



Aportes para el control de calidad del hormigón reforzado con fibras de acero

Proyecto de Investigación e Innovación en Ingeniería
Estructural

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

Estudiantes:

Sara Christoff

Ramiro Dall'Oglio

Camilo Hernández

Tutor:

Dr. Ing. Luis Segura

Co tutora:

Dr. Fis. Alina Aulet

Mayo de 2022

Agradecimientos

En primer lugar, queremos extender nuestro agradecimiento a todos los grupos de estudiantes de la Facultad de Ingeniería predecesores de esta investigación y a sus colaboradores. Sin el trabajo previo de cada grupo no sería posible que nosotros continuemos con la tarea de investigar y recolectar más datos para poder fundar las bases de la utilización del hormigón reforzado con fibras en Uruguay.

También queremos agradecer a los estudiantes extranjeros que han aportado hasta ahora elementos claves en el estudio del HRFA. En especial a Iván Rodríguez Llaves, cuyo trabajo fue indispensable como guía para la construcción y diseño de la bobina para el método inductivo.

Esta investigación es parte del proyecto CSIC i+d 2020 (id:475) "Evaluación teórica y experimental de losas de hormigón reforzado con fibras" de los cuales se obtuvieron fondos para poder hacernos con los insumos requeridos, así que, extendemos nuestra gratitud a todos los involucrados en el mismo.

Gracias a nuestra Cotutora Alina Aulet quién nos ayudó a entender los fenómenos físicos detrás del método inductivo y nos alentó en todo momento.

Gracias a Ariel de Bobinados Avramo por construir el sensor inductivo que funciona a la perfección.

Gracias al laboratorio de estructuras de la Facultad de Ingeniería que nos permitió el uso de las prensas y todas las herramientas necesarias para la manipulación de los testigos.

Gracias a Cinthia Planchón por ayudarnos a manipular la prensa del laboratorio de Facultad de Ingeniería y realizar los ensayos de testigos.

Gracias a Beto por recibirnos con una sonrisa.

Gracias a Leandro y Alejandro por ayudarnos con la extracción de testigos.

Gracias a la Guardia Republicana por permitirnos el acceso al predio donde se encuentra la losa elevada de HRFA.

Gracias a María Noel Pereyra por permitirnos utilizar las instalaciones del laboratorio de construcción.

Gracias a nuestro tutor Luis Segura por el trabajo realizado durante la investigación.

También damos las gracias a las empresas en las que trabajamos, que flexibilizaron horarios y días para poder realizar las diferentes jornadas experimentales.

Por último, resta agradecer a nuestras familias, amigos y compañeros de facultad que nos apoyaron durante esta investigación y también en la formación académica que elegimos.

Resumen

El hormigón armado es un material que tiene muchas características deseables para la industria de la construcción, por este motivo hoy en día es el material más utilizado en dicha industria. Al descubrirse que la incorporación de hierro mejora sustancialmente la resistencia a flexión del hormigón, este se convirtió en el material ideal. Económico, de fácil manipulación, moldeable, fácilmente transportable, con una alta resistencia a la compresión y, en combinación con el hierro, a la flexión (también presenta algunas desventajas, como por ejemplo su elevado peso propio o la gran emisión de CO₂ que produce en su fabricación). Dicho descubrimiento llevó a un cambio de paradigma en la construcción, lográndose la realización de estructuras que antes no podían ser construidas. Sin embargo, en el presente, la industria demanda una mayor eficiencia en tiempos de obra, economía y respeto al medio ambiente, algo que hoy en día, en nuestro medio, es difícil cumplir. Para afrontar estos problemas es que surge el hormigón reforzado con fibras de acero (HRFA). El mismo cuenta con características mecánicas adecuadas, permite reducir la mano de obra en su ejecución con respecto al hormigón convencional y también el desperdicio de hierro.

La presente investigación tiene como objetivo mejorar el control de calidad de estructuras de HRFA, el cual es, al día de hoy, uno de los mayores impedimentos para su implementación. Para esto, se realizó el Ensayo Montevideo (MVD) y se comparó con los resultados obtenidos del ensayo a flexión a tres puntos, realizado a testigos extraídos de la primera losa elevada de HRFA en Sudamérica. En dicha comparación, se obtuvieron resultados muy similares, presentándose errores menores al 8%. Luego, se buscó una ecuación que permita, para el ensayo MVD, estimar el ancho de fisura en testigos de HRFA con endurecimiento sin necesidad de utilizar un LVDT. Dicha estimación ya se había logrado para el HRFA con ablandamiento, y en este caso, se halló una forma de obtener la estimación para el HRFA con endurecimiento. Se obtuvieron las fuerzas de diseño f_{R1} y f_{R3} con errores menores al 5% y 8% respectivamente, en la mayoría de los casos del lado de la seguridad. Esto simplificaría aún más el ensayo MVD, ya que no sería necesario el uso de un LVDT para medir el ancho de fisura.

Se desarrolló un sensor magnético para determinar la cantidad de fibras y su orientación en estructuras de HRFA in situ, utilizando un ensayo no destructivo. Con dicho sensor, se obtuvo una relación de proporcionalidad entre la cantidad de fibras y la medida de la inductancia. Esto permite identificar los lugares con mayor y menor cantidad de fibras en la losa. También se encontró una relación entre la inductancia y la dirección de las fibras, lo que permite determinar localmente la dirección preferencial de las fibras. Aunque aún hay mucho camino para recorrer con el ensayo, es una primera aproximación con resultados más que satisfactorios.

Por último, se realizó de manera muy simplificada, una comparación de soluciones estructurales entre una losa de hormigón armado convencional y una losa de HRFA. Se llegó a la conclusión de que la misma, podría ser construida con el mismo material que la losa elevada de la cual se extrajeron los testigos.

Abstract

The conventional reinforced concrete is a material with many desirable characteristics for the construction industry, for that reason today is the most used material in this industry. When it was discovered that the iron addition substantially improves the bending strength of concrete, it became the ideal material. Cheap, easily handled, moldable, easy to transport, with high resistance to compression and, combined with iron, high resistance to bending too (it has also some disadvantages, as its weight or the CO₂ emission produced in its manufacture). This discovery led to a paradigm shift in construction, achieving the realization of structures that previously could not be built. However, at present, the industry demands greater efficiency in construction time and economy, something that, due to the costly and unskilled labor force, is difficult to achieve. In order to face these problems, Fiber Reinforced Concrete (FRC) emerged. This concrete has adequate mechanical characteristics, allows a labor force reduction in its execution and also waste of iron.

The present research aims to improve the quality control of FRC structures, which is, at present, one of the major impediments to its implementation. For this purpose, the Montevideo Test (MVD) was performed and compared with the results obtained from the three-point bending test, carried out on cores extracted from the first elevated FRC slab in South America. In this comparison, very similar results were obtained, with errors of less than 8%. Then, an equation was sought that would allow, for the MVD test, to estimate the crack width in FRC cores with hardening without the need to use a LVDT. Such estimation had already been achieved for the FRC with softening, and in this case, a way was found to obtain the estimation for the FRC with hardening. The design forces f_{r1} and f_{r3} were obtained with errors of less than 5% and 8% respectively, in most cases on the safety side. This would further simplify the MVD test, that would not be necessary the use of an LVDT to measure the crack width.

A magnetic sensor was developed to determine the number of fibers and their orientation in FRC structures in situ, using a non-destructive test. With this sensor, a proportional relationship between the number of fibers and the inductance measurement was obtained. This allows us to identify the places with higher and lower amounts of fibers in the slab. A relationship was also found between the inductance and the direction of the fibers, which makes it possible to determine locally the preferential direction of the fibers. Although there is still a long way to go with the test, it is a first approximation with more than satisfactory results.

Finally, a simplified comparison has been made between a conventional reinforced concrete slab and a FRC slab. It was concluded that it could be built with the same material as the elevated slab from which the cores were extracted.

Índice

1	Introducción y planteamiento	10
1.1	<i>Introducción</i>	10
1.2	<i>Objetivos</i>	10
1.2.1	Objetivo general	11
1.2.2	Objetivos específicos	11
2	Estado del arte	12
2.1	<i>Ensayo a flexión</i>	12
2.2	<i>Ensayo Montevideo.....</i>	13
2.3	<i>Clasificación del material</i>	13
2.4	<i>Ley Constitutiva.....</i>	15
2.5	<i>Método inductivo</i>	17
3	Ensayo a flexión	19
3.1	<i>Introducción</i>	19
3.2	<i>Procedimiento.....</i>	20
3.3	<i>Análisis de resultados.....</i>	22
3.3.1	Relación flecha – fuerza.....	24
3.3.2	Relación flecha – apertura de fisura.....	24
3.3.3	Relación tensión - apertura de fisura	25
3.4	<i>Conclusiones.....</i>	26
4	Ensayo Montevideo.....	27
4.1	<i>Introducción</i>	27
4.2	<i>Objetivos</i>	27
4.3	<i>Descripción del ensayo</i>	27
4.4	<i>Descripción de la muestra y metodología de ensayo en testigos de vigas.....</i>	28
4.5	<i>Testigos de vigas extraídas en losa experimental</i>	29
4.5.1	Análisis de resultados ensayo MVD en testigos extraídos con forma de viga.....	30
4.6	<i>Testigos circulares extraídos de losa experimental.....</i>	31
4.6.1	Procedimiento de extracción en testigos circulares.....	31
4.6.2	Preparación del testigo para el ensayo en testigos circulares	32
4.6.3	Análisis de resultados en testigos circulares	34
4.6.4	Conclusiones de ensayo MVD de testigos circulares.....	35
4.7	<i>Relación entre desplazamiento de la cuña y CTOD</i>	35
4.8	<i>Correlación entre ensayo a Flexión y ensayo MVD</i>	44
4.8.1	Antecedentes	44
4.8.2	Análisis de resultados	45
4.8.3	Conclusiones.....	50
4.8.4	Líneas de investigación a futuro.....	50
5	Sensor para la detección de la dirección preferencial de las fibras	51
5.1	<i>Objetivos</i>	51
5.2	<i>Marco teórico.....</i>	51
5.2.1	Definición de bobina	51
5.2.2	Definición de Inductancia.....	51
5.2.3	Comportamiento de un inductor magnético.....	51
5.2.4	Principios físicos	51

5.3	<i>Desarrollo del sensor magnético</i>	53
5.3.1	Materiales utilizados	53
5.3.2	Equipo LCR.....	54
5.3.3	Elección de la frecuencia a utilizar	54
5.3.4	Elección de número de vueltas a utilizar	55
5.3.5	Definición de direcciones y ejes	55
5.3.6	Alcance de medición del sensor	57
5.3.7	Profundidad y radio máximos de detección	58
5.4	<i>Ensayo inductivo en testigos</i>	60
5.4.1	Preparación del ensayo	60
5.4.2	Procedimiento	60
5.4.3	Análisis de resultados	61
5.4.4	Resultados del ensayo MVD	63
5.5	<i>Conclusiones</i>	64
5.5.1	Conclusiones sobre el dispositivo construido	64
5.5.2	Conclusiones sobre el ensayo inductivo.....	64
5.5.3	Conclusiones sobre los resultados esperados al ensayo MVD	64
5.6	<i>Línea de investigación a futuro</i>	64
6	Aplicación práctica para el cálculo de una losa	65
6.1	<i>Introducción</i>	65
6.2	<i>Objetivos</i>	65
6.3	<i>Normas técnicas y recomendaciones utilizadas</i>	65
6.4	<i>Descripción de la estructura</i>	65
6.5	<i>Diseño de la losa con hormigón armado convencional</i>	67
6.6	<i>Diseño de la losa con hormigón reforzado con fibra</i>	69
6.6.1	Resistencia nominal.....	69
6.7	<i>Análisis estructural</i>	70
6.7.1	Estado límite Último	70
6.7.2	Mecanismo 1	71
6.7.3	Mecanismo 2	73
6.7.4	Punzonamiento	74
6.7.5	Estado límite de servicio.....	75
6.8	<i>Comparación</i>	76
6.9	<i>Conclusiones</i>	77
7	Conclusiones generales	78
8	Bibliografía	79
9	Anexos	81
9.1	<i>Conteo de fibras en ensayo MVD</i>	81
9.2	<i>Ensayo Montevideo Modificado</i>	84
9.2.1	Introducción	84
9.2.2	Objetivos	84
9.2.3	Descripción del ensayo	84
9.2.4	Análisis del rozamiento entre el dispositivo y la pieza	84
9.2.5	Fase experimental	87
9.3	<i>Resultados de ensayo de bobina</i>	90
9.3.1	Testigo 1	90
9.3.2	Testigo 2	91
9.3.3	Testigo 3	92
9.3.4	Testigo 4	93
9.3.5	Testigo 5	94
9.3.6	Testigo 6	95

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Ensayo a flexión con carga centrada UNE 14651, 2008	12
Figura 2-2 Gráfica representativa del comportamiento del material, obtenida del Model Code 2010.	13
Figura 2-3 Configuración del ensayo (Segura-Castillo et al., 2017)	13
Figura 2-4 Comportamiento del HRF en tracción. Softening o ablandamiento (izq.) y hardening o endurecimiento (der.) with permission from the International Federation for Structural Concrete (fib). Model Code 2010.	14
Figura 2-5 Comportamiento del HRF según diferentes configuraciones. with permission from the International Federation for Structural Concrete (fib). Model Code 2010.	15
Figura 2-6 Esquema simplificado del comportamiento post fisura with permission from the International Federation for Structural Concrete (fib). Model Code 2010.	15
Figura 2-7 Modelo simplificado para calcular la resistencia última F_{Ftu} a partir de F_{R3} . with permission from the International Federation for Structural Concrete (fib). Model Code 2010.	16
Figura 2-8 Esquema simplificado del comportamiento a flexión with permission from the International Federation for Structural Concrete (fib). Model Code 2010.	16
Figura 2-9 a- resultado típico de un ensayo a flexión con ablandamiento; b- ley constitutiva lineal post fisura with permission from the International Federation for Structural Concrete (fib). Model Code 2010.	17
Figura 2-10 Bobinas construidas en el IET (Cañette et al., 2017).	17
Figura 2-11 Sensor y analizador de impedancias realizado por Rodríguez Llaves (2014)	18
Figura 3-1 Ubicación de los testigos en losas (González et al., 2020)	20
Figura 3-2 Ensayo a flexión montado en la prensa con los LVDT	20
Figura 3-3 Esquema de cálculo para w (ancho de fisura)	21
Figura 4-1 Geometría de la cuña metálica (izq.) Testigo preparada para el ensayo MVD (der.)	28
Figura 4-2 Posición de LVDT en ensayo MVD.	28
Figura 4-3 Nomenclatura de testigos.	29
Figura 4-4 Geometría ensayo MVD.....	29
Figura 4-5 Relación Tensión - CMOD para testigos, ensayo MVD.	30
Figura 4-6 Esquema de ubicación de los testigos extraídos	31
Figura 4-7 Defectos en testigos 6 y 5, cara inferior	32
Figura 4-8 Procedimiento de preparación testigo circulares.....	33
Figura 4-9 Mesa de corte para testigos extraídos	33
Figura 4-10 Pulidora para testigo extraído	34
Figura 4-11 Gráfica Fuerza-CMOD para testigos circulares.....	34
Figura 4-12 Rotura Testigo 2. Izq.: Cara superior de losa. Der.: Cara inferior de losa.....	35
Figura 4-13 Gráfica Fuerza-Desplazamiento Pistón y en eje secundario Desplazamiento LVDT-Desplazamiento de pistón	36
Figura 4-14 Gráfico de derivada función Fuerza-Desplazamiento del Pistón- y media móvil de 25 períodos.	37
Figura 4-15 Gráfico derivada Fuerza-Desplazamiento del pistón y media móvil de 50 períodos. ...	37
Figura 4-16 Gráficos de pendientes del CTOD estimado.	38
Figura 4-17 Relación Fuerza - CTOD para el testigo V1-A-21.....	40
Figura 4-18 Gráfico CTOD medido con LVDT vs. CTOD estimado Testigo V1-A-23.	41
Figura 4-19 Gráfico Fuerza-CMOD medido con LVDT vs. Fuerza-CMOD estimado.....	42
Figura 4-20 Rotura del testigo V10-A-12.	44
Figura 4-21 Diagramas de tensiones y fuerzas resultantes para a) ensayo de flexión de vigas y b) ensayo MVD. (Segura-Castillo et al., 2017).	44
Figura 4-22 Hipótesis de esquema de tensiones en un ensayo MVD.....	46
Figura 4-23 Gráfico Tensión-CMOD testigos a flexión.....	47

Figura 4-24 Gráfico Tensión-CMOD testigos a flexión media	48
Figura 5-1 Curva de comportamiento de un inductor magnético (Rodríguez Llaves, 2014).....	51
Figura 5-2 Representación de circuito con dos bobinas.....	52
Figura 5-3 Esquema de posición de las fibras para medir la inductancia. (izq.) Paralela a la dirección del núcleo (der.) perpendicular al núcleo (Rodríguez Llaves, 2014).	53
Figura 5-4 Dimensiones del núcleo de ferrita en milímetros.	53
Figura 5-5 Bobina construida para la detección de la dirección preferencial de las fibras	54
Figura 5-6 Equipo LCR	54
Figura 5-7 Dirección del dispositivo	56
Figura 5-8 Dispositivo con ejes definidos	56
Figura 5-9 Medida con las fibras paralelas a la bobina (izq.) y perpendiculares a la bobina (der.).....	57
Figura 5-10 Cambio de inductancia respecto al vacío fibras paralelas y perpendiculares	57
Figura 5-11 Medida de la profundidad que alcanza el sensor.....	58
Figura 5-12 Medida de alcance del dispositivo según eje X	59
Figura 5-13 Medida de alcance de dispositivo según eje Y	59
Figura 5-14 Ejes direccionales para medidas (izq.), Puntos de medida (der.) en cara superior.....	60
Figura 5-15 Orientación preferencial de las fibras en cara inferior de testigos ensayados	61
Figura 5-16 Orientación preferencial de las fibras en cara superior de testigos ensayados.....	62
Figura 5-17 Grafico de resultados promedios obtenidos en cara inferior (izq.) y cara superior (der.) de los testigos extraídos.	63
Figura 5-18 Relación entre lectura de inductancia y resistencia de los testigos circulares.....	64
Figura 6-1 Corte del edificio Cuareim	66
Figura 6-2 Esquema sobre cargas según norma EHE-08.....	66
Figura 6-3 Modelo de la losa en Robot Structural Analysis	67
Figura 6-4 Diagrama de momentos positivos según XX	67
Figura 6-5 Diagrama de momentos positivos según YY.....	68
Figura 6-6 Diagrama de momentos negativos según XX	68
Figura 6-7 Diagrama de momentos negativos según YY	68
Figura 6-8 Modelo de comportamiento de una losa de HRFA en ELU Model Code 2010.....	69
Figura 6-9 Mecanismos de rotura en losas a) en la dirección x y b) en la dirección y (ACI 544.6r-15)	71
Figura 6-10 Definición de las distancias utilizadas en las ecuaciones (ACI 544.6r-15).....	71
Figura 6-11 Zona de la losa a estudiar.	72
Figura 6-12 Referencia del Pilar 22.	73
Figura 6-13 Superficie crítica de punzonamiento para pilares alargados.	74
Figura 6-14 Momento positivo según x en estado límite de servicio	75
Figura 6-15 Momento negativo según x en estado límite de servicio.....	75
Figura 6-16 Deformaciones en modelo elástico lineal de la losa	76
Figura 9-1 Esquema de nomenclatura de las secciones de rotura para el conteo de fibras	81
Figura 9-2 Dispositivo para realizar el ensayo Montevideo Modificado.	84
Figura 9-3 Foto del dispositivo para el ensayo Montevideo modificado.	85
Figura 9-4 Introducción de la fuerza de la prensa en el dispositivo metálico.	85
Figura 9-5 Esquema tridimensional adoptado.....	85
Figura 9-6 Coeficientes de rozamiento entre distintos materiales. Fuente: Serway R. A.. Física. Editorial McGraw-Hill. (1992)	87
Figura 9-7 Gráfico donde se puede apreciar el deslizamiento de la pieza	88
Figura 9-8 Superficie modificada del dispositivo metálico.	88
Figura 9-9 Mejora de la rugosidad en testigo.	89
Figura 9-10 Testigo con Poxilina para mejorar el rozamiento con la pieza metálica.	89

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3–1 Línea de tendencia y coeficiente R2.....	25
Tabla 4–1 Dimensiones de testigos.	29
Tabla 4–2 Comparación de resultados, ensayo MVD.	30
Tabla 4–3 Coordenadas de testigos extraídos	31
Tabla 4–4 Medidas geométricas de los testigos extraídos	32
Tabla 4–5 Altura total y útil de testigos extraídos para ensayo MVD	34
Tabla 4–6 Resultados de ensayos MVD	35
Tabla 4–7 Comparación de resultados.	40
Tabla 4–8 Comparación CMOD 1 y 2, medidos con LVDT vs. Estimados.....	42
Tabla 4–9 Comparación CMOD 3 y 4, medidos con LVDT vs. Estimados.....	43
Tabla 4–10 Comparación de Fuerzas obtenidas con LVDT vs. Fuerzas con CTOD estimado.....	43
Tabla 4–11 Resultados testigos a flexión en MPa.	47
Tabla 4–12 Resultados testigos a flexión media en MPa.....	48
Tabla 4–13 Resultados tensión ajustada MVD en testigos viga.	48
Tabla 4–14 Comparación testigos en forma de viga ensayados a MVD vs. testigos en forma de viga a flexión.....	49
Tabla 4–15 Comparación Testigos viga MVD vs. testigos viga flexión media.....	49
Tabla 4–16 Resultados de ensayo MVD en testigos circulares.....	49
Tabla 4–17 Comparación testigos viga MVD vs. Testigos circulares MVD	49
Tabla 5–1 Inductancia en el vacío en las distintas frecuencias posibles	55
Tabla 5–2 Inductancia (L) según cantidad de vueltas a 10 kHz.	55
Tabla 5–3 Lecturas de fibras paralelas y perpendiculares a la bobina	57
Tabla 5–4 Medidas de la profundidad que alcanza el sensor.....	58
Tabla 5–5 Medidas tomadas por el sensor según el eje X.....	59
Tabla 5–6 Medidas tomadas por el sensor según el eje Y.....	60
Tabla 5–7 Lectura de inductancia obtenida para el testigo nro.1 cara superior (izq.), cara inferior (der.)	61
Tabla 5–8 Resultados promedios obtenidos en cara inferior (mH).....	62
Tabla 5–9 Resultados promedios obtenidos en cara superior de los testigos (mH)	62
Tabla 5–10 Resultados obtenidos en testigos circulares.....	63
Tabla 6–1 Armado de los momentos positivos según XX.....	67
Tabla 6–2 Armado momentos positivos según YY.....	68
Tabla 6–3 Iteración con distintos espesores de losa de HRFA.....	72
Tabla 6–4 Comparación entre HRFA y Hormigón convencional.....	77
Tabla 9–1 Resultados obtenidos para carga de prensa de 10 kN.....	86
Tabla 9–2 Resultados obtenidos para carga de prensa de 15 kN.....	86
Tabla 9–3 Resultados obtenidos para carga de prensa de 20 kN.....	86
Tabla 9–4 Fuerza de rotura para un tornillo de 16 mm para distintas tensiones de rotura.	87

1 Introducción y planteamiento

1.1 Introducción

A lo largo de la historia, el desarrollo de los sistemas constructivos en el país fue cambiando debido a distintos factores; tanto económicos, sociales y tecnológicos, como pueden ser costos referentes a mano de obra o distintos materiales, implementación de nuevas técnicas constructivas o la utilización de nuevas herramientas.

El hormigón reforzado con fibras de acero (HRFA) es un material compuesto, en el cual se agregan fibras de acero a una masa de hormigón. La introducción de fibras dota al hormigón de características deseables en un material que forma parte de estructuras, como pueden ser el aumento de la tenacidad, mejora ante la abrasión, mejor redistribución de esfuerzos, mejor distribución de fisuras y mejora de la resistencia al fuego. (Cañette et al., 2017).

Debido a estas características el HRFA es un material que se ha investigado en todo el mundo. En países desarrollados ha sido utilizado en pavimentos, piezas premoldeadas y estabilidad de taludes. En Uruguay, se han realizado pavimentos de hormigón reforzado con fibras (HRF) y, en 2019, se construyó la primera losa elevada de hormigón con fibra de Sudamérica (Infante et al., 2019). Estos son grandes avances en lo que respecta a la introducción de este material a la industria de la construcción local.

Una problemática que presenta el HRFA es el control de calidad, ya que, a diferencia del hormigón armado convencional, en el que se sabe exactamente la distribución de los hierros, no se puede saber exactamente la distribución de las fibras luego de la ejecución. Las normas referentes mismo recomiendan su caracterización mediante el ensayo de vigas a flexión. Esto significa tratar con probetas y testigos de grandes dimensiones y, por tanto, pesados para maniobrar, y difíciles de ejecutar en el caso de los testigos. En la actualidad se está investigando el ensayo Montevideo (MVD) (Segura-Castillo et al., 2017) en el que se realiza un estudio de la flexión del HRFA con piezas de menores dimensiones y se encuentra una relación con el ensayo a flexión tradicional. Esta investigación tiene como objetivo continuar realizando ensayos MVD a testigos extraídos y encontrar una relación con el ensayo a flexión también en testigos. A su vez se busca encontrar una función que permita estimar el ancho de fisura de los testigos a partir del desplazamiento del pistón, lo que permite prescindir de medidores LVDT en el ensayo MVD.

