconi, L., Minelli, F., y Plizzari, G. (2016). Steel fiber reinforced self-compacting concrete thin slabs – Experimental study and verification against Model Code 2010 provisions. *Engineering Structures*, 122:226–237.
- Fall, D., Shu, J., Rempling, R., Lundgren, K., y Zandi, K. (2014). Two-way slabs: Experimental investigation of load redistributions in steel fibre reinforced concrete. *Engineering Structures*, 80:61–74.
- Instrucción de Hormigón Estructural (EHE) (2008). Comisión Permanente del Hormigón. Madrid, España.
- Limit State Ltd. (2019). LimitState:SLAB Manual. *Engineering Structures*.
- Maya, L. F., Fernández Ruiz, M., Muttoni, A., y Foster, S. J. (2012). Punching shear strength of steel fibre reinforced concrete slabs. *Engineering Structures* 40:83-94.
- Michels, J., Waldmann, D., Maas, S., y Zürbes, A. (2012). Steel fibers as only reinforcement for flat slab construction - Experimental investigation and design. *Construction and Building Materials*, 26(1):145–155.

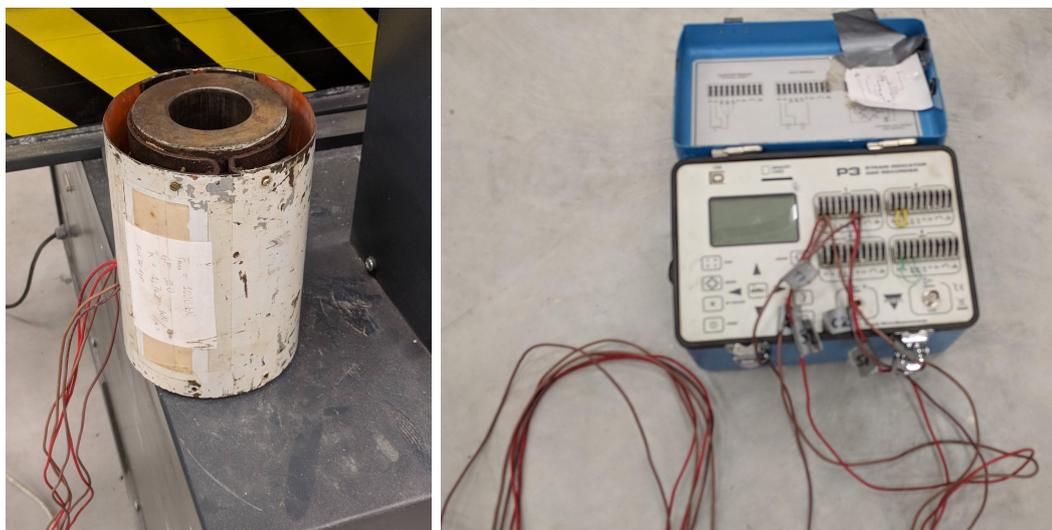
- Model Code (2010). *fib Model Code for Concrete Structures 2010*. Ernst and Sohn publishing house.
- Nguyen, T. N., Nguyen, T. T., y Pansuk, W. (2017). Experimental study of the punching shear behavior of high performance steel fiber reinforced concrete slabs considering casting directions. *Engineering Structures*, 131:564–573.
- Parmentier, B., Itterbeeck, P., y Skowron, A. (2014). The flexural behaviour of sfrc flat slabs: the limelette full- scale experiments for supporting design model codes. *FRC 2014 Joint ACI-fib International Workshop Fibre Reinforced Concrete: from Design to Structural Applications*.
- Salehian, H. y Barros, J. A. (2017). Prediction of the load carrying capacity of elevated steel fibre reinforced concrete slabs. *Composite Structures*, 170:169–191.
- Salehian, H. y Barros, J. A. O. (2015). Assessment of the performance of steel fibre reinforced self-compacting concrete in elevated slabs. *Cement and Concrete Composites*, 55:268–280.
- Salehian, H., Barros, J. A. O., y Taheri, M. (2014). Evaluation of the influence of post-cracking response of steel fibre reinforced concrete (SFRC) on load carrying capacity of SFRC panels. *Construction and Building Materials*, 73:289–304.