Aunque extraer testigos es la forma más fiable de comprobar la calidad del HRFA in-situ. Existen investigaciones de ensayos no destructivos (Rodríguez Llaves, 2014). En estos, mediante la utilización de un sensor magnético que se basa en el método inductivo, se busca determinar la cantidad y orientación preferencial de las fibras para comprobar la posición de las mismas en las piezas construidas, sin necesidad de dañar la estructura. En Uruguay se realizó una investigación utilizando el método inductivo con bobinas de Helmholtz (Cañette et al., 2017). En este, se puede pasar una probeta, testigo o piezas premoldeadas por dentro de las bobinas y saber la cantidad de fibras que contiene la misma. Aunque es un gran avance, no sirve para realizar controles de calidad sin intervenir la estructura. Un ensayo no destructivo permitiría realizar un control de calidad complementario para dar más fiabilidad al HRFA y, por tanto, que sea más utilizado en la industria de la construcción. Otro de los objetivos de esta tesis es desarrollar un sensor que permita saber la cantidad y orientación de las fibras embebidas en el hormigón, sin necesidad de intervenir la estructura.

Dado que en la tesis hay varias líneas de investigación, se realiza para cada una de las mismas, una introducción, objetivos de la sección, desarrollo de ensayos y conclusiones parciales obtenidas. Por último, se presentan las conclusiones generales de todas las secciones a modo de resumen.

1.2 Objetivos

Se busca mediante este trabajo profundizar en el estudio del HRF como material a utilizar en elementos estructurales, continuando con las investigaciones realizadas en los últimos años en el marco del Proyecto de Investigación e Innovación en Ingeniería Estructural.

1.2.1 Objetivo general

Aportar elementos para el control de calidad de HRFA en estructuras in-situ, mediante ensayos mecánicos y el método inductivo.

1.2.2 Objetivos específicos

Hallar la correlación existente entre el ensayo a flexión y el ensayo Montevideo (MVD) en testigos extraídos, con el fin de realizar ensayos con piezas de menores dimensiones a las usadas en el ensayo de flexión.

Hallar una ecuación que permita estimar el CTOD en el ensayo MVD a partir del desplazamiento del pistón de la prensa.

Desarrollar un sensor magnético para realizar ensayos no destructivos de HRFA.

Implementar el ensayo inductivo con el sensor magnético construido y determinar la cantidad y orientación preferencial de las fibras mediante el ensayo inductivo.

Evaluar la capacidad del material para construcción, comprobando que el HRFA es capaz de sustituir gran parte de la armadura convencional en losas, mediante la realización del cálculo de la losa de un edificio de viviendas.

2 Estado del arte

2.1 Ensayo a flexión

La resistencia a flexión es uno de los aspectos más importantes para el HRFA. Existen diversos métodos para su determinación, tanto ensayos de tracción directa (no recomendados debido a su difícil implementación) como indirecta. El ensayo sugerido es el ensayo de flexión a tres puntos, presentado en la norma UNE 14651 (2008) "Método de ensayo para hormigón con fibras metálicas". En la Figura 2-1 se observa el esquema de dicho ensayo, el mismo cuenta con una carga centrada, dos apoyos simétricos y una entalla. Los testigos tienen una sección cuadrada de 150 mm de lado (nominal), y una longitud entre 550 y 700 mm. Dichas dimensiones son adecuadas para un hormigón que contenga un tamaño máximo de agregado de 32 mm y/o fibras metálicas de 60 mm de longitud máxima. Los rodillos de apoyo deben ser de acero, con una sección transversal circular de 30 ± 1 mm de diámetro, una longitud al menos 10 mm mayor que el ancho del testigo y una separación de 500 mm entre sus ejes. La entalla se realiza mediante aserrado por vía húmeda, la misma debe tener una profundidad de 25 ± 1 mm y un espesor no mayor a 5 mm.

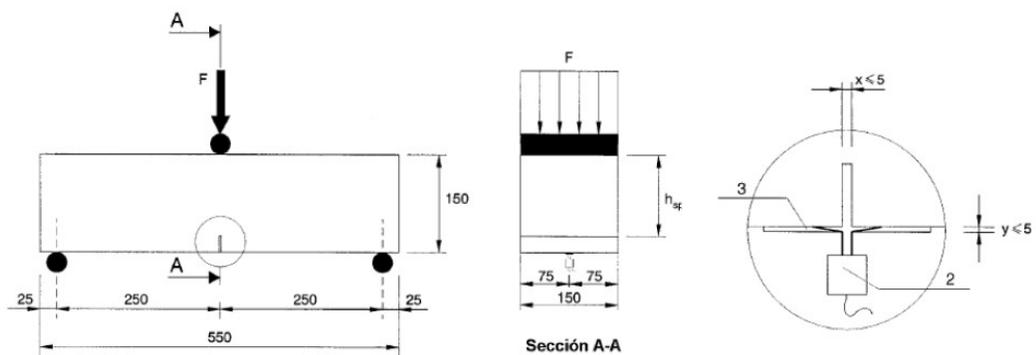


Figura 2-1 Ensayo a flexión con carga centrada UNE 14651, 2008

Mediante la realización del ensayo de flexión a tres puntos se obtienen las curvas fuerza - desplazamiento ($F - \delta$) y fuerza - apertura de fisuras ($F - \text{CMOD}$). De la relación $F - \text{CMOD}$ se obtienen los valores de fuerza F_{R1} y F_{R3} correspondientes a los valores 0,5 mm y 2,5 mm de CMOD respectivamente (o correspondientes a los valores $\delta = 0,47$ mm y $\delta = 2,17$ mm si se utiliza la curva $F - \delta$) (EN 14.651 Capítulo 9.1 "equivalencia entre el CMOD y la flecha"). Las tensiones se obtienen mediante la ecuación (2-1), extraída de la norma EN 14651 (2008):

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

Donde:

- $f_{r,j}$ (MPa) es la tensión residual que corresponde a $\text{CMOD}=\text{CMOD}_j$
- F_j (N) es la carga que corresponde a $\text{CMOD}=\text{CMOD}_j$
- l (mm) es la longitud del testigo
- b (mm) es el ancho del testigo
- h_{sp} (mm) es la distancia entre la parte superior del testigo y la garganta de la entalla

De la curva se extraen también los valores de las fuerzas F_L , F_{R2} y F_{R4} , donde F_L es la fuerza correspondiente al momento que ocurre la primer fisura y el material deja de comportarse como elástico-lineal. En la Figura 2-2 se presenta, a modo de ejemplo, una gráfica de la relación fuerza - CMOD y el significado de los valores antes definidos.

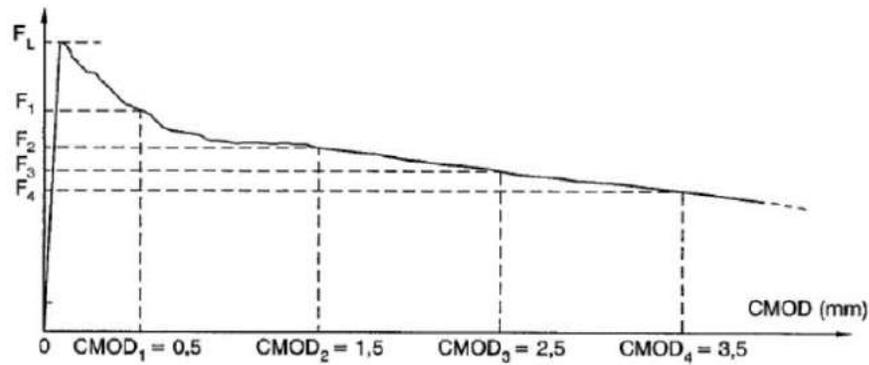


Figura 2-2 Gráfica representativa del comportamiento del material, obtenida del Model Code 2010.

2.2 Ensayo Montevideo

El ensayo Montevideo es una alternativa que presenta ciertas ventajas a la hora de evaluar el HRFA a flexión. El mismo fue presentado por Segura-Castillo et al. (2017). El ensayo se realiza a una probeta cúbica de 15 cm de lado, a la cual se le realiza una entalla y se penetra la misma con una cuña metálica, generándose una tracción indirecta en la probeta. Este ensayo tiene varias ventajas, por ejemplo, la fácil manipulación de las probetas, debido a su menor tamaño en comparación con las utilizadas en el ensayo de flexión. Además, en caso de extraerse testigos de una estructura, los mismos resultarán menos invasivos para la misma. En la Figura 2-3, se muestra una probeta preparada para realizar el ensayo. Este ensayo aún está siendo testeado, obteniéndose hasta el momento resultados muy prometedores.



Figura 2-3 Configuración del ensayo (Segura-Castillo et al., 2017)

2.3 Clasificación del material

El Model Code 2010 propone una clasificación para el HRFA, utilizando los valores obtenidos del ensayo a flexión a tres puntos. Se utilizan, para la clasificación, dos parámetros de dicho ensayo: f_{R1k} asociado a la pieza en servicio y f_{R3k} asociado al comportamiento en Estado Límite Último. El material se nombra con el valor asociado a f_{R1k} y la relación entre f_{R3k} y f_{R1k} . Se toma el valor de la tensión f_{R1k} y se le asocia una letra según las siguientes condiciones:

- a si $0.5 \leq f_{R3k}/f_{R1k} < 0.7$
- b si $0.7 \leq f_{R3k}/f_{R1k} < 0.9$
- c si $0.9 \leq f_{R3k}/f_{R1k} < 1.1$

- d si $1.1 \leq f_{R3k}/f_{R1k} < 1.3$
- e si $1.3 \leq f_{R3k}/f_{R1k}$

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

El Código, además, establece las siguientes limitantes a cumplir si lo que se busca es sustituir total o parcialmente el uso de armadura convencional:

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

Cómo se observa en la Figura 2-4, el HRFA presenta dos posibles comportamientos en tracción. En el primero, conocido como softening o ablandamiento, disminuye la resistencia al aparecer la primera fisura. En cambio, cuando hay hardening o endurecimiento, el HRF aumenta la resistencia luego de aparecer la primera fisura.

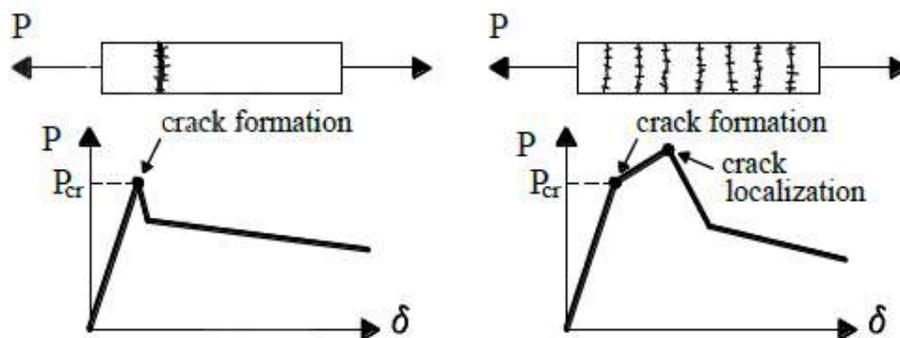


Figura 2-4 Comportamiento del HRF en tracción. Softening o ablandamiento (izq.) y hardening o endurecimiento (der.) with permission from the International Federation for Structural Concrete (fib). Model Code 2010.

En la Figura 2-5, extraída del Model Code 2010, se presenta un esquema de los distintos comportamientos que pueden surgir de un mismo material al cambiar el elemento y la forma de ensayo del mismo.

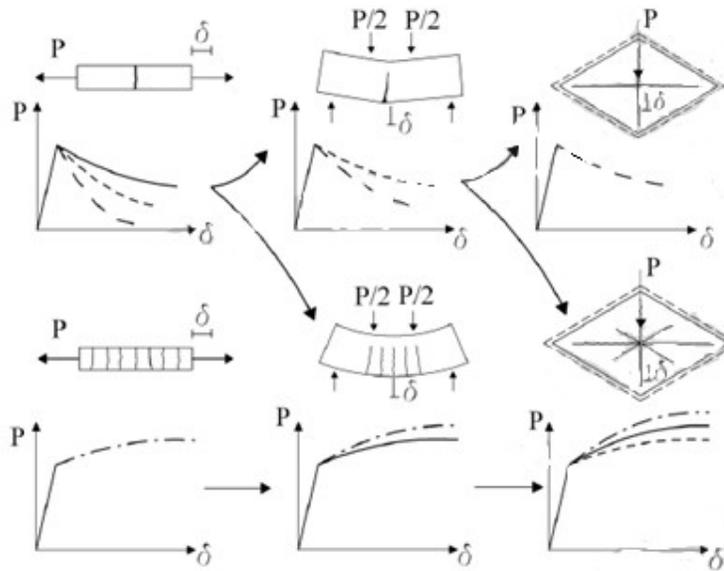


Figura 2-5 Comportamiento del HRF según diferentes configuraciones. with permission from the International Federation for Structural Concrete (fib). Model Code 2010.

El Model Code 2010 indica que un material que en el ensayo a tracción presenta ablandamiento, puede presentar ablandamiento o endurecimiento en un ensayo a flexión de viga. Además, un material que presenta ablandamiento en el ensayo de flexión puede presentar ablandamiento o endurecimiento al utilizarse en una losa. En cambio, un material que presenta endurecimiento en el ensayo de flexión, únicamente puede presentar endurecimiento si se utiliza en una losa. Si el material en el ensayo de tracción presenta endurecimiento, el mismo presentará endurecimiento en el ensayo de flexión.

2.4 Ley Constitutiva

Según el *Model Code 2010*, después de fisurada la pieza se asumen dos tipos de comportamientos a partir del ensayo de flexión. Uno es el comportamiento rígido plástico y otro el comportamiento lineal post fisura (ablandamiento o endurecimiento), como se observa en la Figura 2-6. El valor f_{Fts} representa la tensión residual de servicio y f_{Ftu} representa la tensión residual última. En la Figura 2-7 se puede ver el modelo simplificado para calcular f_{Ftu} a partir de f_{R3} . En este esquema se asume que toda la compresión está concentrada en la fibra superior de la sección.

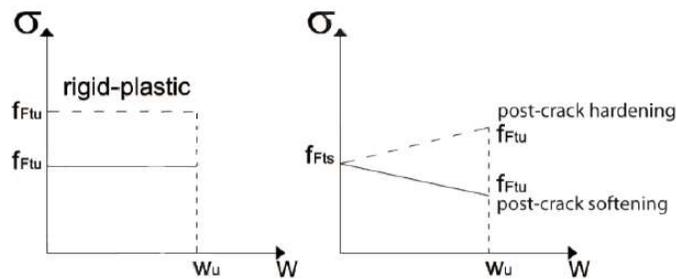


Figura 2-6 Esquema simplificado del comportamiento post fisura with permission from the International Federation for Structural Concrete (fib). Model Code 2010.

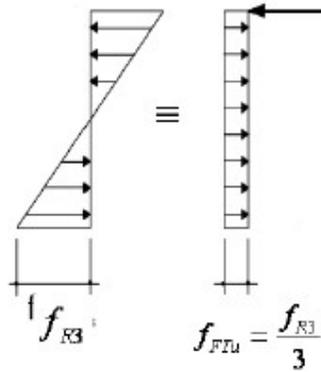


Figura 2-7 Modelo simplificado para calcular la resistencia última F_{Fu} a partir de F_{R3} . with permission from the International Federation for Structural Concrete (fib). Model Code 2010.

En la Figura 2-8 se puede ver un esquema simplificado a flexión de una viga de HRFA, donde se considera que la compresión está concentrada en un único punto en la fibra superior de la pieza. Los valores de $CMOD_1$ y $CMOD_3$ son determinados por equilibrio, asumiendo que la distribución de la compresión es lineal y el comportamiento a tensión es elasto-plástico hasta la fisura de servicio.

$$M(CMOD_1) = \frac{f_{R1} b h_{sp}^2}{6} \quad (2-2)$$

$$M(CMOD_3) = \frac{f_{R3} b h_{sp}^2}{6} \quad (2-3)$$

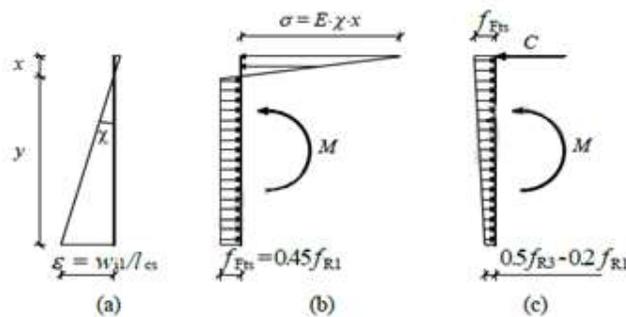


Figura 2-8 Esquema simplificado del comportamiento a flexión with permission from the International Federation for Structural Concrete (fib). Model Code 2010.

Para el modelo rígido plástico se identifica un único valor de referencia, f_{Ftu} [Ecuación (2-4)], basado en el comportamiento último.

$$f_{Ftu} = \frac{f_{R3}}{3} \quad (2-4)$$

Para el modelo lineal se identifican dos valores de referencia, f_{Fts} [Ecuación (2-5)] y f_{Ftu} [Ecuación (2-6)]. Los mismos se definen a través del valor de la resistencia residual a flexión.

$$f_{Fts} = 0.45 f_{R1} \quad (2-5)$$

$$f_{Ftu} = f_{Fts} - \frac{w_u}{CMOD_3} (f_{Fts} - 0.5 f_{R3} + 0.2 f_{R1}) \geq 0 \quad (2-6)$$

En la *Figura 2-9* se puede ver un gráfico típico de un ensayo a flexión en HRFA con ablandamiento y la ley constitutiva post fisura. El valor límite de w_u sólo aplica para propósitos de diseño y es el máximo ancho de fisura aceptado.

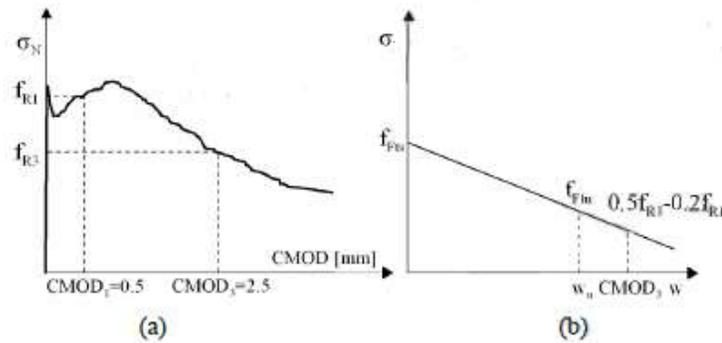


Figura 2-9 a- resultado típico de un ensayo a flexión con ablandamiento; b- ley constitutiva lineal post fisura with permission from the International Federation for Structural Concrete (fib). Model Code 2010.

2.5 Método inductivo

Las fibras metálicas que forman parte del HRFA tienen propiedades ferromagnéticas y son capaces de distorsionar campos magnéticos. Este es el principio que se utiliza en el método inductivo. Al generar campos magnéticos con bobinas y exponerlos ante piezas de HRFA los mismos son distorsionados y esta distorsión se puede medir a través de la variación de inductancia.

El hormigón de la matriz tiene una permeabilidad magnética cercana a $1 \frac{\text{T}\cdot\text{m}}{\text{A}}$ mientras que las fibras metálicas tienen una permeabilidad mayor a $1000 \frac{\text{T}\cdot\text{m}}{\text{A}}$. Esta diferencia entre los dos materiales es la base que se utiliza para la construcción de un sensor magnético capaz de medir la diferencia de inductancia y así, poder detectar las fibras en la masa de hormigón.

El Instituto de Estructuras y Transporte (IET) de la Universidad de la República realizó un estudio de HRF mediante bobinas Helmholtz (Cañette et al., 2017). Donde las bobinas forman un campo uniforme dentro de la región interior permitiendo pasar los testigos completamente dentro del dispositivo. En esta investigación se buscó hallar la densidad de fibras en las muestras. En la *Figura 2-10* se pueden ver las bobinas realizadas y las muestras que se utilizaron para medir y obtener resultados.



Figura 2-10 Bobinas construidas en el IET (Cañette et al., 2017).

El estudio de HRFA mediante este método se está realizando en muchas universidades con buenos resultados. La bobina realizada en esta oportunidad está basada en el estudio realizado por Christoff – Dall’Oglio - Hernández

Rodríguez Llavés (2014). En la *Figura 2-11* se muestra el sensor realizado en esa investigación, conectado a un analizador de impedancias. Este equipo permite realizar la curva de impedancias y regular la frecuencia con la que se utiliza el sensor. Estas propiedades permitieron a esa investigación utilizar el sensor de manera óptima.

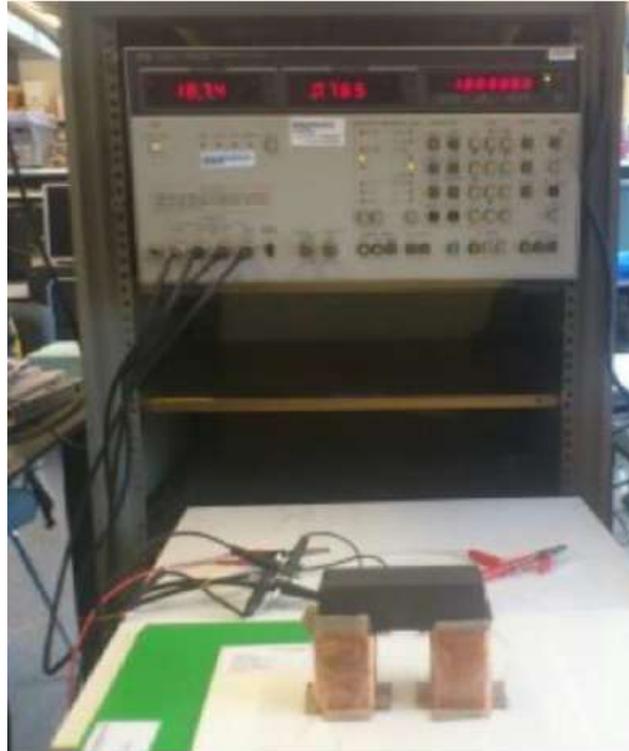


Figura 2-11 Sensor y analizador de impedancias realizado por Rodríguez Llavés (2014)

3 Ensayo a flexión

3.1 Introducción

La losa elevada que se estudió, es la presentada en (González et al., 2020). La misma fue construida en un predio de la Guardia Republicana, en la ciudad de Montevideo, en el año 2018. Dicha losa está apoyada en nueve pilares cuadrados de 20 cm de lado, y tiene una superficie cuadrada de 6,2 m de lado y 13 cm de espesor.

Se presenta a continuación la dosificación con la que se realizó el HRFA, realizada por Infante (2019):

- Relación agua/cemento = 0,4
- Arena fina (kg/m³) = 671,4
- Arena gruesa (kg/m³) = 251,8
- Gravillín (kg/m³) = 503,5
- Pedregullo (kg/m³) = 251,8
- Agua (kg/m³) = 180
- Cemento (kg/m³) = 450
- Aditivo superplastificante (kg/m³) = 9
- Fibras (kg/m³) = 90

Se realizó el ensayo de flexión a los testigos (V13, V15, V16 y V17) extraídos de la losa para evaluar su comportamiento y conocer su resistencia residual. En el ensayo, los testigos se colocaron conservando la orientación original que tenían en la losa, concentrándose las tracciones en la parte inferior de la sección (momento positivo, representativo de las secciones de la losa que se encuentran alejadas de los apoyos en los pilares).

El procedimiento de extracción de los testigos utilizados se detalla en la tesis de González (2020). Se determinó la ubicación de los mismos considerando que el material no estuviera afectado por intervenciones anteriores (fisuras por ensayos realizados a la losa previamente). También se procuró que los testigos tuviesen distintas orientaciones con respecto a los bordes de la losa. En la Figura 3-1 se muestra la ubicación y orientación de los testigos extraídos.

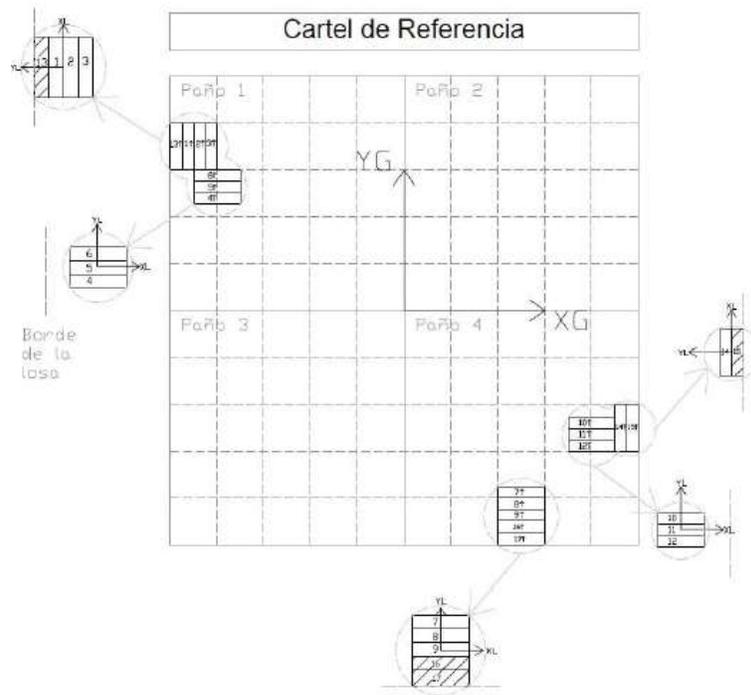


Figura 3-1 Ubicación de los testigos en losas (González et al., 2020)

3.2 Procedimiento

Se midieron las dimensiones de los testigos (largo, ancho y espesor) y se marcaron los puntos donde se colocaron las chapas metálicas para apoyar los LVDT. Las chapas se pegaron al hormigón con resina epoxi y se dejó secar durante 10 minutos. Las mismas se colocaron para que los LVDT no se apoyaran directamente en el hormigón, ya que el mismo presentaba una superficie irregular que podría incidir en las lecturas de los instrumentos. Se marcaron en el testigo los puntos de apoyo del mismo para su posterior posicionamiento. Luego se colocaron en la prensa los elementos de apoyo del testigo, el testigo y los apoyos auxiliares para la colocación de los LVDT. Por último, se colocaron los LVDT, se verificó el signo de sus medidas y se ceró su lectura inicial.

En la Figura 3-2 se observan los LVDT (los mismos están nombrados del 2 al 5), la chapa plana donde se apoya el LVDT 2 (en el extremo opuesto del testigo se colocó el LVDT 3 de la misma manera) y la chapa en forma de "L" en la cual se apoya el LVDT 4 (análogamente, en la cara opuesta del testigo se colocó el LVDT 5).

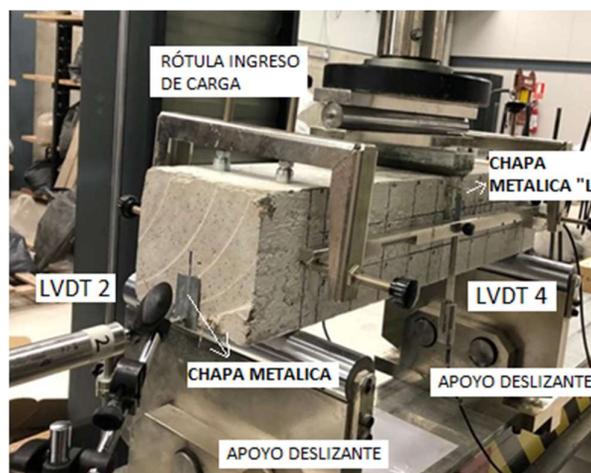


Figura 3-2 Ensayo a flexión montado en la prensa con los LVDT

Los LVDT 2 y 3 miden el estiramiento en la dirección longitudinal del punto en el cual se apoyan. Dichas medidas se utilizan para calcular la apertura de la fisura (w) en la fibra inferior del testigo, según la ecuación (3-1) y la Figura 3-3.

$$w = \Delta 1 + \Delta 2 \quad (3-1)$$

Donde:

$\Delta 1$ = medida del LVDT 2.

$\Delta 2$ = medida del LVDT 3.

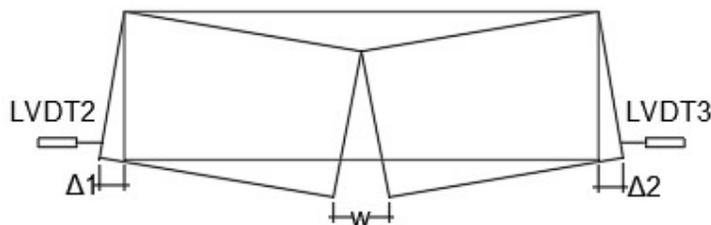


Figura 3-3 Esquema de cálculo para w (ancho de fisura)

Los LVDT 4 y 5 miden el desplazamiento vertical (δ) en la sección central del testigo a medida que el ensayo avanza. Dicho desplazamiento se calcula según la ecuación (3-2). Se debe verificar que ambos LVDT registren medidas similares, esto demuestra que la viga recibe la carga de manera uniforme, y no se produce torsión en el testigo ensayado.

$$\delta = (\Delta 3 + \Delta 4)/2 \quad (3-2)$$

Donde:

$\Delta 3$ = medida del LVDT 4.

$\Delta 4$ = medida del LVDT 5.

La carga de la prensa se aplica en el centro del testigo mediante una doble rótula que permite el acomodamiento de la carga. Los apoyos del testigo se encuentran separados 50 cm y se ubican a 25 cm del eje del mismo. Ambos apoyos son móviles, los mismos se materializan mediante rodillos que permiten el desplazamiento en la dirección longitudinal del testigo. Además, uno de los apoyos es basculante, por lo cual permite que existan giros para que no se genere torsión en el testigo.

Para la realización del ensayo se optó por controlar la prensa mediante desplazamiento y no mediante fuerza. Se comenzó cargando el testigo a una velocidad de 0.2 mm/min (luego de aplicar una precarga y asegurar que el sistema de doble rótula y la prensa estaban en contacto). Dicha velocidad se mantuvo hasta alcanzar una fuerza de 10 kN, a partir de ahí se fue disminuyendo progresivamente hasta llegar a una fuerza de 15 kN con una velocidad de 0.04 mm/min. Se continuó con dicha velocidad hasta identificar el momento en que se produjo la primera fisura, dicho instante se identifica ya que se da una caída del valor de la fuerza, además, la fisura se observaba a simple vista. Luego de observar que se produce la primera fisura, se siguió cargando el testigo a una velocidad de 0.16 mm/min hasta que el valor de la flecha y el de la apertura de fisura superaron los 4 mm, en este momento se retiraron los LVDT y se cargó el testigo hasta romper.

En la Figura 3-4 se observa la fisura en la cara lateral y en la cara inferior de uno de los testigos. En la Figura 3-5 se observa el momento de rotura de una de las vigas ensayadas, se observa que ya fueron retirados los LVDT y los instrumentos colocados para apoyar los mismos.



Figura 3–4 Fisura en cara lateral (Izq.) - Fisura en cara inferior (Der.)



Figura 3–5 Momento de rotura de testigo en ensayo a flexión.

Al realizar el ensayo de los testigos V15 y V13 se decidió realizar un ciclo de carga y descarga luego de la aparición de la primera fisura, dicho descenso de carga se llevó hasta una fuerza de 5 kN y luego se procedió nuevamente a aumentar dicha fuerza. Para los testigos V16 y V17 se realizaron ciclos de carga y descarga cada 1 mm de desplazamiento vertical.

3.3 Análisis de resultados

En la Figura 3–6 y Figura 3–7 se muestran los resultados obtenidos de los ensayos de los testigos V15 y V17, y también una ampliación del tramo inicial para mejor observación. Al comenzar el ensayo, las medidas registradas con el LVDT 2 tenían signo contrario a las registradas con el LVDT 3, lo cual puede deberse a que al principio el testigo deslizaba hacia uno de los lados, esto se corrigió con el correr del ensayo. Dado que los LVDT 4 y 5 tomaron medidas similares entre sí, lo cual es coherente ya que miden la flecha en la sección central del testigo, se opta por graficar los resultados de uno de ellos de manera indiferente.

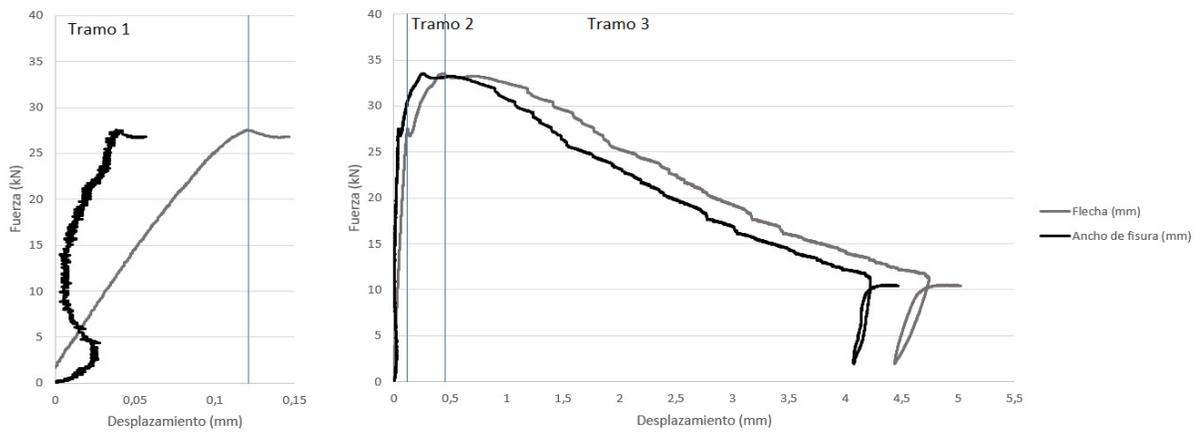


Figura 3-6 Relación carga-flecha y carga- apertura de fisura, Testigo V15

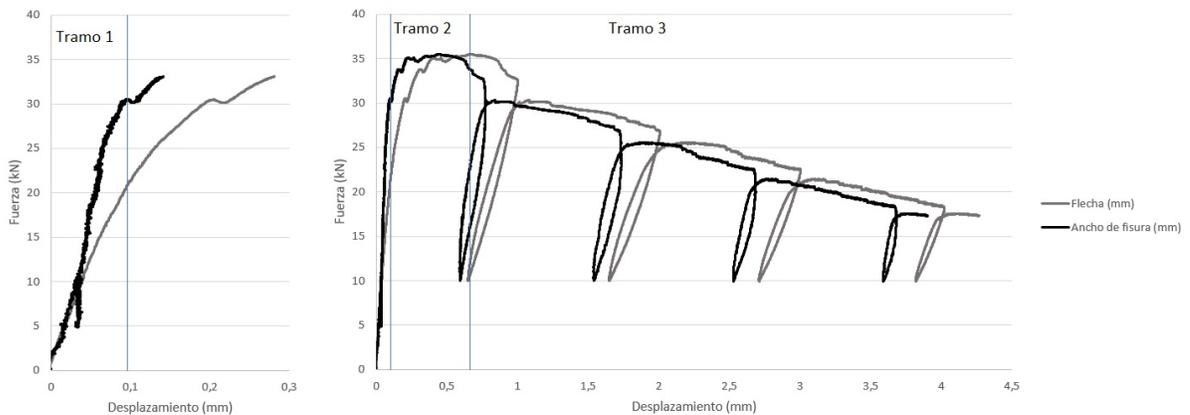


Figura 3-7 Relación carga - flecha y carga - apertura de fisura, testigo V17.

Se observa también que, al realizar los ciclos de descarga y posterior carga, el comportamiento de los testigos es aproximadamente lineal hasta retomar la antigua curva de carga, por lo cual consideramos que realizar dichos escalones de carga y descarga no influye en el comportamiento del material.

Todos los testigos se comportan de manera similar, los mismos cuentan con tres tramos: a) un tramo elástico-lineal hasta la aparición de la primera fisura; b) un tramo conocido como de endurecimiento hasta llegar a la carga máxima que es capaz de soportar el testigo, y c) un tramo de pérdida de rigidez debido a las fisuras que aparecen en la pieza.

Al ensayar los testigos V13 y V16 se encontró que su comportamiento es muy similar al de los testigos V15 y V17 respectivamente. En la Figura 3-8 y Figura 3-9 se observan los resultados obtenidos de los ensayos de los testigos V13 y V16 respectivamente.

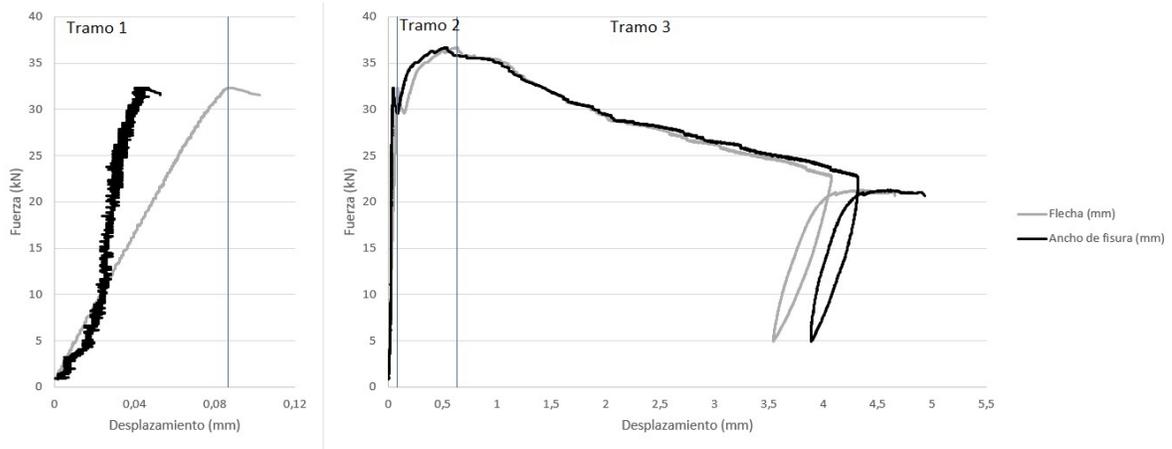


Figura 3-8 Relación carga - flecha y carga - Apertura de fisura, testigo V13.

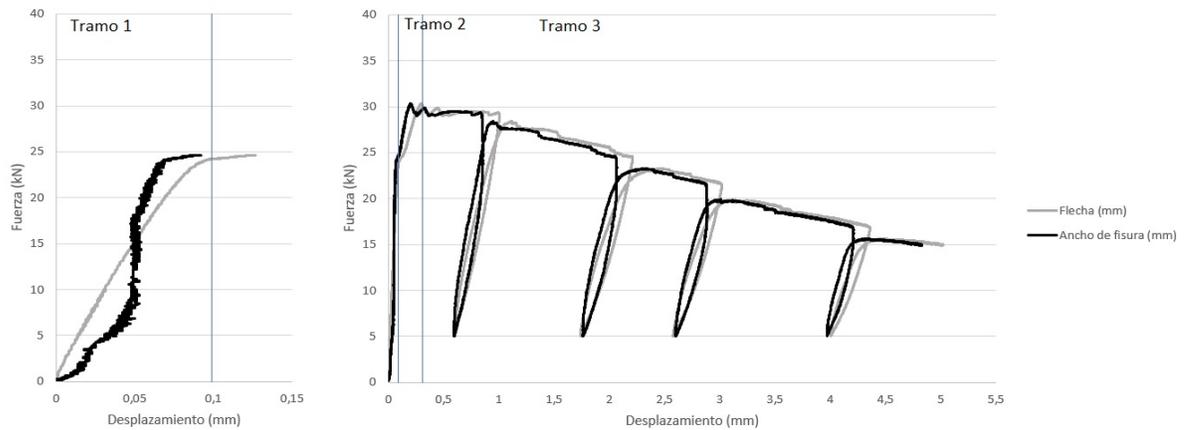


Figura 3-9 Relación carga - flecha y carga - apertura de fisura, testigo V16.

3.3.1 Relación flecha – fuerza

En la Figura 3-10 se observa la relación entre la carga que aplica la prensa y la flecha del testigo en el punto medio. Se muestra también una ampliación de la gráfica en el tramo inicial. Existe cierta dispersión en los resultados obtenidos entre testigos, esto se puede deber a las diferencias geométricas entre testigos; se observó que el testigo V13, de espesor 14.0 cm, fue el que soportó la mayor carga de rotura (36.7 kN, equivalente a 9.4 MPa). Otro factor que influye es no haber entallado los testigos, ya que al no estar definida la sección de falla lo mismos “eligen” en que sección fallar.

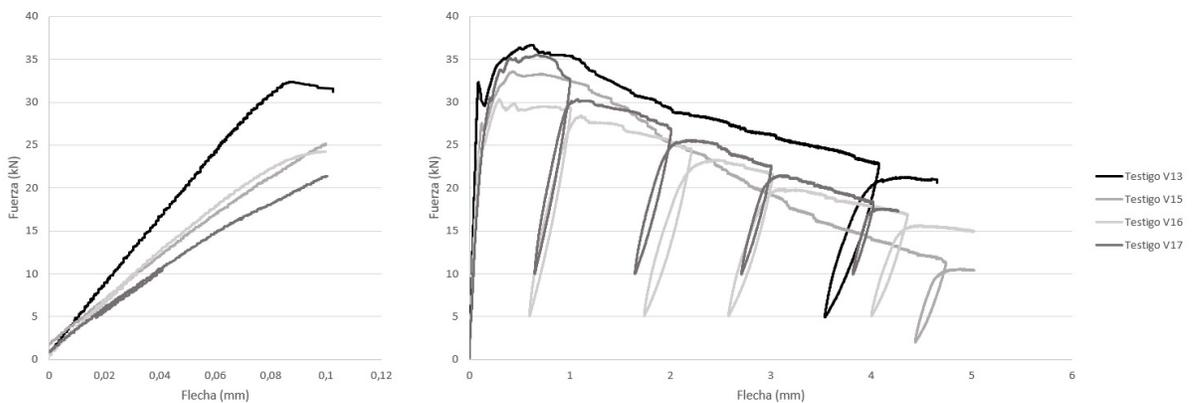


Figura 3-10 Relación fuerza - flecha de los testigos ensayados.

3.3.2 Relación flecha – apertura de fisura

En la Figura 3-11 se observa la relación entre la flecha del testigo en el punto medio y la apertura de fisura. Se muestra también una ampliación de la gráfica en el tramo inicial. Se observa un

comportamiento lineal posterior a la aparición de la primera fisura, donde el coeficiente de correlación (R^2) es mayor a 0.998 en todos los casos. Esto demuestra que, luego de haber aparecido la primera fisura, existe una relación lineal entre la flecha y la apertura de fisura. En la Tabla 3–1 se observa, para cada testigo, la ecuación de la recta que mejor aproxima al tramo lineal luego de la aparición de la primera fisura y el coeficiente de correlación (R^2).

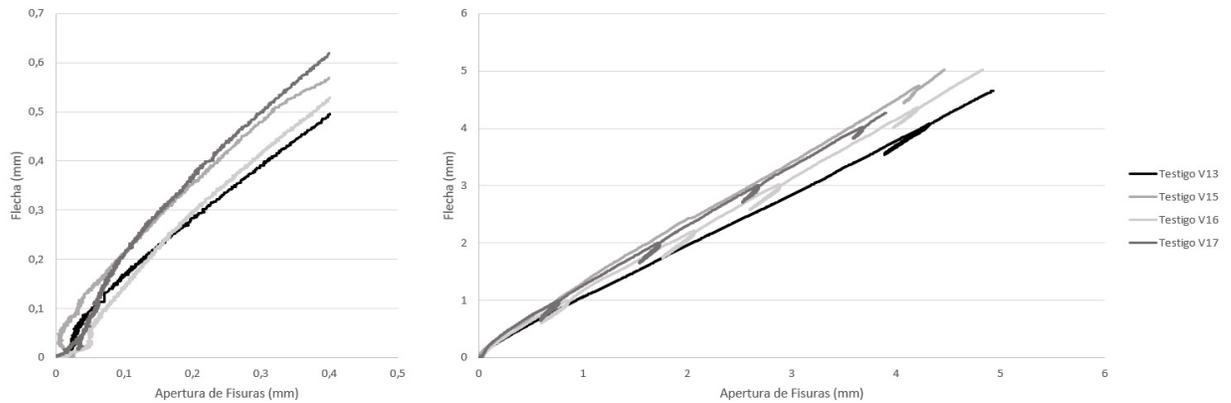


Figura 3–11 Relación flecha - apertura de fisura en testigos ensayados.

Testigo	Recta	R^2
V13	$y = 0.9122x + 0.1050$	0.9994
V15	$y = 1.0732x + 0.1696$	0.9988
V16	$y = 1.0079x + 0.0816$	0.9985
V16	$y = 1.0507x + 0.1448$	0.9980

Tabla 3–1 Línea de tendencia y coeficiente R^2 .

3.3.3 Relación tensión - apertura de fisura

Con el objetivo de comparar posteriormente los resultados obtenidos mediante el ensayo de los testigos a flexión y los resultados obtenidos mediante el ensayo MVD, se procede a trabajar con la relación existente entre las tensiones residuales y la apertura de fisuras.

En la Figura 3–12 se observa la relación entre la tensión residual del testigo en la sección media, calculada como se indica en la Sección 2.1 y la apertura de fisura. Se muestra también una ampliación de la gráfica en el tramo inicial.

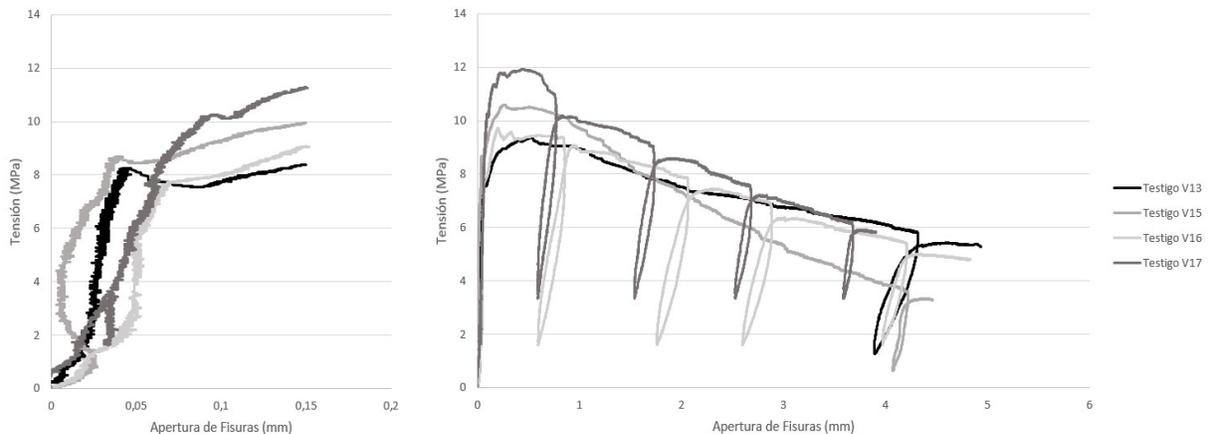


Figura 3–12 Relación tensión - apertura de fisura de los testigos ensayados.

3.4 Conclusiones

Los testigos ensayados presentaron el comportamiento típico del HRFA con endurecimiento, presentando: un primer tramo elástico - lineal hasta la aparición de la primera fisura; un segundo tramo de endurecimiento hasta llegar a la carga máxima que el testigo es capaz de soportar; y un último tramo de ablandamiento durante el cual el testigo pierde rigidez debido a la fisuración del mismo.

Al realizar ciclos de carga y descarga, se observa que el comportamiento de los testigos es aproximadamente lineal hasta retomar la antigua curva de carga. También se observa que existe, en la descarga de los mismos, un desplazamiento residual.

4 Ensayo Montevideo

4.1 Introducción

El ensayo Montevideo (MVD) es una alternativa más sencilla que el ensayo a flexión de vigas para caracterizar el comportamiento a tracción del HRF (Segura-Castillo et al., 2018). El mismo consiste en ensayar probetas de pequeñas dimensiones (cubos de 15 cm de lado), las cuales a su vez no conllevan una preparación dificultosa.

Anterior al ensayo MVD, como se explica en (Cañette et al., 2017), se han desarrollado diversos ensayos compactos como el ensayo DEWS (Double Edge Wedge Splitting Test), el ensayo WST (Wedge Splitting Test) y el ensayo Barcelona (BCN). Los mismos se establecen como precedentes para el desarrollo del ensayo MVD.

En el año 2016 se realizaron los primeros ensayos MVD en la Universidad de San Pablo (Segura-Castillo et al., 2017), mientras que en Uruguay se comenzó en 2017 (Cañette et al., 2017). Desde ese momento se ha buscado encontrar el factor de correlación entre las fuerzas residuales del ensayo MVD y el ensayo de viga. En un nuevo estudio (Segura-Castillo et al., 2022), se concluye que dicho factor de correlación corresponde a 1,35.

En otra investigación (Segura-Castillo et al., 2018) se halló la correlación entre el desplazamiento del pistón de la prensa y la apertura de fisura para HRFA con ablandamiento, algo que permite prescindir del LVDT para saber el ancho de fisura. Este resultado simplifica aún más el ensayo MVD en caso de que el material sea HRFA con ablandamiento.

4.2 Objetivos

Verificar el factor de correlación de 1,35 entre ensayo a flexión y ensayo Montevideo (MVD) en testigos extraídos.

Proponer una función que vincule el desplazamiento del pistón de la prensa con la apertura de fisura (CTOD) para HRFA con endurecimiento.

4.3 Descripción del ensayo

El ensayo MVD consiste en aplicar una tracción indirecta a la pieza. Para ello se realiza una entalla a los testigos de forma tal que la altura útil (h_{sp}) sea 12.5 ± 0.1 cm. En la Figura 4-1 se pueden ver las dimensiones de la cuña y un testigo preparado para ensayar. Sobre la cuña se introduce la fuerza de la prensa y la misma la transmite al testigo. El apoyo inferior del testigo se coloca en la sección media (sección en la cual se encuentra la entalla y en la misma dirección que esta). Para reducir y uniformizar la fricción entre la cuña y el testigo, se colocan chapas metálicas con masilla en los bordes de la entalla y se aceita la cuña, las mismas también sirven para reducir el daño localizado que se produce en la entalla.

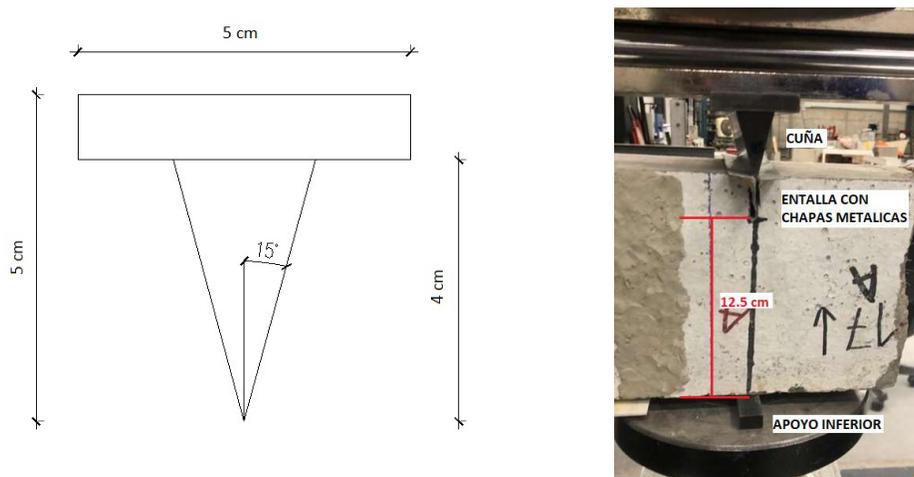


Figura 4-1 Geometría de la cuña metálica (izq.) Testigo preparada para el ensayo MVD (der.)