ANEXOS

Anexo 1: Calibración de equipos

1.1. Celda de carga

La celda de carga, que se muestra en la figura 1.1, es un instrumento que dentro de su rango de uso mantiene una relación lineal entre la fuerza que se le aplica y la deformación longitudinal que experimenta. La constante de proporcionalidad entre fuerza y deformaciones es muy sensible a pequeñas variaciones de humedad, temperatura u otros factores externos por lo que se realizó un calibración previa a su uso, obteniendo los resultados que se ven en la gráfica de la figura 1.2.



(a) Celda de carga con galgas extensométricas

(b) Consola para lectura de microdeformaciones

Figura 1.1: Componentes de la celda de carga

Se puede ver en la Figura 1.2 que para cada ciclo de carga, los puntos fuerza-deformación obtenidos definen una recta casi perfecta, lo que indica que el funcionamiento de la celda es correcto. Luego se busca la recta que mejor aproxima los puntos de cada ciclo y se calcula su pendiente. El valor obtenido es la constante de proporción entre fuerza y deformación de la celda. En la tabla 1.1 se muestra el valor de la pendiente para cada ciclo junto con su correspondiente coeficiente R^2 , que es una medida de la linealidad del conjunto de puntos, valiendo 1 para una recta teórica.

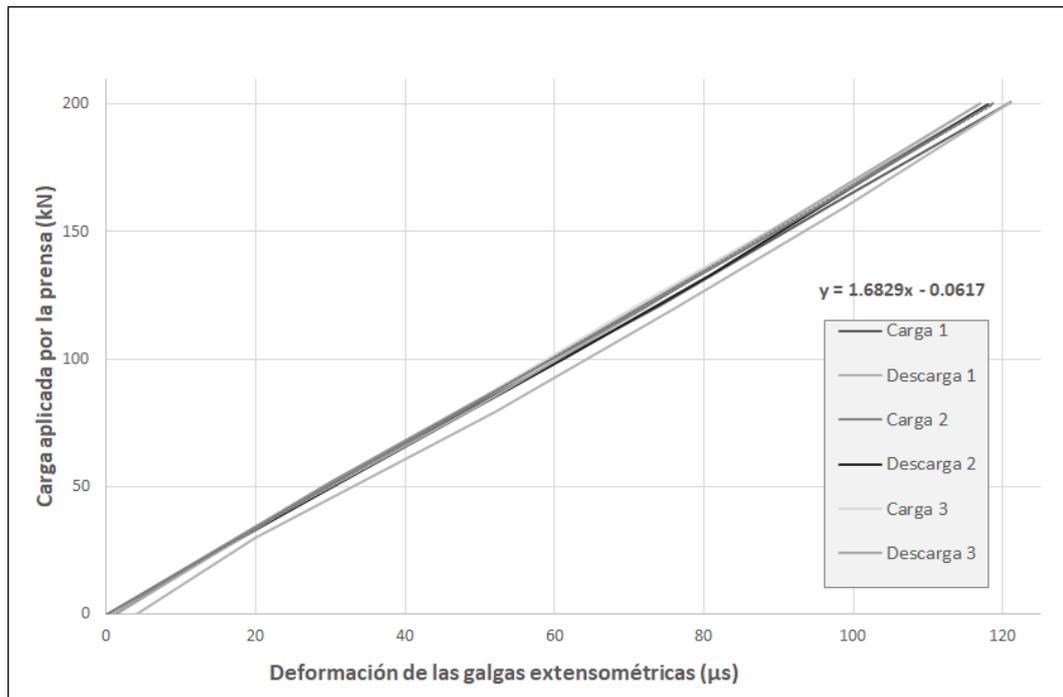


Figura 1.2: Aproximación lineal de la curva fuerza-desplazamiento obtenida del proceso de calibración de la celda.