Luego de finalizada la preparación del testigo, se realiza el ensayo en una prensa de desplazamiento controlado. En este caso la velocidad del pistón por la cual se opta es de 0.5 mm/min (González et al., 2020). El ensayo se da por finalizado cuando la apertura de fisura es de 4 mm. Luego, se retira el LVDT y se procede a partir el testigo para poder realizar el conteo de fibras en las caras.

En la Figura 4-2 se puede ver la posición del LVDT en el ensayo. El mismo se coloca sujeto a la altura de la garganta para medir el CTOD.



Figura 4-2 Posición de LVDT en ensayo MVD.

4.4 Descripción de la muestra y metodología de ensayo en testigos de vigas

Los testigos obtenidos de la losa elevada, como se observa en la Figura 3-1, tienen una numeración del 1 al 17. Luego del ensayo a flexión se nombró cada mitad con las letras A y B, y después, al romper cada mitad se numera cada parte como 1, 2 y 3, contando desde el centro hacia el borde. La nomenclatura de un testigo puede ser 14-A-1 como se observa en la Figura 4-3. Si se realiza el ensayo MVD entre las partes 14-A-2 y 14-A-3, se le llama ensayo MVD viga 14-A-23 para que no haya confusiones a la hora de analizar los resultados.

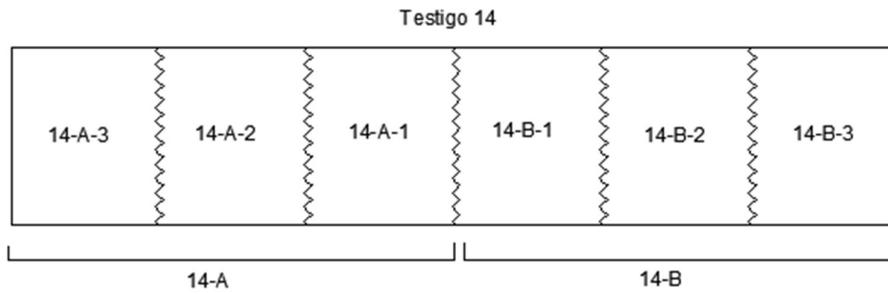


Figura 4-3 Nomenclatura de testigos.

Los ensayos fueron realizados en el laboratorio del Instituto de Estructuras de la Facultad de Ingeniería (IET), el cual cuenta con una prensa que posibilita realizar los mismos mediante desplazamiento controlado.

4.5 Testigos de vigas extraídas en losa experimental

Se presentan en la Tabla 4-1 los valores de altura promedio (h), altura promedio en la sección entallada (h_{sp}) y ancho (b) de las probetas, que hacen referencias a los valores de la Figura 4-4.

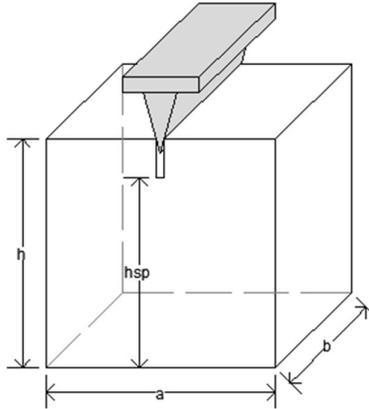


Figura 4-4 Geometría ensayo MVD.

Probeta	h (cm)	h_{sp} (cm)	b (cm)
V1-A-23	14,25	12,40	13,7
V2-A-23	15,25	12,25	14
V3-A-12	15,00	12,25	14
V4-A-12	15,05	12,45	13,6
V5-A-23	15,20	12,50	13,9
V6-A-12	15,00	12,40	13,9
V7-A-23	14,60	12,55	12,7
V8-A-23	15,15	12,35	12,4
V9-A-12	15,40	12,55	12,2
V10-A-12	14,65	12,55	12,5
V11-A-23	15,50	12,51	12,6
V12-A-12	15,25	12,55	12,5
V14-A-12	15,15	12,50	12,3
V17-A-12	12,20	12,40	15,1

Tabla 4-1 Dimensiones de testigos.

4.5.1 Análisis de resultados ensayo MVD en testigos extraídos con forma de viga

En la Figura 4-5 se observa la curva Tensión – CMOD obtenida mediante el ensayo MVD realizado a los testigos.

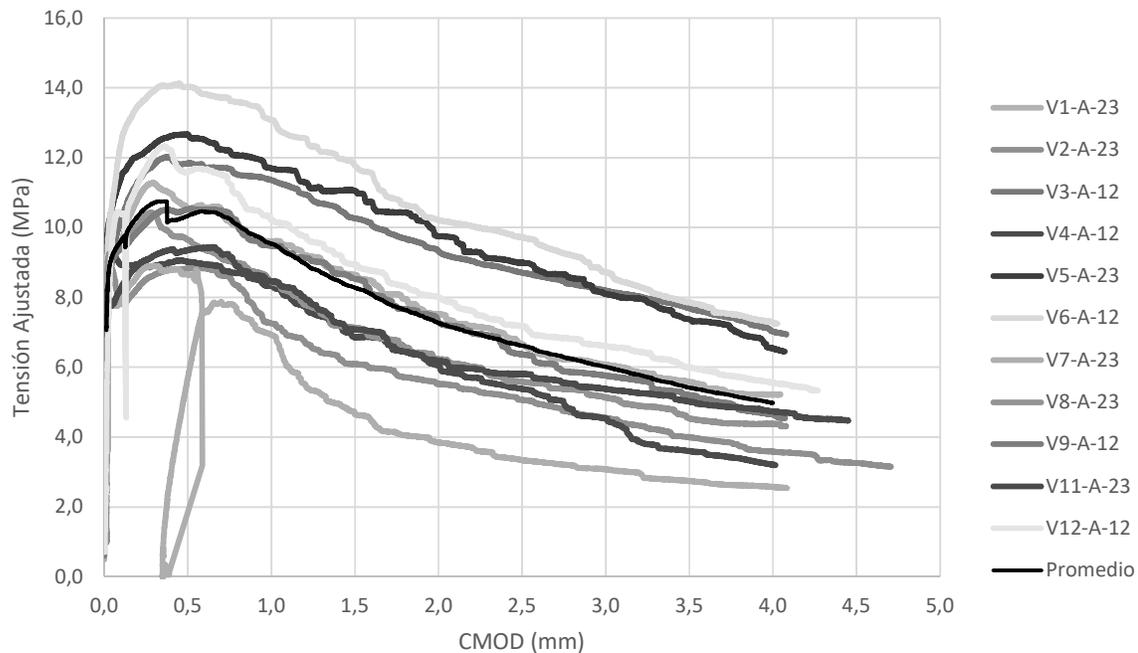


Figura 4-5 Relación Tensión - CMOD para testigos, ensayo MVD.

En la Tabla 4–2 se muestra para cada testigo el valor de fuerza correspondiente a la aparición de la primera fisura (F_{LOP}), $CMOD_1$ (0.5 mm), $CMOD_2$ (1.5 mm), $CMOD_3$ (2.5 mm) y $CMOD_4$ (3.5 mm). También se muestra el valor medio de las fuerzas, su desviación estándar y el coeficiente de variación (CV).

Testigo	Fuerza (kN)				
	F_{LOP}	$CMOD_1$	$CMOD_2$	$CMOD_3$	$CMOD_4$
V1-A-23	17,3	23,04	18,94	14,59	12,24
V2-A-23	17,5	18,03	12,43	10,33	8,16
V3-A-12	18,37	24,55	21,28	18,06	15,95
V4-A-12	19,54	18,72	14,23	11,16	7,49
V5-A-23	19,2	26,80	23,38	19,07	15,59
V6-A-12	17,91	29,59	24,87	20,50	16,58
V7-A-23	14,27	11,50	9,45	6,79	5,56
V8-A-23	17,06	17,85	13,21	10,31	8,41
V9-A-12	15,57	19,44	15,77	11,77	9,63
V10-A-12	-	26,04	19,12	15,18	12,05
V11-A-23	15,1	17,63	13,35	10,94	9,47
V12-A-12	19,86	22,15	17,11	13,75	11,48
Promedio	16,84	21,28	16,93	13,54	11,05
Desv. Est.	2,23	5,03	4,71	4,10	3,57
CV	13,3%	24%	28%	30%	32%

Tabla 4–2 Comparación de resultados, ensayo MVD.

Se observa que los valores del coeficiente de variación (CV) obtenidos para los CMOD son bastante elevados, dicho coeficiente se hace más grande a medida que se aumenta el CMOD

considerado. Dichos resultados se encuentran bastante alejados de los obtenidos por (Segura-Castillo et al., 2017) (9% para $CMOD = 0.5 \text{ mm}$ y 23% para $CMOD = 2.5 \text{ mm}$). La dispersión tan grande de los resultados puede deberse a que en el presente trabajo se utilizaron testigos extraídos de una losa, mientras que en (Segura-Castillo et al., 2017) se utilizaron probetas. Esto implica que las fibras se distribuyan de forma más aleatoria. A su vez, los testigos extraídos tienen diferentes dimensiones, lo que influye directamente en esta variación. Por estos motivos, para la comparación que se realiza en la sección 4.8, se utilizan valores normalizados de tensión.

4.6 Testigos circulares extraídos de losa experimental

4.6.1 Procedimiento de extracción en testigos circulares

En la Figura 4-6 se muestra un esquema de dónde se sacaron los testigos circulares y el eje de coordenadas tomado. Se extrajeron de dos zonas, donde se verificó que las mismas no estuvieran afectadas por fisuras u otras afecciones preexistentes en la losa. En la cara superior de cada uno de los testigos se referenció el número de testigo y una flecha señalando hacia el cartel de referencia, para saber la posición y rotación original en la losa. En la Tabla 4–3 se muestran las coordenadas (X_G E Y_G) que referencia el centro de gravedad de los testigos extraídos. Los mismos fueron extraídos con una perforadora de hormigón de 10 pulgadas.

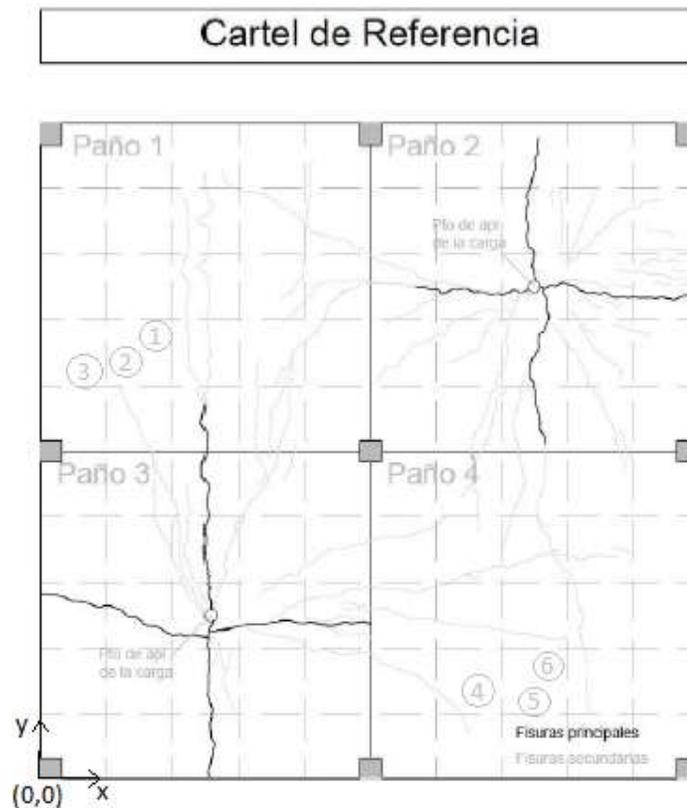


Figura 4-6 Esquema de ubicación de los testigos extraídos

Testigo	X_G (m)	Y_G (m)
1	1,07	4,18
2	0,76	3,97
3	0,40	3,90
4	4,10	1,15
5	4,62	1,07
6	4,59	1,70

Tabla 4–3 Coordenadas de testigos extraídos

En la Tabla 4-4 se muestran las dimensiones de los testigos. Se decide realizar 3 medidas de diámetros y alturas en diferentes secciones y un promedio de las mismas. El testigo 5 y 6 tiene en la cara inferior un escalón por las piezas del encofrado en desnivel, como se ve en Figura 4-7.

Testigo	1	2	3	4	5	6
D ₁ (cm)	24,10	24,20	24,30	24,40	24,10	24,10
D ₂ (cm)	24,10	24,10	24,20	24,50	24,10	24,10
D ₃ (cm)	24,10	24,10	24,20	24,40	24,20	24,10
D _{prom} (cm)	24,10	24,13	24,23	24,43	24,13	24,10
h ₁ (cm)	13,50	13,20	13,10	12,60	12,90	13,40
h ₂ (cm)	13,70	13,40	13,10	12,60	12,80	13,40
h ₃ (cm)	13,60	13,30	13,10	12,70	12,90	12,80
h _{prom} (cm)	13,60	13,30	13,10	12,63	12,87	13,20

Tabla 4-4 Medidas geométricas de los testigos extraídos



Figura 4-7 Defectos en testigos 6 y 5, cara inferior

4.6.2 Preparación del testigo para el ensayo en testigos circulares

Para cada testigo se realizó el ensayo inductivo que se explica en la sección 5.5. Luego de realizado este ensayo y analizados los resultados, se determinó cuál es la dirección preferencial de las fibras en cada testigo. En base a estos resultados se determinaron las direcciones en las cuales se realizaría el ensayo Montevideo para analizar la resistencia a flexión de los mismos. El análisis se encuentra desarrollado en el capítulo 5.

Con la dirección a la que se quiere realizar el ensayo, se procede a preparar los testigos cómo se puede ver en la Figura 4-8. La preparación consiste en realizar dos cortes paralelos a la dirección preferencial, equidistantes del centro, tal que la pieza tenga una altura de 15 centímetros, que se verifica con un calibre. Esto se realizó con una sierra para cortar hormigón como se puede ver en la Figura 4-9. Se tomó especial atención para que la medida del testigo tenga una precisión milimétrica y, con este fin, se realizó un pulido de las superficies como se puede ver en la Figura 4-10. Una vez finalizado el pulido se procedió a realizar la entalla. La misma se realizó en el centro de una de las caras cortadas del testigo y con una profundidad adecuada.

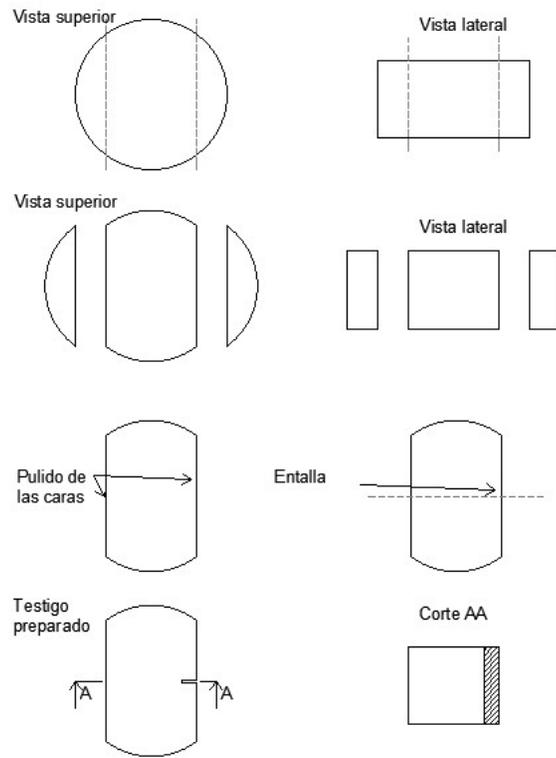


Figura 4-8 Procedimiento de preparación testigo circulares.

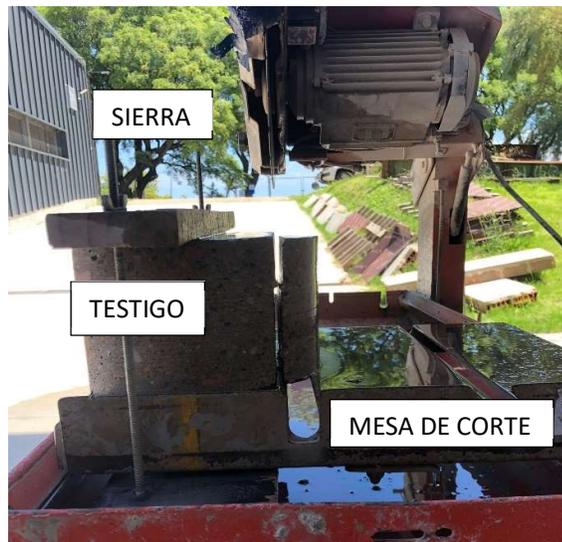


Figura 4-9 Mesa de corte para testigos extraídos



Figura 4-10 Pulidora para testigo extraído

En la Tabla 4–5, se presentan las medidas geométricas finales de los testigos diferenciando cara superior e inferior de la losa de donde fue extraída, con las mismas referencias de la Figura 4-4. Se puede notar en la misma que en este caso las medidas son muy similares, por lo que los testigos para ensayar quedaron con una gran precisión en las dimensiones.

Testigo	h_{sup} (cm)	h_{inf} (cm)	h_{sp_sup} (cm)	h_{sp_inf} (cm)	b (cm)
1	14,79	15,00	12,60	12,60	13,60
2	15,04	15,00	12,60	12,70	13,20
3	15,04	15,01	12,60	12,57	13,10
4	15,00	14,96	12,60	12,50	12,70
5	15,00	14,97	12,50	12,60	12,70
6	15,00	15,00	12,50	12,60	12,96

Tabla 4–5 Altura total y útil de testigos extraídos para ensayo MVD

4.6.3 Análisis de resultados en testigos circulares

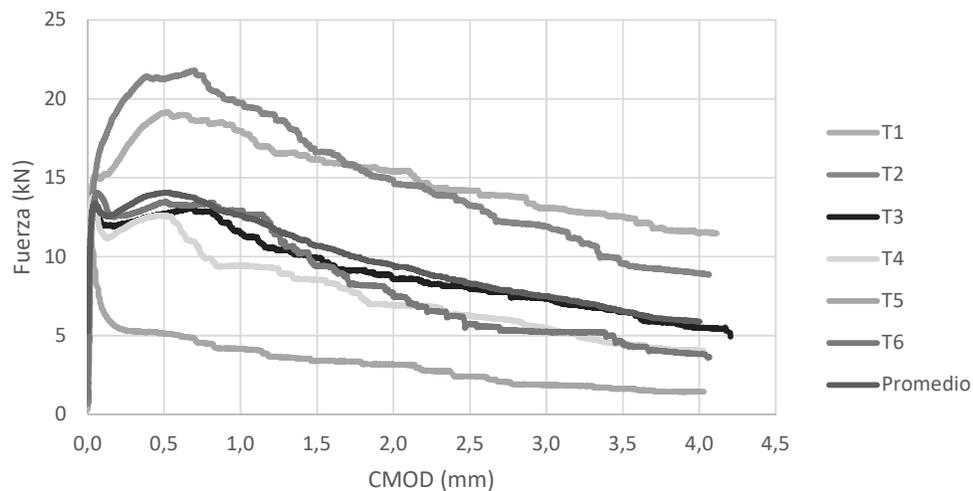


Figura 4-11 Gráfica Fuerza-CMOD para testigos circulares

Como se puede ver en la Figura 4-11 el comportamiento de los testigos circulares es típico de HRFA. Se puede ver la gran variabilidad de los resultados. Se observa que el testigo 5, es el que presenta la menor resistencia, esto se puede explicar ya que tiene un 40% menos de fibras que el promedio de fibras totales contabilizadas. (Ver en anexo, sección 9.1)

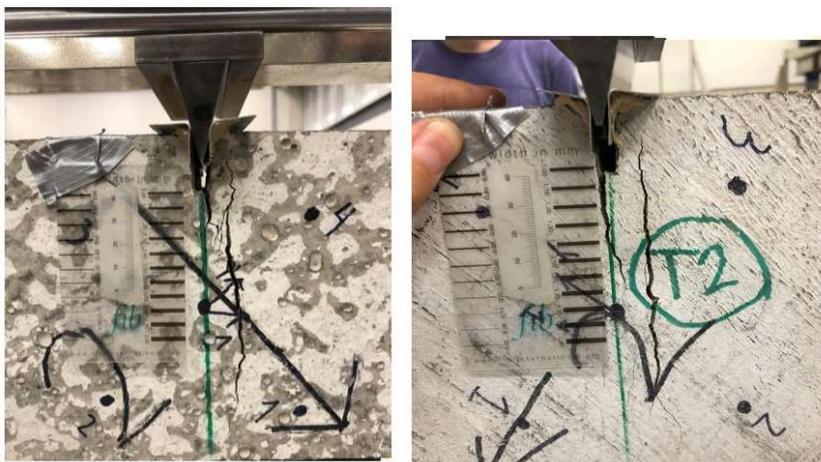


Figura 4-12 Rotura Testigo 2. Izq.: Cara superior de losa. Der.: Cara inferior de losa.

En la Figura 4-12 vemos el tipo de rotura en cada una de las caras. Tanto en la cara superior como inferior se obtiene una rotura con múltiple fisuración típica de cuando es HRFA con endurecimiento.

4.6.4 Conclusiones de ensayo MVD de testigos circulares

En la Tabla 4-6, se puede observar los resultados de todos los ensayos MVD. En este caso, al estar comparando ensayos MVD donde los testigos son circulares, las muestras tienen distintas secciones, se normalizan y se comparan las tensiones obtenidas en $CMOD_i$. Podemos ver que los promedios de los testigos circulares son menores a los testigos de vigas, entre un 34% y un 42%. No tenemos una hipótesis de por qué sucede esto.

CMOD (mm)	0,5	1,5	2,5	3,5
Promedio Total (MPa)	8,58	6,73	5,32	4,29
Promedio testigos viga (MPa)	10,33	8,28	6,62	5,42
Promedio testigos circulares (MPa)	6,83	5,18	4,02	3,16
Diferencia entre promedios	34%	37%	39%	42%

Tabla 4-6 Resultados de ensayos MVD

4.7 Relación entre desplazamiento de la cuña y CTOD

En esta sección se busca encontrar una relación para HRFA con endurecimiento entre el desplazamiento del pistón y la apertura de fisura para el ensayo MVD. Esto permitiría simplificar enormemente el ensayo MVD ya que no sería necesario el uso de un LVDT para medir la apertura de fisura en la garganta de la hendidura (CTOD). Recordemos que a partir de los datos de CTOD podemos obtener los datos de CMOD y que con estos se obtienen las fuerzas (f_{R1} y f_{R3}) que se utilizarán para realizar los cálculos en estructuras.

En la Figura 4-13 se puede ver en negro la gráfica de Fuerza - Desplazamiento del pistón y en gris claro la gráfica Fuerza - CTOD medido con LVDT. Esta pieza tiene rotura con endurecimiento (aumenta la fuerza resistente luego de la primera fisura) y se pueden identificar 3 tramos. El tramo 1, que va entre 0 y δ_0 , siendo δ_0 el desplazamiento del pistón cuando el testigo comienza a fisurar, corresponde a la del testigo sin fisurar, el cual se comporta de forma elástica y, donde se puede ver que el LVDT mide valores despreciables. En el tramo 2, que está entre δ_0 y δ^* , siendo δ^* el desplazamiento del pistón cuando el testigo alcanza su máxima resistencia, el mismo pierde rigidez y

se puede apreciar visualmente la fisuración, pero sigue aumentando la fuerza resistente y la medida de LVDT comienza a ser apreciable. Por último, en el tramo 3, que es a partir de δ^* , el testigo ya llegó a su fuerza resistente máxima y está totalmente fisurado, comportándose como dos piezas rígidas y, comienza a perder resistencia mientras que la medida de LVDT sigue aumentando de forma lineal.

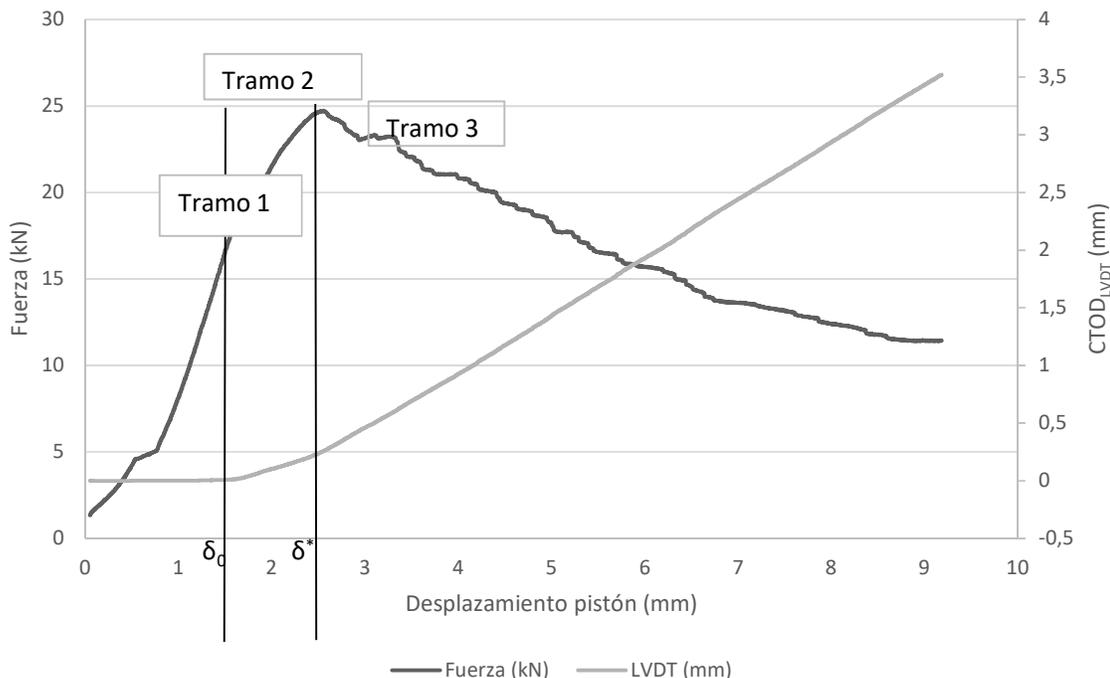


Figura 4-13 Gráfica Fuerza-Desplazamiento Pistón y en eje secundario Desplazamiento LVDT- Desplazamiento de pistón

Con los tres tramos definidos resta hallar la función que gobierna cada uno de los tramos. Se busca entonces una función por partes en cada tramo.

El primer desafío a resolver es encontrar los valores de δ_0 y δ^* que nos limitan cada tramo. Para resolver este problema se realizó la derivada de la función Fuerza- Desplazamiento del pistón. Con esto podemos ver los cambios de pendiente y ver si hay relación entre los puntos donde hay grandes variaciones de las pendientes y los valores de δ_0 y δ^* , que es algo que observando el gráfico parece cumplirse.

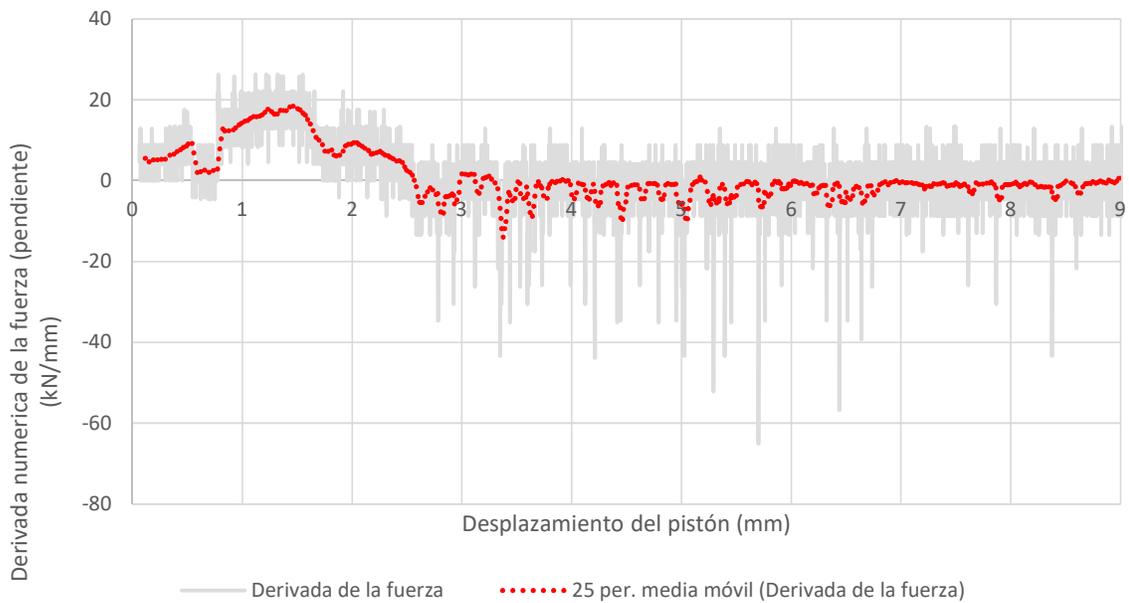


Figura 4-14 Gráfico de derivada función Fuerza-Desplazamiento del Pistón- y media móvil de 25 períodos.

Como se puede ver en la Figura 4-14, la función derivada tiene demasiada variación por lo que se decide hacer una media móvil de 25 períodos para ver con mejor claridad la tendencia de los datos. El tramo 2 es el que interesa analizar, por lo tanto, se hace una gráfica únicamente de ese intervalo.

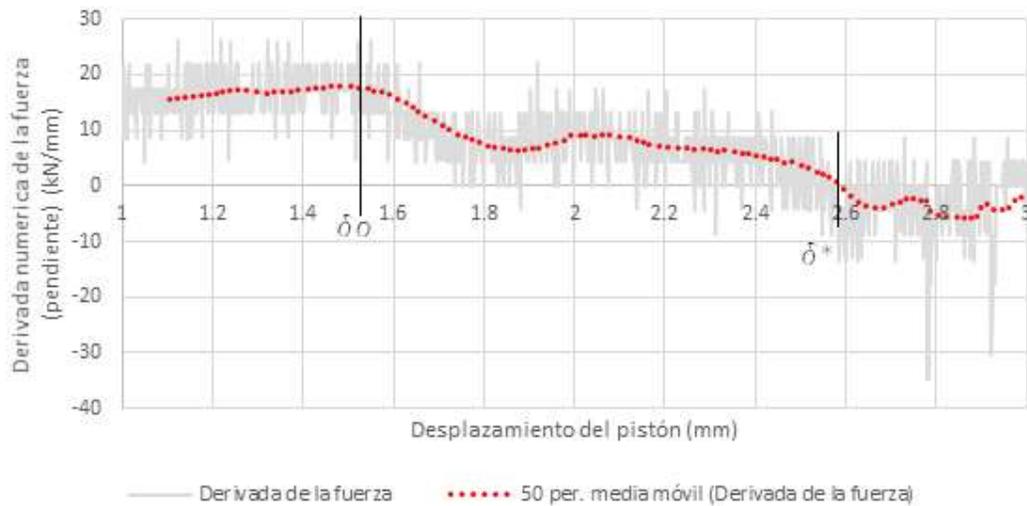


Figura 4-15 Gráfico derivada Fuerza-Desplazamiento del pistón y media móvil de 50 períodos.

En este caso se eligió una media móvil de 50 períodos que nos da una curva más suave. En la Figura 4-15 se puede ver la parte del gráfico dónde podemos obtener δ_0 y δ^* . Por el gráfico de la Figura 4-13 sabemos que δ_0 está en el entorno de 1.5 mm y δ^* está en el entorno de 2.5 mm. El valor de δ_0 se toma en el inicio de la caída de pendiente en el gráfico de la media móvil de la pendiente de forma visual. En este caso se tomó, $\delta_0 = 1.52$ mm. Luego, el cambio de pendiente de positiva a negativa indica que el testigo alcanzó su máxima fuerza y comienza a perder resistencia. Cómo se puede apreciar este punto es 2.57 mm teniendo por tanto el valor de δ^* .

Con estos dos valores se comienza a armar la función que gobierna la función CTOD-Desplazamiento del pistón. Como se puede ver en la Figura 4-13 el primer tramo, hasta δ_0 la misma tiene valores despreciables y, por lo tanto, la tomamos como 0. Resta resolver los siguientes 2 tramos.

Para el tramo 2, teniendo en cuenta que los principios físicos asociados al endurecimiento son variados y difíciles de cuantificar, se opta por una solución matemática de carácter empírico. Esta solución es aproximar el tramo 2 mediante un polinomio de segundo grado de manera arbitraria. Para hallar este polinomio se impone una pendiente lineal entre la pendiente del tramo 1 y la pendiente del tramo 3, la cual se toma como constante teniendo en cuenta otra investigación como veremos más adelante. Como se puede ver en la Figura 4-16 el tramo 1 tiene pendiente 0, el tramo 3 tiene una pendiente m_2 , siendo m_2 la constante que se halló en (Segura-Castillo et al., 2018). La pendiente del tramo 2 es la interpolación lineal de las pendientes del tramo 1 y del tramo 3.

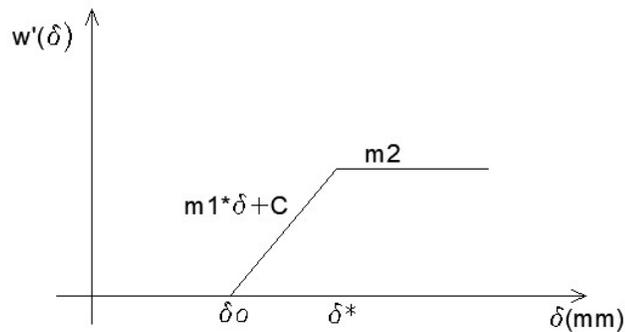


Figura 4-16 Gráficos de pendientes del CTOD estimado.

Asumiendo que:

$$\text{si } \delta_0 < \delta < \delta^*, \quad w'(\delta) = m_1 \times \delta + C_1 \quad (4-1)$$

Y también que:

$$w'(\delta_0) = 0 \quad (4-2)$$

$$w'(\delta^*) = m_2 \quad (4-3)$$

Se llega a que:

$$C_1 = -m_1 \times \delta_0 \quad (4-4)$$

$$m_1 = \frac{m_2}{\delta^* - \delta_0} \quad (4-5)$$

Cómo resultado se tiene que:

$$\text{si } \delta_0 < \delta < \delta^*, \quad w'(\delta) = \frac{m_2}{\delta^* - \delta_0} \times (\delta - \delta_0) \quad (4-6)$$

Integrando esta ecuación para obtener el polinomio se tiene que:

$$\text{si } \delta_0 < \delta < \delta^*, \quad w(\delta) = \frac{m_2}{\delta^* - \delta_0} \times \left(\frac{\delta^2}{2} - \delta\delta_0 \right) + C_2 \quad (4-7)$$

Y sabiendo que:

$$w(\delta_0) = 0 \quad (4-8)$$

Se llega a que:

$$C2 = \frac{m2}{\delta^* - \delta_0} \times \frac{\delta^2}{2} \quad (4-9)$$

Con lo cual se obtiene la función matemática de aproximación del CTOD a partir del desplazamiento de la cuña entre δ_0 y δ^* .

Haciendo cuentas:

$$\text{si } \delta_0 < \delta < \delta^*, \quad w(\delta) = \frac{m2}{2 * (\delta^* - \delta_0)} \times (\delta - \delta_0)^2 \quad (4-10)$$

Siendo:

$$m2 = 2 \times \frac{h_{sp}}{h} \times \tan \alpha \quad (4-11)$$

Se comienza a resolver tramo 3, luego de que el testigo alcanzó su fuerza máxima y comienza a descender. El inicio del tramo está dado por δ^* y termina cuando acaba el ensayo. En primer lugar, se tiene en cuenta otra investigación en la que se encuentra esta relación entre desplazamiento del pistón y el CTOD, pero, en un HRFA con ablandamiento.

Según (Segura-Castillo et al., 2018) se puede establecer una relación entre el CMOD (o CTOD) y el desplazamiento de la cuña al considerarse las siguientes hipótesis:

- Después de la fisuración, se forma una única fisura extendiéndose desde la punta inferior de la entalla hasta el apoyo de la probeta, y dividiendo así a la misma en dos mitades que giran comportándose como cuerpos rígidos.

- La rotación de ambas partes generadas luego de fisurada la probeta es pequeña.

Se obtienen por lo tanto las siguientes expresiones:

$$W_M = 2. \delta. \tan \alpha \quad (4-12)$$

$$W_T = \frac{h_{sp}}{h} W_M \quad (4-13)$$

$$\rightarrow W_T = 2. \delta. \frac{h_{sp}}{h} \tan \alpha \quad (4-14)$$

Donde:

$\alpha = 15^\circ$ es el ángulo que forma la cuña con la vertical, representado en la Figura 4-1.

δ es el desplazamiento vertical de la cuña.

h y h_{sp} son la altura y la altura útil en la entalla, cuyos valores se encuentran en la Figura 4-7

W_M es el CMOD.

W_T es el CTOD.

En la Figura 4-17 se observa la curva fuerza – CTOD obtenida en el ensayo del testigo V1-A-23, adicionalmente, en la misma figura se observa la curva fuerza – CTOD obtenida mediante la ecuación descrita anteriormente. Se observa que la gráfica está corregida para que el punto donde se da la fuerza máxima (momento en el que fisura el testigo) coincida con una apertura de fisura nula.

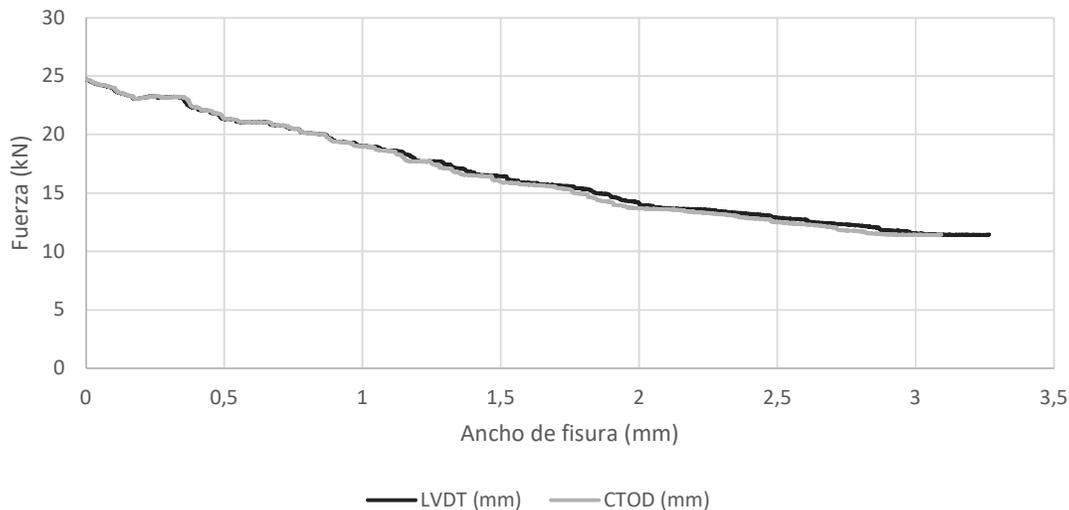


Figura 4-17 Relación Fuerza - CTOD para el testigo V1-A-21

Se observa en la gráfica anterior que efectivamente, luego de que se produce la fisura del testigo, existe una relación entre el desplazamiento de la cuña y la apertura de fisura. Por lo tanto, dicho ensayo podría realizarse sin la utilización de medidores externos.

En la Tabla 4-7 se muestra el resultado de f_{R1} y f_{R3} obtenidos tomando el CTOD medido con LVDT y el CTOD estimado mediante la ecuación (4-14). Se observa que la diferencia entre el CTOD medido con el LVDT y el CTOD calculado mediante el desplazamiento de la cuña es prácticamente nula para aperturas de fisura pequeñas (menores que 0.5 mm) y aumenta a medida que se consideran aperturas de fisura mayores. Por lo tanto, en el tramo 3 podemos utilizar esta función para nuestra estimación. Cabe destacar que para realizar esta comparación no se tomaron en cuenta los resultados obtenidos del testigo V7-A-23 ya que en el ensayo del mismo se decidió realizar un ciclo de carga y descarga.

Testigo	V1-A-23	V2-A-23	V3-A-12	V4-A-12	V5-A-23	V6-A-12	V8-A-23	V9-A-12	V10-A-12	V11-A-23	V12-A-12
h (cm)	14,25	15,25	15,00	15,05	15,20	15,00	15,15	15,40	14,65	15,50	15,25
h_{sp} (cm)	12,40	12,25	12,25	12,45	12,50	12,40	12,35	12,55	12,55	12,51	12,55
CTOD 1 (mm)	0,44	0,40	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,43	0,40	0,41
F (kN)	22,04	14,33	23,79	18,70	24,81	28,07	16,63	17,53	22,43	15,40	20,15
F estimada (kN)	22,04	14,08	23,76	18,63	24,80	28,38	16,20	17,50	21,03	15,29	20,11
Error (%)	0,00	1,77	0,16	0,41	0,04	1,11	2,61	0,16	6,22	0,73	0,19
CTOD 3 (mm)	2,18	2,01	2,04	2,07	2,06	2,07	2,04	2,04	2,14	2,02	2,06
F (kN)	13,64	9,07	17,24	11,13	17,26	18,69	9,95	10,61	13,38	9,98	12,86
F estimada (kN)	13,44	8,48	16,42	9,61	16,94	17,82	9,37	10,32	11,53	9,94	12,59
Error (%)	1,45	6,45	4,76	13,72	1,85	4,69	5,78	2,67	13,81	0,47	2,13

Tabla 4-7 Comparación de resultados.

Para culminar con la función por partes nos resta hallar el término independiente de la función del tercer tramo. Esto lo haremos igualando la apertura de fisura en δ^* .

Entonces:

$$w(\delta^*) = \frac{m2}{2 * (\delta^* - \delta_0)} * (\delta^* - \delta_0)^2 = m2 * \delta^* + C3 \tag{4-15}$$

Por lo que:

$$C3 = m2 * \left(\frac{(\delta^* - \delta_0)}{2} - \delta^* \right) \quad (4-16)$$

Por lo tanto:

$$si \delta > \delta^*, \quad w(\delta) = m2 * \left(\delta + \frac{(\delta^* - \delta_0)}{2} - \delta^* \right) \quad (4-17)$$

Con este resultado podemos armar nuestra función por partes.

$$w(\delta) = \begin{cases} 0; & si \ 0 < \delta \leq \delta_0 \\ \frac{m2}{2 * (\delta^* - \delta_0)} * (\delta - \delta_0)^2; & si \ \delta_0 < \delta \leq \delta^* \\ m2 * \left(\delta + \frac{(\delta^* - \delta_0)}{2} - \delta^* \right); & si \ \delta \geq \delta^* \end{cases} \quad (4-18)$$

En la Figura 4-18 se puede ver el gráfico dónde se comparan los resultados obtenidos mediante la medición directa del CTOD mediante LVDT y el resultado de graficar con la función $w(\delta)$ para el testigo V1-A-23.

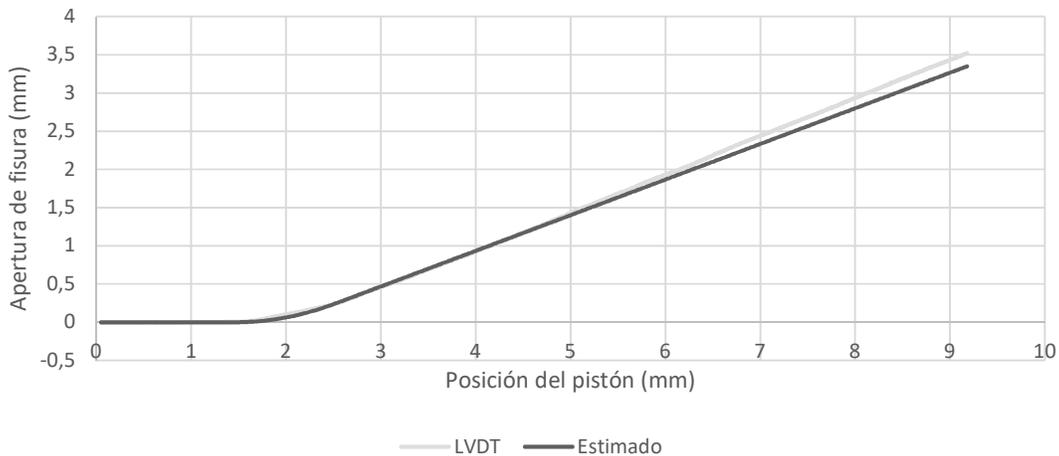


Figura 4-18 Gráfico CTOD medido con LVDT vs. CTOD estimado Testigo V1-A-23.

Considerando una relación lineal, se pasaron los resultados del CTOD medido con LVDT y el estimado, a valores de CMOD, mediante la fórmula:

$$CMOD = \frac{h}{hsp} \times CTOD \quad (4-19)$$

Con estos valores se realizaron los gráficos que se pueden ver en la Figura 4-19, que representan la fuerza de la prensa en relación con CMOD medido con LVDT y la fuerza en relación con el CMOD estimado.

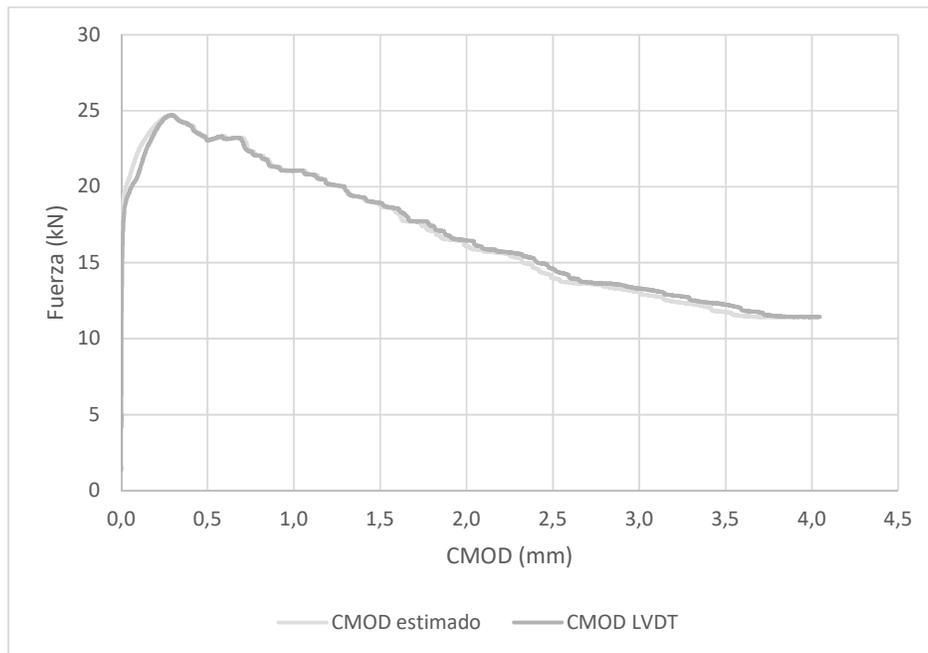


Figura 4-19 Gráfico Fuerza-CMOD medido con LVDT vs. Fuerza-CMOD estimado.

En la Tabla 4–8 y Tabla 4–9 se pueden ver los resultados de la comparación del desplazamiento del pistón, para los $CMOD_i$ utilizados para el diseño estructural, medidos con LVDT y el estimado, en los testigos que presentaron endurecimiento. También se pueden ver los errores obtenidos en la estimación del desplazamiento del pistón en términos absolutos y relativos.

Testigo	CMOD ₁				CMOD ₂			
	Desp. pistón-CTOD LVDT (mm)	Desp. Pistón-CTOD Estimado (mm)	Error abs. (mm)	Error relativo (%)	Desp. Pistón-CTOD LVDT (mm)	Desp. Pistón-CTOD Estimado (mm)	Error abs. (mm)	Error relativo (%)
V1-A-23	2.94	2.93	0.02	0.6%	4.77	4.80	-0.03	-0.6%
V3-A-12	3.48	3.42	0.06	1.7%	5.14	5.29	-0.15	-2.9%
V5-A-23	3.62	3.86	-0.24	-6.7%	5.34	5.66	-0.31	-5.9%
V6-A-12	3.88	4.19	-0.31	-8.0%	5.17	5.38	-0.22	-4.2%
V8-A-23	2.57	2.85	-0.27	-10.7%	4.18	4.71	-0.52	-12.4%
V9-A-12	2.59	2.78	-0.19	-7.2%	4.29	4.64	-0.35	-8.1%
V10-A-12	3.06	3.05	0.01	0.3%	4.55	4.93	-0.38	-8.3%
T1	4.10	4.67	-0.57	-13.8%	5.96	6.42	-0.46	-7.6%
T2	3.87	3.53	0.34	8.8%	5.75	5.54	0.21	3.7%

Tabla 4–8 Comparación CMOD 1 y 2, medidos con LVDT vs. Estimados

Testigo	CMOD ₃				CMOD ₄			
	Desp. pistón-CTOD LVDT (mm)	Desp. Pistón-CTOD Estimado (mm)	Error abs. (mm)	Error relativo (%)	Desp. Pistón-CTOD LVDT (mm)	Desp. Pistón-CTOD Estimado (mm)	Error abs. (mm)	Error relativo (%)
V1-A-23	6.49	6.67	-0.18	-2.8%	8.22	8.53	-0.31	-3.7%
V3-A-12	6.66	7.16	-0.49	-7.4%	8.26	9.01	-0.75	-9.1%
V5-A-23	7.17	7.60	-0.43	-6.0%	8.88	9.33	-0.45	-5.1%
V6-A-12	6.85	7.41	-0.55	-8.1%	8.68	9.42	-0.74	-8.5%
V8-A-23	5.88	6.58	-0.70	-11.8%	7.62	8.44	-0.82	-10.8%
V9-A-12	6.00	6.50	-0.50	-8.3%	7.73	8.37	-0.64	-8.3%
V10-A-12	5.94	6.79	-0.85	-14.3%	7.31	8.65	-1.34	-18.4%
T1	7.39	8.01	-0.62	-8.4%	9.05	9.96	-0.92	-10.1%
T2	7.59	7.55	0.04	0.6%	9.39	9.52	-0.14	-1.4%

Tabla 4-9 Comparación CMOD 3 y 4, medidos con LVDT vs. Estimados

En la Tabla 4-10 se puede ver una comparación de los resultados de fuerzas residuales obtenidos mediante la medida de la apertura de fisura con LVDT contra las obtenidas con los CMOD estimados.

Testigo	F1-LVDT (kN)	F1-Est. (kN)	Error (%)	F2-LVDT (kN)	F2-Est. (kN)	Error (%)	F3-LVDT (kN)	F3-Est. (kN)	Error (%)	F4-LVDT (kN)	F4-Est. (kN)	Error (%)
V1-A-23	23.040	23.115	0.33%	18.939	18.751	-0.99%	14.593	13.952	-4.39%	12.236	11.756	-3.92%
V3-A-12	24.548	24.511	-0.15%	21.277	21.013	-1.24%	18.062	17.365	-3.86%	15.951	14.782	-7.33%
V5-A-23	26.801	26.349	-1.69%	23.379	22.126	-5.36%	19.071	18.326	-3.91%	15.593	14.744	-5.44%
V6-A-12	29.592	29.064	-1.78%	24.869	22.917	-7.85%	20.504	19.429	-5.24%	16.582	15.602	-5.91%
V8-A-23	17.846	17.110	-4.12%	13.207	12.123	-8.21%	10.313	9.635	-6.57%	8.409	8.098	-3.70%
V9-A-12	19.439	19.411	-0.14%	15.772	14.631	-7.23%	11.765	10.841	-7.85%	9.625	8.758	-9.01%
V10-A-12	26.038	26.160	0.47%	19.118	17.761	-7.10%	15.178	12.717	-16.21%	12.048	10.888	-9.63%
T1	19.109	18.449	-3.45%	16.158	15.649	-3.15%	14.188	13.179	-7.11%	12.538	11.605	-7.44%
T2	21.296	21.013	-1.33%	16.648	17.535	5.33%	13.273	13.405	0.99%	9.559	9.361	-2.07%

Tabla 4-10 Comparación de Fuerzas obtenidas con LVDT vs. Fuerzas con CTOD estimado.