Ciclo	k_c [kN/ μ S]	R^2
Carga 1	1.654	0.9999
Descarga 1	1.693	0.9992
Carga 2	1.689	0.9999
Descarga 2	1.695	0.9993
Carga 3	1.706	0.9999
Descarga 3	1.718	0.9995
Promedio	1.693	0.9997

Tabla 1.1: Resultados calibración celda de carga.

1.2. Gato hidráulico

Las especificaciones principales de gato usado en el ensayo de la losa se muestran en la Tabla 1.2. Este fue calibrado previamente de manera de conocer la constante de equivalencia entre la presión aplicada (psi) y la fuerza real (kN) que llega a ejercer. En la figura 1.3 se muestran imágenes del proceso de calibración. En (a) se muestra la bomba empleada para ejercer presión al gato junto con el manómetro que se le instaló para controlar la presión. En (b) se ve el gato colocado en la prensa, que registraba la fuerza que ejercía el gato. La calibración consistió un ciclo de cargas

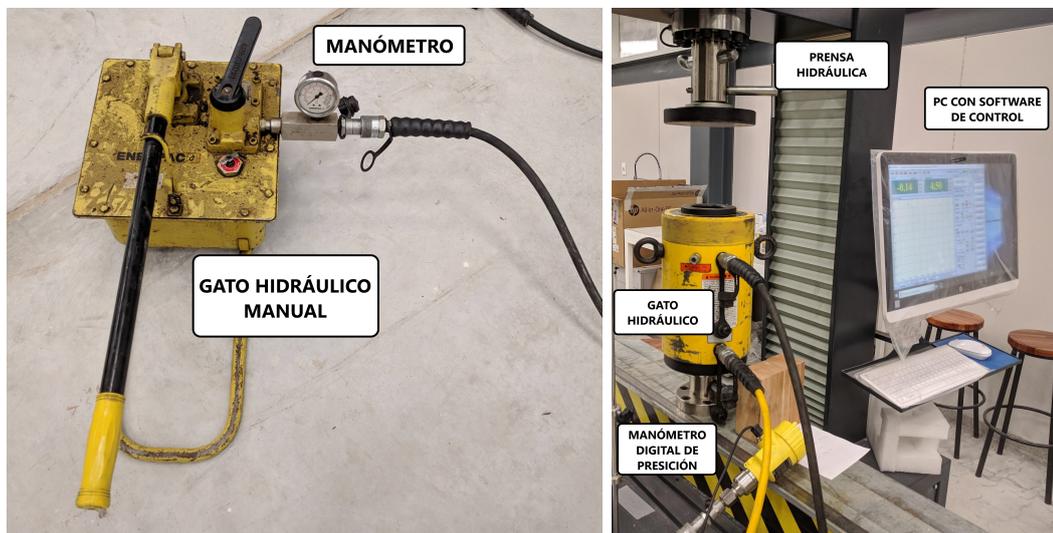
similar al que se realizaría posteriormente en el ensayo de la losa. En la tabla 1.3 se muestran los resultados obtenidos, una columna con la fuerza real que ejercía el gato, otra columna con la presión que se le aplicó y en una tercera columna la relación entre los dos valores anteriores. Luego, al promediar resulto que $k_g = 0,09kN/psi$. El día de ensayo de la losa, la fuerza fue medida mediante la celda de carga y no mediante la presión leída del manómetro, sin embargo la relación kN/psi del gato era de interés para tener una referencia del nivel de presión necesario en cada escalón.

Máxima presión de funcionamiento [psi]	10150
Máxima fuerza al estirarse [kN]	931
Máxima fuerza al contraerse [kN]	612
Altura plegado [mm]	342
Altura extendida [mm]	495
Diámetro exterior [mm]	212
Peso [kg]	79

Tabla 1.2: Especificaciones más relevantes del gato empleado en el ensayo

Fuerza [kN]	Lectura manómetro [psi]	k [kN/psi]
80	850	0.094
121	1250	0.097
160.55	1750	0.092
200.72	2180	0.092

Tabla 1.3: Resultados de la calibración del gato



(a) Bomba manual con manómetro

(b) Gato colocado en la prensa para su calibración

Figura 1.3: Proceso de calibración del gato hidráulico