Cómo se puede notar los errores en general son menores al 9%, excepto en el caso del testigo V10-A-12. La diferencia, en este caso, se puede deber a la forma de rotura, ya que, como se puede

ver en la Figura 4-20 el mismo no cumple con la hipótesis de romper con una única fisura que va desde la entalla hasta el apoyo inferior.



Figura 4-20 Rotura del testigo V10-A-12.

4.8 Correlación entre ensayo a Flexión y ensayo MVD

4.8.1 Antecedentes

La correlación entre el ensayo a flexión y el ensayo MVD está todavía en proceso por la novedad de este último. A continuación, se presentan dos investigaciones que proponen diferentes factores.

La primera aproximación la presenta Segura-Castillo (2017) asumiendo que en el momento de fisurarse la pieza se produce una única fisura y que su altura crece rápidamente hasta alcanzar la altura útil del testigo (para CMOD grande), los testigos pueden modelarse como dos cuerpos rígidos que giran en torno a la fibra en la cual se conectan (por lo tanto, la resultante de la fuerza de compresión se concentra en dicha fibra).

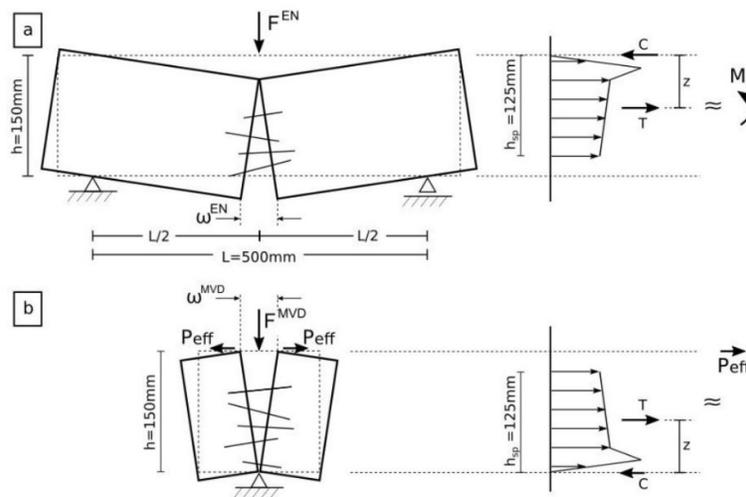


Figura 4-21 Diagramas de tensiones y fuerzas resultantes para a) ensayo de flexión de vigas y b) ensayo MVD. (Segura-Castillo et al., 2017).

Considerando válidas las hipótesis planteadas y considerando la sumatoria de momentos respecto al punto en el cual actúa la resultante de compresión, e igualando dicho término con el momento realizado por la fuerza externa que se aplica en el ensayo, se llega a las siguientes ecuaciones:

$$\sum M_C^{int} = \sum M_C^{ext} \rightarrow T \cdot z = F_{flexión} \cdot \frac{L}{4} \quad \text{para el ensayo de flexión de vigas.} \quad (4-20)$$

$$\sum M_C^{int} = \sum M_C^{ext} \rightarrow T.z = F_{MVD} \cdot h \cdot K_\mu \quad \text{para el ensayo MVD.} \quad (4-21)$$

Igualando ambas expresiones se obtiene que:

$$F_{flexión} = \frac{4 \cdot h \cdot K_\mu}{L} F_{MVD} \quad (4-22)$$

Donde:

- $h = 150$ mm es la altura de los testigos ensayados.
- $L = 500$ mm es el largo de las vigas ensayadas a flexión.
- $K_\mu = 1,5$ relación entre carga efectiva y real, obtenido experimentalmente (Segura-Castillo et al., 2017).

Sustituyendo dichos valores en la ecuación precedente se obtiene la siguiente relación entre ambos ensayos:

$$F_{flexión} = \frac{9}{5} \times F_{MVD}$$

En una reciente publicación (Segura-Castillo et al., 2022) se encuentra una relación entre el ensayo a flexión y el ensayo MVD de 1,35. En este caso el coeficiente se obtiene de forma empírica.

$$F_{flexión} = 1,35 \times F_{MVD}$$

En la presente investigación se tomará como referencia el último valor (1,35) ya que el mismo, al ser obtenido mediante la práctica, es más confiable.

4.8.2 Análisis de resultados

Los testigos extraídos de la losa tienen la problemática de que no tienen las mismas dimensiones y, por tanto, esto influye en los resultados de la fuerza resistente del material. Con el objetivo de normalizar los resultados obtenidos se realiza un análisis de los resultados en tensión.

Para pasar a tensión los resultados de los testigos a flexión se utiliza la fórmula propuesta por el Model Code 2010:

$$f_{r,j} = \frac{3F_j l}{2bh_{sp}^2} \quad (4-23)$$

Donde:

- $f_{r,j}$ (MPa) tensión residual correspondiente a $CMOD=CMOD_j$
- F_j (N) carga correspondiente a $CMOD=CMOD_j$
- l (mm) longitud del testigo.
- b (mm) ancho del testigo.
- h_{sp} (mm) distancia entre el tope de la entalla y la parte superior del testigo.

En esta ecuación se tiene como hipótesis un comportamiento lineal de la tensión.

Para normalizar los resultados de los ensayos MVD en testigos se tuvo en cuenta un factor de ajuste por la forma en la que se introduce la carga del ensayo. En este caso, la altura del testigo influye en el momento que se le aplica. Para tener en cuenta esto, se realiza una normalización a una altura de 15 centímetros, que es la altura de una probeta en condiciones normales.

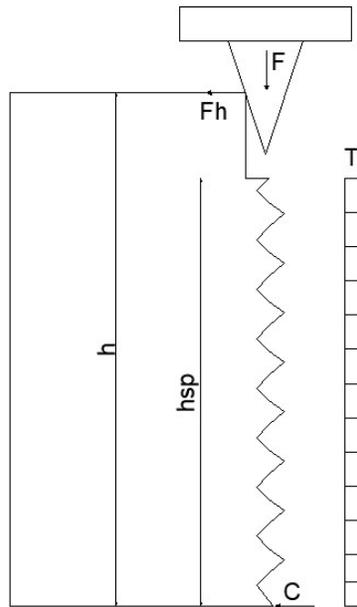


Figura 4-22 Hipótesis de esquema de tensiones en un ensayo MVD.

En la Figura 4-22 se puede ver el esquema considerado de tensiones para poder calcular el factor de normalización. Se pueden igualar el momento generado por las tensiones y el momento generado por las fuerzas:

$$M_{Fuerzas} = M_{Tensiones} \quad (4-24)$$

$$F_h \cdot h \cdot b = T \cdot h_{sp} \cdot \frac{h_{sp}}{2} \cdot b \quad (4-25)$$

Cómo se puede ver la altura del testigo hace variar el momento aplicado sobre el testigo. Por tanto, para hallar la fuerza normalizada en un testigo de 15 centímetros realizamos la siguiente operación:

$$F_{ensayo} \cdot h = F_{MVD} \cdot 15 \quad (4-26)$$

$$F_{ensayo} \cdot \frac{h}{15} = F_{MVD} \quad (4-27)$$

Siendo:

F_{ensayo} : la fuerza real obtenida por el ensayo.

F_{MVD} : la fuerza normalizada para una altura de 15 centímetros.

Luego de obtenida la fuerza normalizada, se realiza la conversión a tensión con la fórmula (4-23) propuesta por el Model Code 2010 para tener en cuenta la misma distribución de tensiones que tuvimos con los ensayos a flexión.

Finalmente, se multiplica el valor obtenido por de 1,35 (Segura-Castillo et al., 2022) y, se obtienen las tensiones del ensayo MVD ajustadas para poder ser comparadas con las de los ensayos a flexión.

En la Tabla 4-11, se muestran los resultados de los ensayos a flexión (positiva, negativa y media) en los testigos extraídos de la losa experimental, como el promedio de todos, y la desviación estándar. En la Figura 4-23, se puede ver graficada la tensión en función del CMOD.

Testigo	Tensión (MPa)			
	CMOD ₁	CMOD ₂	CMOD ₃	CMOD ₄
V13	9.33	8.12	7.18	6.42
V15	10.50	8.31	6.24	4.54
V16	9.39	8.46	7.27	5.99
V17	11.88	9.41	7.75	6.31
T1	9.02	6.32	5.14	4.24
T2	8.61	7.00	5.58	4.10
T3	9.32	7.76	6.42	5.34
T4	8.86	6.24	4.65	3.41
T5	9.62	6.03	4.61	3.48
T6	11.06	10.39	8.55	7.38
T7	7.26	4.87	2.64	1.91
T8	10.10	7.89	6.34	5.36
T9	10.30	7.32	5.58	4.23
T10	8.31	5.86	4.65	3.89
T11	9.38	8.53	7.35	5.93
T12	7.91	5.65	4.73	4.07
T14	7.53	4.71	3.21	2.49
Promedio	9.32	7.23	5.76	4.65
Desv. Est.	1.22	1.58	1.60	1.47
CV	13%	22%	28%	31%

Tabla 4-11 Resultados testigos a flexión en MPa.

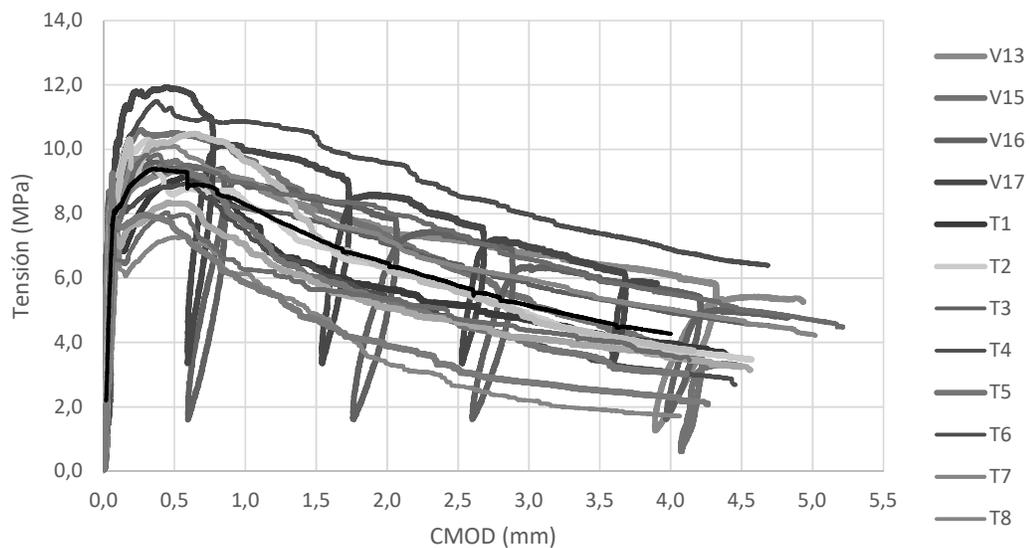


Figura 4-23 Gráfico Tensión-CMOD testigos a flexión.

En la Tabla 4-12, se muestran los resultados de los ensayos a flexión media en los testigos extraídos de la losa experimental, el promedio de todos, y la desviación estándar. En la Figura 4-24, se puede ver graficada la tensión en función del CMOD. El ensayo MVD ensaya a la pieza según su flexión media. Estos resultados se muestran de forma independiente ya que, los ensayos MVD fueron todos realizados evaluando la tensión media.

CMOD (mm)	Tensión (MPa)				Promedio	Desv. Est.	CV
	T2	T6	T8	T11			
0.5	8.61	11.06	10.10	9.38	9.79	1.05	11%
1.5	7.00	10.39	7.89	8.53	8.45	1.43	17%
2.5	5.58	8.55	6.34	7.35	6.96	1.29	19%
3.5	4.10	7.38	5.36	5.93	5.69	1.36	24%

Tabla 4-12 Resultados testigos a flexión media en MPa.

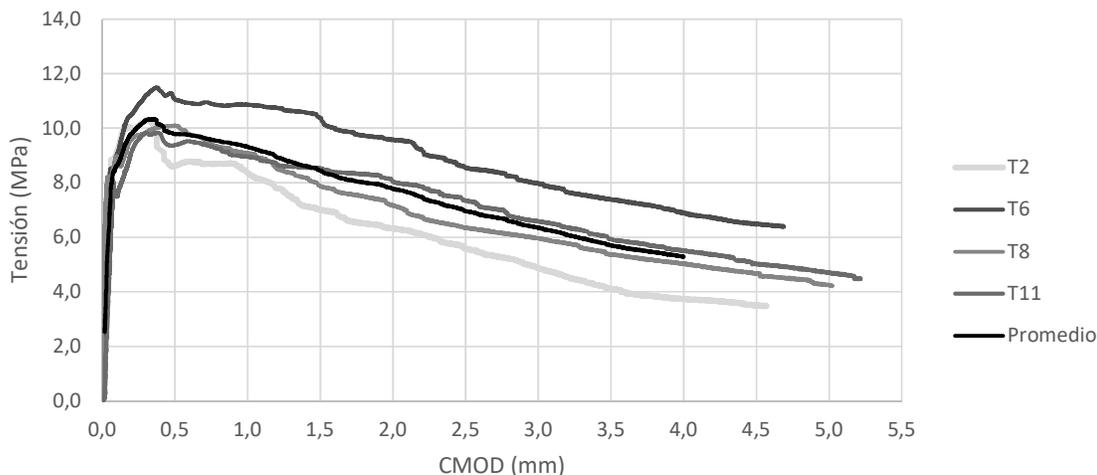


Figura 4-24 Gráfico Tensión-CMOD testigos a flexión media

A continuación, en la tabla Tabla 4-13, se presentan los resultados en tensión ajustada por el coeficiente 1.35 para los ensayos MVD realizados en vigas.

Testigos	Tensión Ajustada (MPa)			
	CMOD ₁	CMOD ₂	CMOD ₃	CMOD ₄
V1-A-23	10.52	8.65	6.66	5.59
V2-A-23	8.83	6.09	5.06	4.00
V3-A-12	11.83	10.25	8.70	7.69
V4-A-12	9.02	6.86	5.38	3.61
V5-A-23	12.66	11.04	9.01	7.37
V6-A-12	14.02	11.78	9.71	7.86
V7-A-23	5.67	4.65	3.34	2.74
V8-A-23	9.65	7.14	5.58	4.55
V9-A-12	10.52	8.53	6.36	5.21
V10-A-12	13.08	9.60	7.62	6.05
V11-A-23	9.35	7.08	5.80	5.02
V12-A-12	11.58	8.95	7.19	6.00
Promedio	10.56	8.39	6.70	5.47
Desv. Est.	2.3	2.1	1.8	1.6
CV	22%	25%	28%	30%

Tabla 4-13 Resultados tensión ajustada MVD en testigos viga.

En la Tabla 4-14, se compara los promedios de los resultados obtenidos en la Tabla 4-13 con los promedios de los resultados obtenidos en la Tabla 4-11. Se puede ver que los resultados obtenidos por MVD se encuentran del lado de la inseguridad, ya que son mayores que los de flexión, que son los utilizados actualmente para el cálculo. De todas maneras, y siendo que el coeficiente de relación está en estudio, se podría concluir que se está cercano a lo obtenido por el ensayo a flexión.

CMOD (mm)	Tensión (MPa)		Error %
	MVD ajustado	Flexión	
0.5	10.56	9.32	13%
1.5	8.39	7.23	16%
2.5	6.70	5.76	16%
3.5	5.47	4.65	18%

Tabla 4–14 Comparación testigos en forma de viga ensayados a MVD vs. testigos en forma de viga a flexión.

En la Tabla 4–15, se compara los promedios de los resultados obtenidos en la Tabla 4–13 con los promedios de los resultados obtenidos en la Tabla 4–12. Esta comparación se realiza porque los ensayos MVD fueron todos analizando la flexión media de la losa. Se puede concluir que los resultados son precisos ya que todos los errores se encuentran por debajo del 8%. Es importante observar que únicamente el $CMOD_1$ dio por el lado de la inseguridad (una tensión mayor por ensayo MVD que por ensayo de flexión) mientras que los demás valores si están del lado de la seguridad.

CMOD (mm)	Tensión (MPa)		Error %
	MVD ajustado	Flexión Media	
0.5	10.56	9.79	8%
1.5	8.39	8.45	-1%
2.5	6.70	6.96	-4%
3.5	5.47	5.69	-4%

Tabla 4–15 Comparación Testigos viga MVD vs. testigos viga flexión media.

Por otro lado, se analizaron los resultados obtenidos en los ensayos MVD de los testigos circulares, como se puede observar en Tabla 4–16. En la misma se puede ver los resultados de la tensión ajustada, su promedio, desviación estándar y el coeficiente de variación (CV). Se puede notar una mayor variación entre los resultados de estos testigos.

CMOD (mm)	Tensión (MPa)						Promedio	Desv. Est.	CV
	T1	T2	T3	T4	T5	T6			
0,5	8,90	10,22	6,22	6,36	2,60	6,67	6,83	2,62	38%
1,5	7,52	7,99	4,85	4,31	1,72	4,67	5,18	2,30	44%
2,5	6,61	6,37	3,89	3,17	1,23	2,85	4,02	2,10	52%
3,5	5,83	4,59	3,18	2,26	0,82	2,28	3,16	1,80	57%

Tabla 4–16 Resultados de ensayo MVD en testigos circulares.

En la Tabla 4–17, se muestra la comparación de las tensiones ajustadas para los ensayos MVD de testigos viga y testigos circulares. Se puede observar que los resultados obtenidos en los testigos circulares son mucho menores en todos los casos. No se encuentra una explicación clara de esta diferencia.

CMOD (mm)	MVD viga (MPa)	MVD circular (MPa)	Diferencia (%)
0,5	10,56	7,67	-27,4
1,5	8,39	5,87	-30,0
2,5	6,70	4,58	-31,6
3,5	5,47	3,63	-33,6

Tabla 4–17 Comparación testigos viga MVD vs. Testigos circulares MVD

4.8.3 Conclusiones

Se puede observar que las dispersiones en los ensayos a flexión (positivos, negativos y de momento medio) y MVD son similares.

Al comparar las tensiones obtenidas mediante el ensayo MVD –ajustado por coeficiente- y las flexiones, se puede ver que los resultados obtenidos se encuentran por el lado de la inseguridad, cumpliendo que todos los CMOD (MVD) son mayores que los CMOD (Flexión). En cuanto al error, los mismos dan entorno al 16%. En cambio, al comparar los resultados MVD únicamente con los resultados del ensayo a flexión de momento medio, los errores son significativamente más bajos (por debajo del 8%). Esta última comparación es la más útil por la manera en que se ensayaron todos los testigos en el ensayo MVD. En este caso, sólo el $CMOD_1$ tiene un resultado por encima del resultado a flexión (inseguridad).

Al comparar los resultados obtenidos para los ensayos MVD en vigas y en testigos circulares se puede ver que las tensiones en los testigos circulares son menores que las obtenidas en las vigas, las diferencias que se obtuvieron son significativas y no se encontró explicación a esto.

Con respecto a la función que se propone para estimar el CTOD, se puede concluir que los resultados son muy buenos, llegando a errores menores al 5% para f_{R1} y errores menores al 8% para f_{R3} , en general del lado de la seguridad. Se hace hincapié en estos dos resultados ya que son importantes al momento de realizar los cálculos estructurales. Estos resultados nos indican que sería posible prescindir de medidores LVDT en los ensayos MVD, simplificando así el ensayo y permitiendo a laboratorios con menos recursos realizarlos.

4.8.4 Líneas de investigación a futuro

Se podrá tomar los ensayos realizados para este proyecto para seguir investigando y ajustando el coeficiente entre el ensayo a flexión y MVD.

5 Sensor para la detección de la dirección preferencial de las fibras

5.1 Objetivos

Desarrollar un sensor capaz de medir la cantidad y orientación de fibras en HRFA.

Determinar la cantidad y orientación preferencial de las fibras mediante el ensayo inductivo en testigos extraídos.

5.2 Marco teórico

5.2.1 Definición de bobina

Una bobina, también llamada inductor, es un componente pasivo de un circuito eléctrico que, por el fenómeno de la autoinducción magnética, almacena energía en forma de campo magnético (B).

5.2.2 Definición de Inductancia

Se define la inductancia de una bobina, representada por L y medida en unidades de Henri (H), a la capacidad de oponerse al paso de la corriente eléctrica (I).

5.2.3 Comportamiento de un inductor magnético

Una de las piezas claves para el estudio del HRFA con este dispositivo es entender su comportamiento ante diferentes frecuencias. Cómo se puede ver en la Figura 5-1 y se explica en Rodríguez Llavés (2014), el inductor magnético llega a su capacidad máxima en la frecuencia de resonancia (f_R) y luego, el mismo pasa a comportarse como un capacitor. Por lo tanto, lo ideal es conocer la frecuencia de resonancia y medir utilizando la misma.

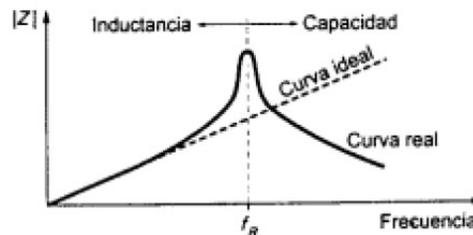


Figura 5-1 Curva de comportamiento de un inductor magnético (Rodríguez Llavés, 2014)

5.2.4 Principios físicos

El principio físico que respalda esta investigación con bobinas radica en la definición de flujo magnético y la medición de la inductancia. Cuando por una bobina se hace circular corriente, variable en el tiempo, la bobina produce un campo magnético a su alrededor, que a su vez produce un flujo magnético. Este flujo, al atravesar una superficie, va a variar en función de su interacción con esa superficie. Dado que la superficie del HRFA tiene fibras metálicas con propiedades ferromagnéticas muy diferentes a las del hormigón, los campos inducidos por el dispositivo a las fibras se pueden medir con la variación de inductancia que se produce. De este modo, las fibras metálicas que se encuentren paralelas a la dirección del campo magnético influirán en la variación de la inductancia de la bobina, mientras que, las que se encuentren perpendiculares presentan variaciones despreciables. De ahí que pueda detectarse y determinarse, de forma general, la cantidad y orientación de las fibras según las direcciones en que se esté midiendo. A continuación, se profundiza en este fenómeno.

5.2.4.1 Inductancia

En un circuito magnético, la inductancia (L) también se puede definir como la cantidad de flujo magnético (ϕ) producido por una corriente eléctrica (I), como se indica en la Ecuación (5-1).

$$L = \frac{\phi}{I} \quad (5-1)$$

El flujo magnético es inversamente proporcional a la resistencia magnética, denominada reluctancia R . Como se trabaja con bobinas, en vez de la resistencia (R), se tiene en cuenta la impedancia (Z). Si se trabaja con circuitos, Z se define como la sumatoria de la resistencia y la reactancia inductiva: $X_L=j\omega L$. En la (5-2), se muestra la ecuación para hallar el flujo magnético.

$$\phi = \frac{N \times I}{Z} \quad (5-2)$$

Siendo N el número de vueltas del hilo que conforma la bobina.

La impedancia del conjunto de las bobinas y el núcleo de ferrita varía debido al cambio del flujo magnético en presencia de las fibras metálicas. El sensor detecta el valor máximo de la inductancia cuando los ejes del campo magnético de las bobinas estén en la misma dirección que la dirección media de las fibras. En un circuito con 2 bobinas (Figura 5-2), cada una con una inductancia L , se puede obtener la inductancia equivalente como la suma de cada una.

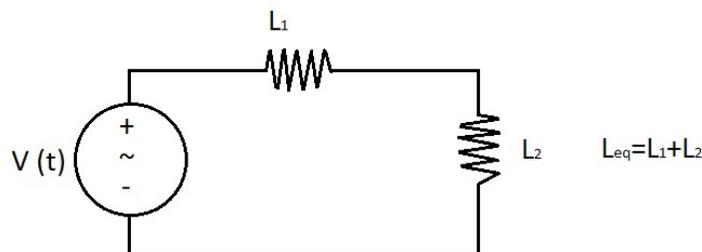


Figura 5-2 Representación de circuito con dos bobinas.

Teniendo en cuenta el circuito equivalente del sensor magnético, se puede estudiar la impedancia eléctrica del mismo:

$$Z_{AB} = R_{ws} + j\omega(X_L + X_C) \quad (5-3)$$

Siendo:

- R_{ws} la resistencia de la bobina.
- X_L la reactancia inductiva.
- X_C la reactancia capacitiva.

La parte real de la impedancia no depende de la presencia de fibras, mientras que la parte imaginaria es afectada por los efectos magnéticos que se inducen en la fibra ante la presencia de un campo magnético exterior, como el producido por las dos bobinas del sensor.

Por lo tanto, se puede dividir la inductancia L_v en dos partes, L_{v0} y ΔL_v . Se asume que L_{v0} es el valor de inductancia cuando el material no tiene fibras y ΔL_v es el término adicional por contener fibras. En la Ecuación (5-4) se muestra como calcular el cambio de inductancia.

$$\Delta L_v = Im \left(\frac{Z_{AB} - Z_{AB0}}{\omega} \right) \quad (5-4)$$

Siendo Z_{AB0} la impedancia cuando el elemento no tiene fibras. Para saber la dirección principal de la mayoría de las fibras hay que rotar el dispositivo hasta que el valor de la inductancia relativa sea máximo.

5.2.4.2 Proceso de detección de fibras metálicas

Si se coloca el dispositivo sobre los elementos de HRFA se puede medir la inductancia del material (Nunes et al., 2016a). En la Figura 5-3 se observa el campo que generan las bobinas y el campo inducido en las fibras. Cuando las fibras son paralelas con la dirección del núcleo la inductancia relativa es máxima y cuando se cambie el ángulo, la inductancia relativa baja.

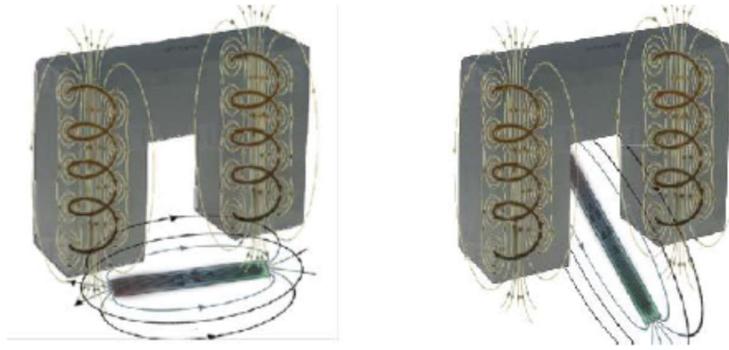


Figura 5-3 Esquema de posición de las fibras para medir la inductancia. (izq.) Paralela a la dirección del núcleo (der.) perpendicular al núcleo (Rodríguez Llaves, 2014).

5.3 Desarrollo del sensor magnético

5.3.1 Materiales utilizados

Para el desarrollo del sensor se utiliza un núcleo de material ferrita en forma de U. El material del núcleo es elegido por ser un material de alta permeabilidad magnética y baja conductividad eléctrica, lo que consigue reducir los efectos de las distorsiones en las medidas. También permite amplificar la sensibilidad al colocar las bobinas alrededor en vez de hacer un núcleo de aire u otro material. En la Figura 5-4 se pueden ver las dimensiones del núcleo en milímetros.

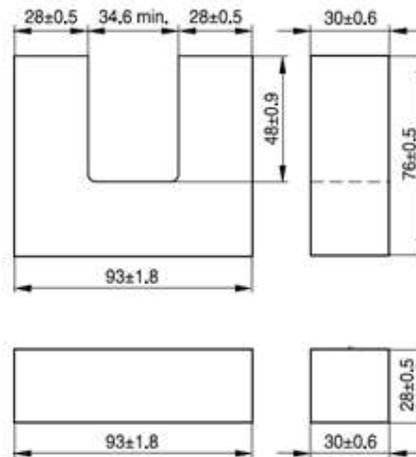


Figura 5-4 Dimensiones del núcleo de ferrita en milímetros.

También se utilizan dos bobinas en forma de solenoide multicapa en cada una de las patas de la U de la ferrita, y se conectan entre ellas para que cada una detecte el campo de las fibras por separado, pero que contribuyan en el resultado del valor de la inductancia. Para el bobinado se utilizan alambres de cobre de 0.40 mm de diámetro. En la Figura 5-5 se puede ver el sensor construido. Se pueden ver las bobinas enrolladas en cada pata del núcleo de ferrita y las terminales de diferentes números de vueltas bien identificadas.

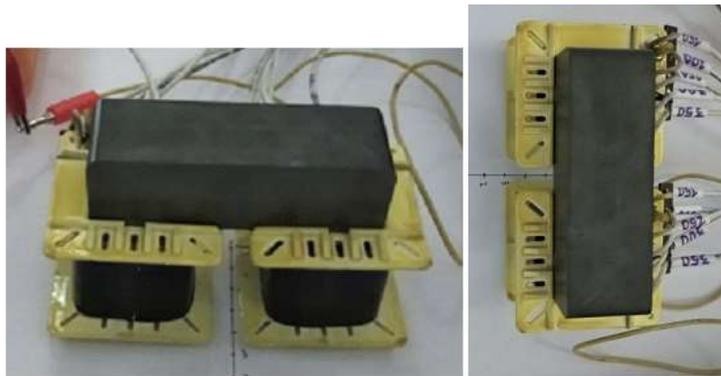


Figura 5-5 Bobina construida para la detección de la dirección preferencial de las fibras

Como se explica con mayor profundidad en Rodríguez Llaves (2014), para el diseño del sensor lo más importante es la medida de inductancia relativa respecto al vacío. En dicha investigación se utilizó con un analizador de impedancias y una herramienta para enrollar bobinas, por lo que, se va variando el número de vueltas hasta obtener un buen resultado.

En esta investigación no se cuenta con un analizador de impedancias ni con una máquina para enrollar bobinas y, por este motivo, se envió a un profesional a enrollar las bobinas con el mismo diámetro de alambre (0.40 mm) y con diferentes terminales para poder tener mayor flexibilidad. El número de vueltas de las terminales son: 150, 200, 250, 300 y 350. Las mismas se eligieron porque el núcleo de ferrita es igual al de Rodríguez Llaves (2014) y, en su investigación llegó a un número de vueltas óptimo de 250.

5.3.2 Equipo LCR

Para las medidas de inductancia se utilizó un equipo LCR (Inductancia (L), Capacitancia (C) y Resistencia (R)). Un medidor LCR es un instrumento usado para medir estas propiedades en un componente, sensor u otro dispositivo cuyo funcionamiento depende de la capacitancia, inductancia o resistencia. En la Figura 5-6 se puede ver un dispositivo idéntico al utilizado. El mismo cuenta con 5 frecuencias posibles para las mediciones: 100 Hz, 120 Hz, 1 kHz, 10 kHz y 100 kHz. Es un dispositivo muy simple de utilizar. Luego de conectar un cable a los polos positivos y negativos, se conecta con cada cable de la bobina y el mismo comienza a medir. Otra ventaja que tiene este tipo de dispositivos es que es portátil y eso ayuda a simplificar el ensayo.



Figura 5-6 Equipo LCR

5.3.3 Elección de la frecuencia a utilizar

Para la elección de la frecuencia a utilizar se probaron las diferentes frecuencias que puede transmitir el equipo LCR. En la Tabla 5-1 se muestran las lecturas del sensor en el vacío ($L_{vacío}$) para cada una de las frecuencias disponibles y las propiedades físicas medidas en el dispositivo LCR. Sólo

se muestra el valor de 350 vueltas, ya que, para las demás terminales se obtuvieron resultados equivalentes. Como se puede ver el sensor comienza a comportarse como un capacitor con una frecuencia de 100 kHz, algo que no se apunta a que suceda. Por lo tanto, se decide trabajar con la frecuencia de 10 kHz ya que, si observamos la Figura 5-1, es lo más cerca que podemos estar de medir en la frecuencia de resonancia sin que el dispositivo se comporte como un capacitor. Se puede concluir que la frecuencia de resonancia se encuentra entre 10 kHz y 100 kHz.

Frecuencia (kHz)	L _{vacío} - 350 vueltas	Propiedad física medida
1	68.06 mH	inductancia
10	72.07 mH	inductancia
100	174.42 mF	capacitancia

Tabla 5-1 Inductancia en el vacío en las distintas frecuencias posibles

5.3.4 Elección de número de vueltas a utilizar

Para decidir qué terminal se va a utilizar, se realiza la medida de inductancia en el vacío con cada terminal a una distancia de 0 cm a las fibras y otra a 1 cm según el eje z. Para evaluar los resultados de las lecturas realizadas, se trabaja con el porcentaje (%) de cambio respecto a la inductancia medida en el vacío. Cuanto mayor es el porcentaje de cambio respecto a la medida de inductancia en el vacío, la bobina está siendo sensible a más cantidad de fibras. El mismo se halla según la Ecuación (5-5).

$$\% \text{ de cambio} = \frac{L - L_{\text{vacío}}}{L_{\text{vacío}}} * 100 \quad (5-5)$$

En la Tabla 5-2 se pueden ver los resultados obtenidos. Se puede notar que no hay una diferencia importante entre resultados y, por tanto, el equipo decidió medir conectando el sensor con la terminal de 350 vueltas, que a efectos prácticos es más cómodo.

Vueltas	L _{vacío} (mH)	L 0 cm (mH)	% de cambio	L 1 cm (mH)	% de cambio
150	13.73	14.38	4.7%	13.85	0.9%
200	23.69	24.86	4.9%	23.94	1.1%
250	36.65	38.49	5.0%	37.02	1.0%
300	52.58	55.26	5.1%	53.11	1.0%
350	72.07	75.69	5.0%	72.81	1.0%

Tabla 5-2 Inductancia (L) según cantidad de vueltas a 10 kHz.

5.3.5 Definición de direcciones y ejes

5.3.5.1 Dirección

La dirección del dispositivo se representa colineal con el núcleo del mismo, como se muestra en la Figura 5-7. La dirección del dispositivo se alinea con los ejes para poder tomar las lecturas de inductancia según distintas direcciones para evaluar el testigo.

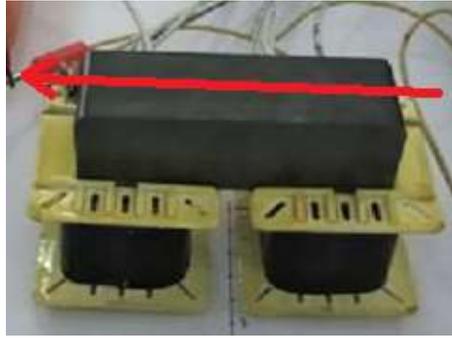


Figura 5-7 Dirección del dispositivo

5.3.5.2 Ejes

Se definen los 3 ejes ortogonales (X, Y, Z) para las mediciones a realizar. Los ejes y el origen de los mismos se expresan en la Figura 5-8. El origen se define en la parte inferior del dispositivo, y en la intersección de los ejes de simetría del núcleo. A partir de los ejes definidos se busca el alcance de medición del dispositivo.

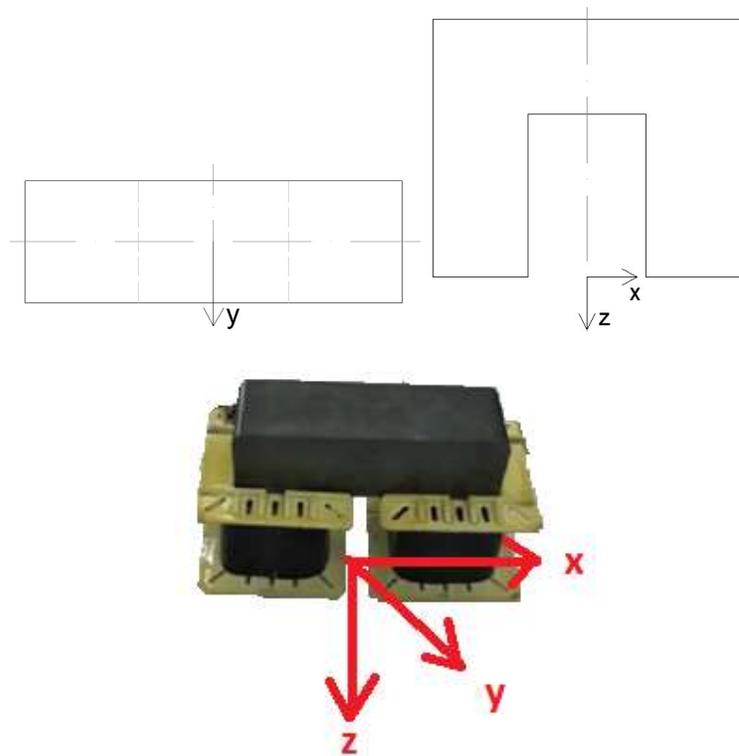


Figura 5-8 Dispositivo con ejes definidos

5.3.6 Alcance de medición del sensor

Cómo se explica en la sección 5.2.4, si las fibras están en sentido paralelo como en Figura 5-9 (izq.), el sensor mide la máxima inductancia, mientras que, si las mismas están perpendiculares como en la Figura 5-9 (der.) el sensor no obtiene variación significativa en el % de cambio respecto al vacío.

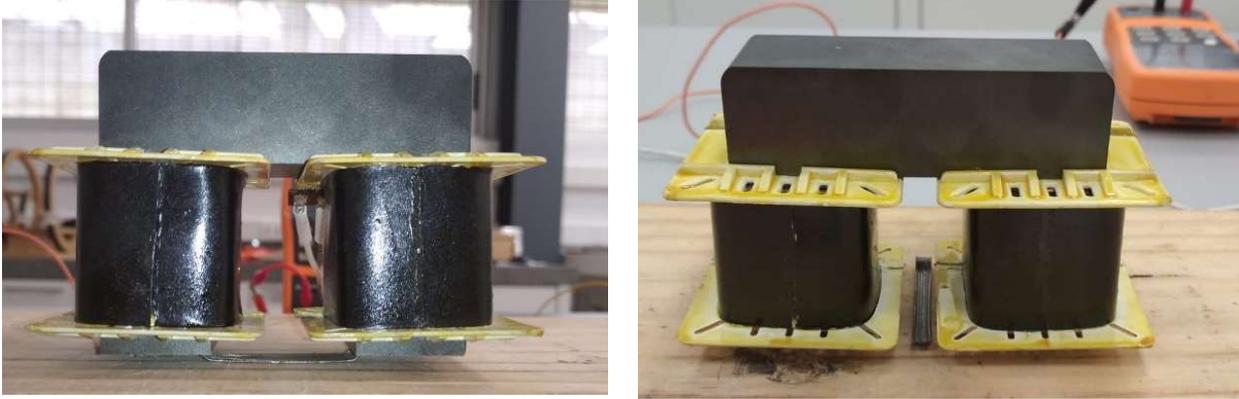


Figura 5-9 Medida con las fibras paralelas a la bobina (izq.) y perpendiculares a la bobina (der.)

En la *Tabla 5-3* se pueden ver los resultados de estas medidas para una frecuencia de 10 kHz y con la bobina conectada a 250 vueltas, donde se corrobora lo mencionado anteriormente. Con las fibras en paralelo la inductancia aumenta mientras más fibras colocamos y con las fibras en perpendicular, la inductancia cambia de manera despreciable.

N° de fibras	L paralelo (mH)	% de cambio respecto a vacío Paralelas	L perpendicular (mH)	% de cambio respecto a vacío Perpendiculares
1	36.88	0.6%	36.68	0.0%
5	37.45	2.1%	36.72	0.1%
6	37.58	2.5%	36.74	0.2%
7	37.70	2.8%	36.75	0.2%
13	38.67	5.5%	36.88	0.6%
20	39.47	7.6%	36.92	0.7%

Tabla 5-3 Lecturas de fibras paralelas y perpendiculares a la bobina

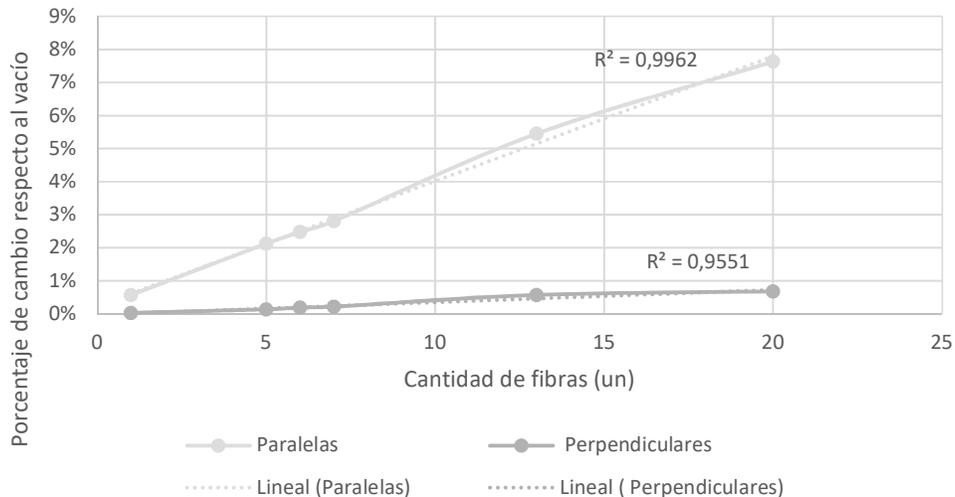


Figura 5-10 Cambio de inductancia respecto al vacío fibras paralelas y perpendiculares

En la Figura 5-10 se puede ver gráficamente los datos de la *Tabla 5-3*. Se concluye que el razonamiento que se hizo anteriormente sobre la posición de las fibras es correcto. A su vez se puede ver el comportamiento prácticamente lineal que relaciona la cantidad de fibras con la variación de inductancia. Con estas medidas podemos concluir que el sensor funciona como se espera.

5.3.7 Profundidad y radio máximos de detección

Se evalúa la profundidad aproximada a la que puede medir el sensor. A su vez se colocan fibras a diferentes distancias en distintas direcciones para evaluar el radio que abarca el sensor.

5.3.7.1 Eje Z

Se mide la profundidad como se muestra en la Figura 5-11. Se colocan las fibras para que las mismas queden a la altura del eje de las bobinas. Los datos obtenidos se pueden ver en la *Tabla 5-4*, donde se observa que el sensor sólo es capaz de medir la diferencia de inductancia de forma considerable (>1%) hasta el primer centímetro.

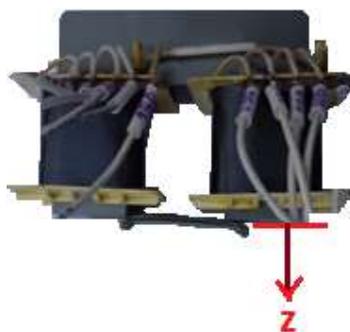


Figura 5-11 Medida de la profundidad que alcanza el sensor

Distancia según Eje z (cm)	L (mH)	% de cambio respecto a vacío
0	75.11	4.3%
1	72.82	1.1%
2	72.29	0.3%
3	72.1	0.1%
4	72.04	0.0%

Tabla 5-4 Medidas de la profundidad que alcanza el sensor

5.3.7.2 Eje X

Se hace un estudio análogo para el Eje X, con el fin de ver hasta que distancia el dispositivo es sensible a las fibras. En la Figura 5-12 se puede ver la disposición de las fibras respecto al sensor. Los resultados obtenidos se muestran en la *Tabla 5-5*. Se puede ver en los resultados que el sensor es capaz de medir la inductancia en los primeros 7cm. Se alinea el eje de la fibra con el origen mostrado en la figura, por lo que los resultados obtenidos muestran que deja de detectar la fibra cuando el extremo más próximo al dispositivo se encuentra a 2 cm.

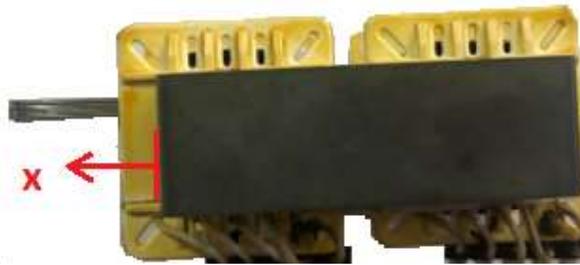


Figura 5-12 Medida de alcance del dispositivo según eje X

Distancia según Eje x (cm)	L (mH)	% de cambio respecto a vacío
1	74.89	3.8%
2	74.46	3.2%
3	74.04	2.7%
4	73.36	1.7%
5	73.06	1.3%
6	73.24	1.6%
7	73.06	1.3%
8	72.28	0.2%
9	72.25	0.2%
10	72.23	0.2%
11	72.2	0.1%
12	72.19	0.1%
13	72.18	0.1%

Tabla 5-5 Medidas tomadas por el sensor según el eje X

5.3.7.3 Eje Y

Se realiza de forma análoga, según la Figura 5-13 y la *Tabla 5-6*. Se observa que el dispositivo es capaz de medir las fibras que se encuentren en los primeros 2 cm.

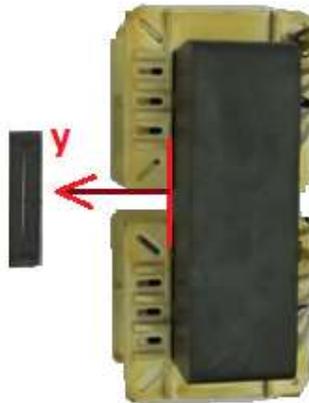


Figura 5-13 Medida de alcance de dispositivo según eje Y

Distancia según Eje y (cm)	L (mH)	% de cambio respecto a vacío
1	76	5.4%
2	73.81	2.3%
3	72.71	0.8%
4	72.32	0.3%
5	72.26	0.2%
6	72.22	0.1%
7	72.2	0.1%
8	72.18	0.1%

Tabla 5-6 Medidas tomadas por el sensor según el eje Y

5.4 Ensayo inductivo en testigos

5.4.1 Preparación del ensayo

Este ensayo se realiza a los testigos extraídos según la sección 4.6. Para tener una referencia de la posición original que cada testigo tenía en la losa, se les marca una flecha que apuntaba al cartel de referencia en la cara superior (ver Figura 4-6). Se definen las direcciones en las que se va a orientar el dispositivo para tomar medidas de inductancia. El eje X es co-lineal con la flecha que apunta al cartel de referencia. El eje Y es perpendicular al X. El eje 1 esta rotado a 45 grados del eje X en sentido anti horario. El eje 2 es perpendicular al eje 1, como se ve en la Figura 5-14 (izq.). También se definen 5 puntos en las caras superior e inferior, para tomar las medidas del ensayo. Los puntos elegidos son, el centro de la probeta, y 4 puntos en la mitad de cada radio como se puede ver en la Figura 5-14 (der.). En cada punto se miden según las 4 direcciones definidas. Todo esto se repite en la cara inferior procurando que coincidan puntos y direcciones con las de la cara superior.

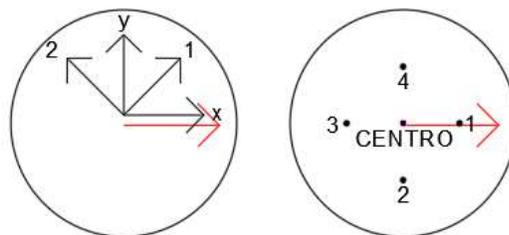


Figura 5-14 Ejes direccionales para medidas (izq.), Puntos de medida (der.) en cara superior.

5.4.2 Procedimiento

Una vez definidos los puntos y direcciones de lectura de datos, se procede a la toma de datos. Se realiza la calibración del equipo con la frecuencia de 10 kHz. Luego, se realiza la medida de la inductancia en el vacío. Por último, se toma en cada cara, en los 5 puntos de referencia, las medidas en las 4 direcciones preestablecidas.

A continuación, se toma como ejemplo las medidas de inductancia en el testigo 1. Los demás testigos son análogos. En la Tabla 5-7 se observan los resultados obtenidos. Están señaladas las direcciones en cada punto que se ven como preferenciales, ya que tienen mayor porcentaje de cambio de inductancia respecto al vacío.

Testigo 1 cara superior				Testigo 1 cara inferior			
Punto	Dirección	L (mH)	% de cambio respecto a vacío	Punto	Dirección	L (mH)	% de cambio respecto a vacío
centro	x	73,74	2,4%	centro	x	75,65	5,0%
	y	73,50	2,0%		y	76,50	6,2%
	1	73,77	2,4%		1	75,67	5,0%
	2	73,55	2,1%		2	76,47	6,1%
1	x	73,07	1,4%	1	x	75,39	4,7%
	y	73,29	1,7%		y	77,11	7,0%
	1	73,20	1,6%		1	76,01	5,5%
	2	73,22	1,6%		2	76,02	5,5%
2	x	73,90	2,6%	2	x	76,17	5,7%
	y	73,50	2,0%		y	75,58	4,9%
	1	73,70	2,3%		1	75,64	5,0%
	2	73,89	2,6%		2	75,76	5,2%
3	x	73,74	2,4%	3	x	75,05	4,2%
	y	73,65	2,2%		y	75,64	5,0%
	1	73,66	2,2%		1	75,32	4,6%
	2	73,73	2,3%		2	75,44	4,7%
4	x	73,39	1,9%	4	x	76,71	6,5%
	y	73,07	1,4%		y	77,21	7,2%
	1	73,15	1,5%		1	76,69	6,5%
	2	73,34	1,8%		2	77,07	7,0%

Tabla 5-7 Lectura de inductancia obtenida para el testigo nro.1 cara superior (izq.), cara inferior (der.)

5.4.3 Análisis de resultados

5.4.3.1 Análisis punto a punto de testigos

Como se puede ver en la sección 5.4.2, para cada punto de medida se obtiene la orientación preferencial de las fibras. A su vez, en cada cara, se toma como dirección preferencial la que se repite más en los puntos. En la Figura 5-15 y en la Figura 5-16 se pueden ver las direcciones preferenciales obtenidas para cada testigo.

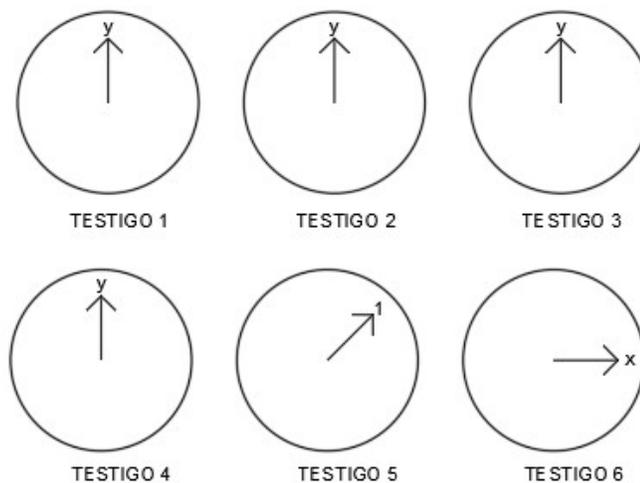


Figura 5-15 Orientación preferencial de las fibras en cara inferior de testigos ensayados

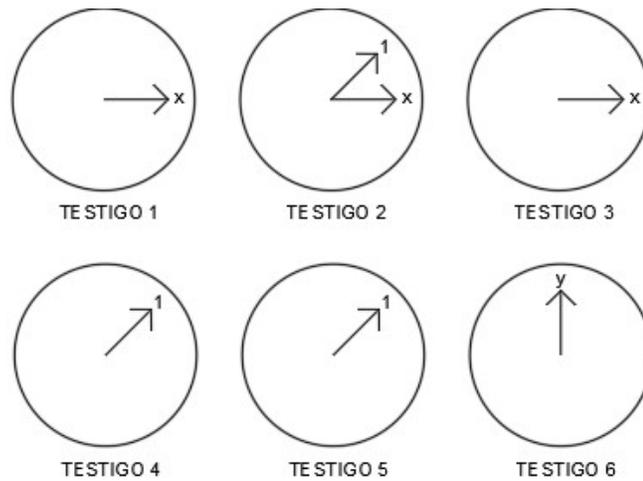


Figura 5-16 Orientación preferencial de las fibras en cara superior de testigos ensayados

En la cara inferior de la losa, se observa que la dirección preferencial en las fibras es según el eje Y, como se ve en la Figura 5-15. Por otro lado, y observando la Figura 5-16, en la cara superior se observa que existen 2 direcciones preferenciales, según el eje 1 y X.

5.4.3.2 Análisis mediante promedios de resultados obtenidos

En la Tabla 5-8 y Tabla 5-9 se pueden ver los promedios de las medidas obtenidos en cada dirección en la cara inferior y superior respectivamente. Se resaltan los mayores, ya que está directamente relacionado con el número de fibras en esa dirección como se concluyó en la sección 5.3.6. Como se puede ver la dirección preferencial de la cara inferior sigue siendo según el eje y. Mientras que, en la cara superior, la dirección preferencial no es tan marcada y continúan resultando las mismas direcciones, 1 y X.

Dirección	Testigo 1	Testigo 2	Testigo 3	Testigo 4	Testigo 5	Testigo 6
y	76,41	74,77	75,28	76,23	75,94	75,81
1	75,87	74,74	74,81	76,14	76,12	75,76
x	75,79	74,61	74,91	75,86	75,57	75,81
2	76,15	74,56	75,27	76,00	75,42	75,36

Tabla 5-8 Resultados promedios obtenidos en cara inferior (mH)

Dirección	Testigo 1	Testigo 2	Testigo 3	Testigo 4	Testigo 5	Testigo 6
y	73,40	73,78	74,18	73,43	74,09	72,89
1	73,50	74,00	74,21	73,57	74,24	72,74
x	73,57	74,02	74,59	73,47	74,08	72,63
2	73,55	73,81	74,39	73,28	73,84	72,72

Tabla 5-9 Resultados promedios obtenidos en cara superior de los testigos (mH)

En la Figura 5-17 se pueden ver los resultados de la Tabla 5-8 y Tabla 5-9 en un gráfico radial. En el mismo se representan los 8 puntos que generan las direcciones X, Y, 1 y 2, con líneas equipotenciales del valor de la inductancia, y los resultados promedios en estas direcciones de la cara inferior y superior. En este tipo de gráfico se puede visualizar mejor la dirección preferencial de cada testigo y, a su vez, la diferencia en cantidad de fibras. Se puede notar que en la cara inferior siempre hay una mayor lectura de inductancia, lo que indica un mayor número de fibras que en la superior. También se puede notar que hay testigos que tienen una mayor lectura en todas las direcciones, por lo que se asocia a un mayor número de fibras. Con respecto a las direcciones preferenciales en cada testigo, algunos muestran clara tendencia hacia una dirección (gráficos ovalados), mientras que otros tienen lecturas similares en todas las direcciones, creando gráficos más regulares (redondeados).

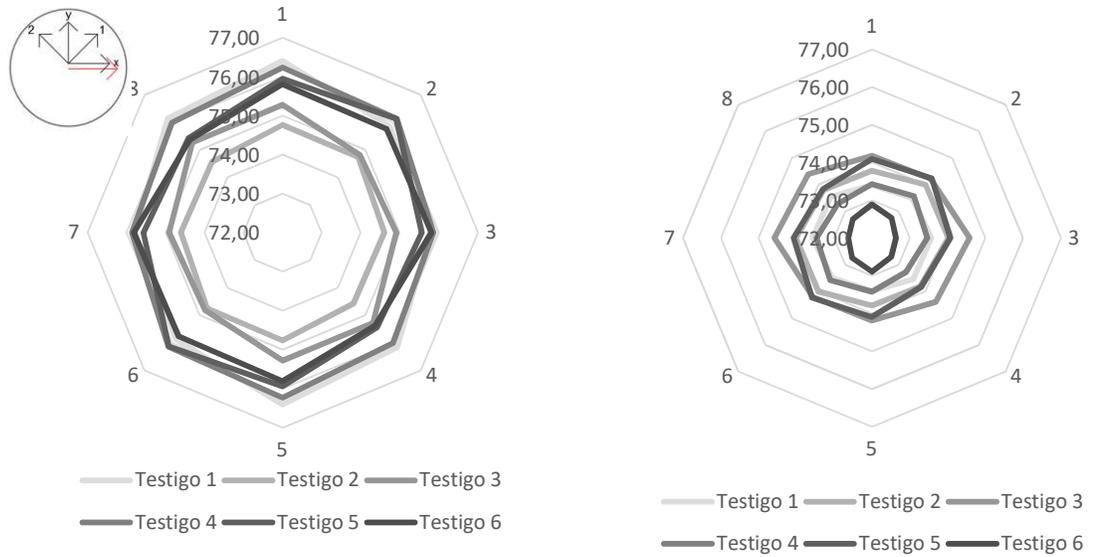


Figura 5-17 Grafico de resultados promedios obtenidos en cara inferior (izq.) y cara superior (der.) de los testigos extraídos.

5.4.4 Resultados del ensayo MVD

Una vez ensayados los testigos mediante el ensayo inductivo, los mismos son sometidos al ensayo MVD. En la Tabla 5–10 se muestra la dirección en la que los testigos serán preparados para el ensayo MVD, la lectura de inductancia promedio en esa dirección y los resultados de las tensiones resistentes (f_{Ri}). En la misma se puede observar que no hay una relación clara entre la lectura de la inductancia y la resistencia final de los testigos. En la Figura 5-18 se realiza una representación gráfica de estos resultados donde se puede observar con más claridad la aleatoriedad de los resultados.

Testigo	Dirección de preparación	L en dirección de preparación (mH)	f_{R1} (MPa)	f_{R3} (MPa)
1	2	76.15	8.9	6.61
2	1	74.74	10.22	6.37
3	1	74.81	6.22	3.89
4	2	76.00	6.36	3.17
5	2	75.42	2.6	1.23
6	2	75.36	6.67	2.85

Tabla 5–10 Resultados obtenidos en testigos circulares.

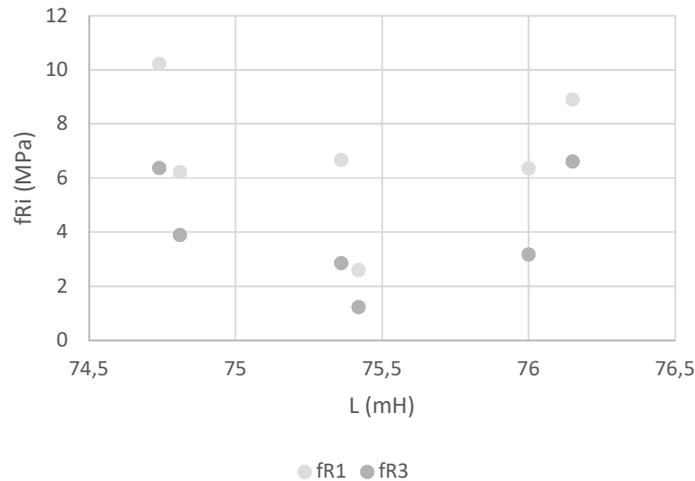


Figura 5-18 Relación entre lectura de inductancia y resistencia de los testigos circulares.

5.5 Conclusiones

5.5.1 Conclusiones sobre el dispositivo construido

El sensor construido funciona correctamente, donde hay una relación proporcional entre el número de fibras y el cambio de inductancia respecto al vacío. La influencia de la dirección de las fibras respecto al sensor también es como se esperaba, llegando a valores máximos cuando las fibras están paralelas y valores mínimos cuando las mismas están perpendiculares. Con respecto al alcance del mismo, se concluye que detecta fibras a una distancia de entre 1 y 2 cm en todas las direcciones. Por último, concluimos que la frecuencia de resonancia se encuentra entre 10 kHz y 100 kHz ya que, al medir con este último, el sensor comienza a comportarse como un capacitor.

5.5.2 Conclusiones sobre el ensayo inductivo

Al medir las caras de los testigos, el mismo detectó un número mayor de fibras en la cara inferior que en la superior, algo que, luego de rotos los testigos, se pudo corroborar mediante el conteo de las mismas. Por lo tanto, se concluye que el ensayo nos permite comparar la cantidad de fibras en diferentes lugares de una losa de HRFA y saber si en un lugar hay más o menos fibras. Con respecto a la dirección preferencial de las fibras, se vio que la medida de inductancia cambia en un mismo punto al cambiar el sensor de dirección. Esto nos permite estimar una dirección preferencial. De todas maneras, no se puede concluir que esta estimación es correcta ya que, habría que romper el testigo en cada punto exactamente y ver la dirección de las fibras para saber si fue acertado.

5.5.3 Conclusiones sobre los resultados esperados al ensayo MVD

Luego de realizar el ensayo MVD a los testigos, se llegaron a valores de resistencia que no eran los esperados. No se cumplió la premisa que, a mayor medida de inductancia, mayor resistencia. Tampoco que, a valores similares de medida de inductancia, valores similares de resistencia. Por lo tanto, las conclusiones extraídas luego del ensayo inductivo no fueron acertadas. Esto puede deberse a varios factores, como ser que el alcance del dispositivo es muy pequeño respecto a la altura del testigo y, por tanto, no sea representativa de la cantidad de fibras de la sección. Otro aspecto a tener en cuenta es que las fibras que “cosen” las fisuras tienen direcciones aleatorias y, en el ensayo inductivo se seleccionaron 8 direcciones arbitrarias, lo que podría no ser representativo de la realidad.

5.6 Línea de investigación a futuro

Para seguir con esta línea de investigación, se puede: realizar el gráfico de la frecuencia-inductancia y así poder obtener la frecuencia de resonancia del sensor, realizar muestras con diferentes cuantías de fibras para poder encontrar una relación entre la cuantía de fibras y la variación de inductancia, realizar muestras con distribuciones de fibras diferentes en la sección para encontrar la relación entre la medida de inductancia y las distintas distribuciones.

6 Aplicación práctica para el cálculo de una losa

6.1 Introducción

En esta sección se realiza, a modo de ejemplo y de manera muy simplificada, el cálculo de una losa para construir con HRFA, y se la compara con una losa de hormigón armado convencional. El cálculo se hace de manera simplificada porque el objetivo de esta sección es mostrar que es viable construir una losa con HRFA y sus ventajas y, para esto, es suficiente tener un número general. Luego de realizar la caracterización del material con el cual se construyó la losa elevada, es importante mostrar en los cálculos la viabilidad de construir losas en edificios con el mismo. Mediante este ejercicio se pueden ver las ventajas y desventajas de realizar una losa de HRFA y acercar aún más el material a los diseñadores y calculistas de estructuras.

Se remarca que esta aplicación práctica es realizada meramente como un ejercicio, pero no debe ser tomada como guía para resolver estructuras de HRFA similares ya que, en caso de construir con este material, se debe tener en cuenta en la etapa de diseño de la estructura para aprovechar mejor sus capacidades.

6.2 Objetivos

Evaluar la capacidad del material para utilizarse en construcción, comprobando que el HRFA es capaz de sustituir gran parte de la armadura convencional en losas, mediante la realización del cálculo de la losa de un edificio de viviendas.

6.3 Normas técnicas y recomendaciones utilizadas

- Anejo 14, EHE-08 Instrucción de Hormigón Estructural.
- ACI 544.6R-15 Report on Design and Construction of Steel Fiber-Reinforced Concrete Elevated Slabs. (ACI Committee 544 & American Concrete Institute, 2015)
- Model Code 2010.

6.4 Descripción de la estructura

La losa a analizar es la misma losa de planta tipo que se analizó para el curso de grado de Proyecto de Ingeniería Estructural 1 del año 2019. Se trata de la losa de planta tipo de un edificio (Figura 6-1) para el Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente (MVOTMA), el mismo está proyectado entre medianeras y se ubica en Cuareim 1731, departamento de Montevideo. Comprende 62 apartamentos de 1, 2 y 3 dormitorios, Salón de Usos Múltiples (SUM) y estacionamientos exigidos por norma departamental, y 12 plantas (incluido subsuelo) con dos núcleos de ascensor. Para el cálculo de los esfuerzos se tomaron en cuentas las cargas recomendadas por la norma UNIT 33 para el uso de vivienda como se puede ver en la Figura 6-2.

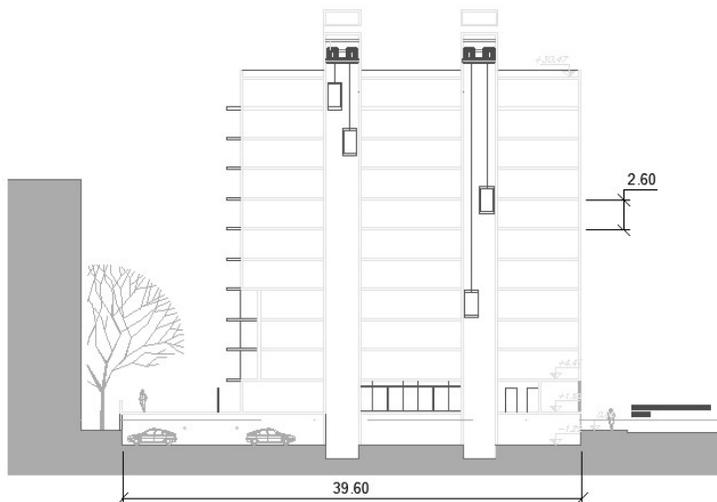
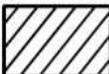
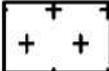


Figura 6-1 Corte del edificio Cuareim

- 
 Zona de Azotea accesible, baño, cocinas y dormitorios. Se considera una SCU de 1,5 kN/m²
- 
 Zona de balcones, escaleras, corredor, exteriores PB. Se considera una SCU de 3,0 kN/m²
- 
 Zona de comedor. Se considera una SCU de 2,0 kN/m²

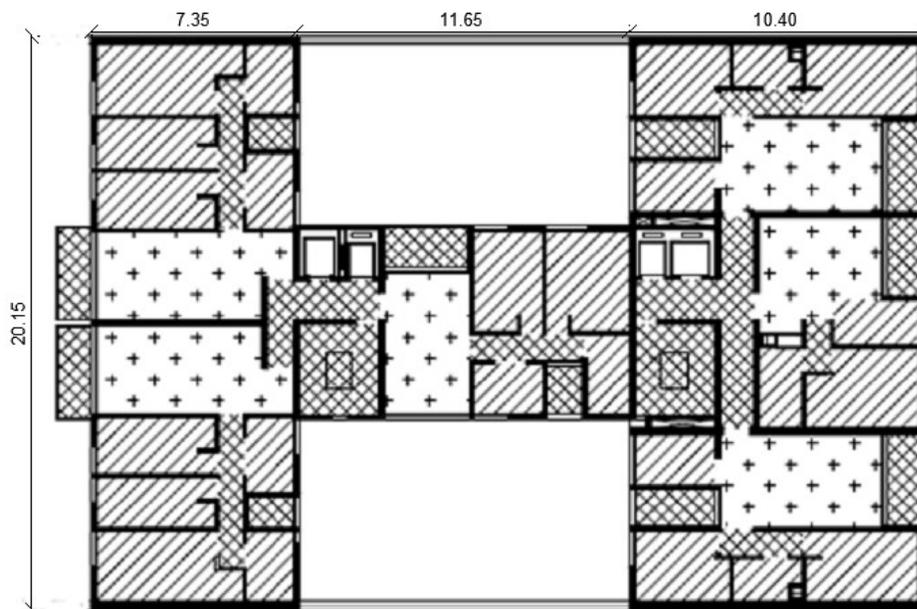


Figura 6-2 Esquema sobre cargas según norma EHE-08

6.5 Diseño de la losa con hormigón armado convencional

En el cálculo de la losa en hormigón armado convencional se utilizó el método de Estados Límites siguiendo las recomendaciones de las normas EHE-08 y UNIT 1050. En la Figura 6-3, se muestra el modelo elástico de la losa realizado con el software Robot Structural Analysis. El espesor de la losa es de 17 cm, valor que surge de un análisis de rigidez.

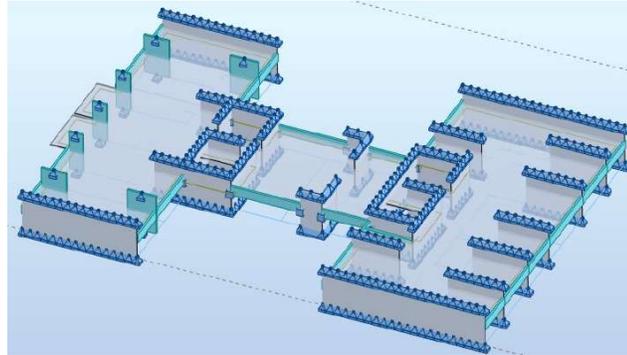


Figura 6-3 Modelo de la losa en Robot Structural Analysis

El cálculo del hierro está basado en los diagramas de momentos positivos y negativos en ambas direcciones. En la Figura 6-4 y Figura 6-5 se puede ver el diagrama de los momentos positivos según x y según respectivamente, las zonas más exigidas son las indicadas con cuadros. En la Tabla 6-1 y Tabla 6-2 se puede ver cómo se resolvieron estas zonas. En las mismas se puede ver el momento máximo, la armadura necesaria y la armadura que finalmente se coloca.

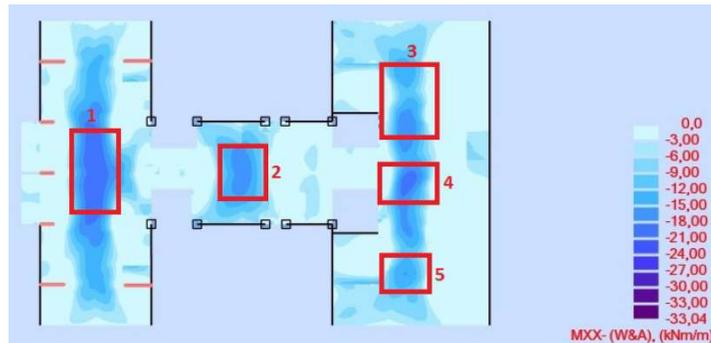


Figura 6-4 Diagrama de momentos positivos según XX

Zona	$M_{m\acute{a}x}$ (kNm/m)	$A_{s,nec}$ (cm ² /m)	D (mm)	Separación (cm)
1	20.8	3.26	10	20
2	17.5	2.73	10	25
3	14.8	2.30	10	25
4	19.2	3	10	25
5	15.9	2.48	10	25

Tabla 6-1 Armado de los momentos positivos según XX

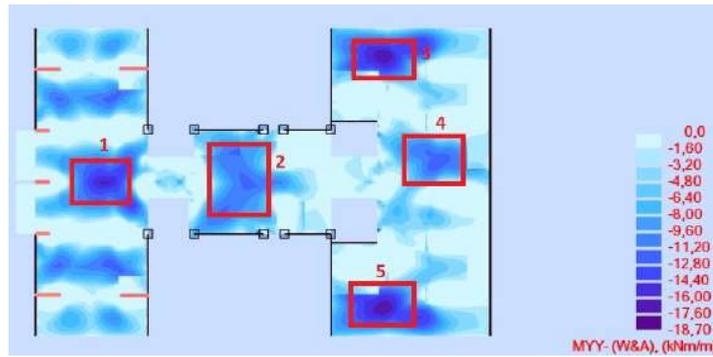


Figura 6-5 Diagrama de momentos positivos según YY

Zona	M _{máx} (kNm/m)	A _{s,nec} (cm ² /m)	D (mm)	Separación (cm)
1	16.5	2.76	10	25
2	11.8	1.96	10	25
3	17.0	2.85	10	25
4	12.2	2.03	10	25
5	17.2	2.88	10	25

Tabla 6-2 Armado momentos positivos según YY

En la Figura 6-6 y Figura 6-7 se muestran los diagramas de momentos negativos según las direcciones x e y respectivamente, en este caso no se optó por hacer una malla superior mínima en toda la losa ya que sería un desperdicio de materiales. Para la resolución de estas armaduras se decidió armar puntualmente estas zonas.

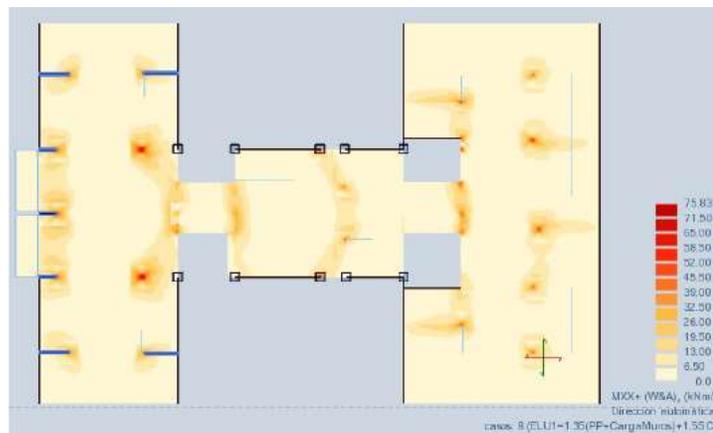


Figura 6-6 Diagrama de momentos negativos según XX

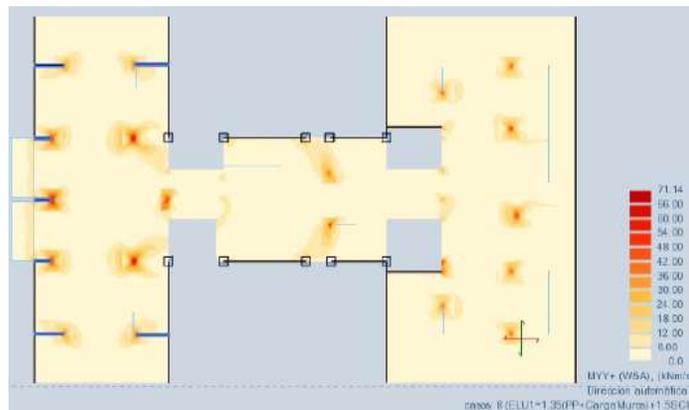


Figura 6-7 Diagrama de momentos negativos según YY

6.6 Diseño de la losa con hormigón reforzado con fibra

6.6.1 Resistencia nominal

Para nombrar el material se utiliza la nomenclatura utilizada en el Model Code 2010. En éste se utilizan dos parámetros para caracterizar el material según la resistencia después de fisurar. Uno de ellos es el f_{R1k} , que es la resistencia asociada a la apertura de fisura de 0,5 mm en el ensayo de viga de tres puntos de la norma EN 14.651. El siguiente parámetro es f_{R3k}/f_{R1k} , siendo f_{R3k} la resistencia cuando la apertura de la fisura es de 2,5 mm. Este valor se expresa como:

- a si $0.5 \leq f_{R3k}/f_{R1k} < 0.7$
- b si $0.7 \leq f_{R3k}/f_{R1k} < 0.9$
- c si $0.9 \leq f_{R3k}/f_{R1k} < 1.1$
- d si $1.1 \leq f_{R3k}/f_{R1k} < 1.3$
- e si $1.3 \leq f_{R3k}/f_{R1k}$

Donde:

- f_{R1k} resistencia asociada a la apertura de fisura de 0.5 mm
- f_{R3k} la resistencia correspondiente a una apertura de fisura de 2.5 mm.

Para el diseño en HRFA se utilizan los valores de la losa elevada y son extraídos de la tesis de González et al., (2020). Los valores obtenidos son los siguientes:

- Resistencia característica del hormigón $f_{ck}=63$ MPa.
- Resistencia característica de diseño $f_{cd} = 42$ MPa.
- Resistencia de diseño a flexión $f_{ctd} = 3,6$ MPa.
- Resistencia correspondiente a una apertura de fisura de 0,5 mm $f_{R1k}=5.7$ MPa.
- Resistencia correspondiente a una apertura de fisura de 2,5 mm $f_{R3k}=4.7$ MPa.
- Relación entre ambas $f_{R3k}/f_{R1k}=0.82$.
- El material se caracteriza como un 5b según el Model Code 2010.
- Módulo Elástico $E_{c,d} = 36,8$ GPa.
- Coeficiente $K=2.15$.

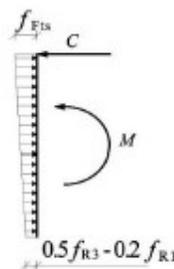


Figura 6-8 Modelo de comportamiento de una losa de HRFA en ELU Model Code 2010

En la Figura 6-8, se muestra el modelo de tensiones donde se asume que la compresión se encuentra concentrada en la fibra superior de la losa, y que las tensiones residuales varían linealmente. La resistencia residual se encuentra representada por dos valores: f_{Fts} y f_{Ftu} .

$$f_{Fts} = 0.45f_{R1k} = 0.45 \times 5.7 \text{ MPa} = 2.57 \text{ MPa} \quad (6-1)$$

$$f_{Ftu} = f_{Fts} - \frac{w_u}{CMOD_3} (f_{Fts} - 0.5f_{R3k} + 0.2f_{R1k}) \geq 0 \quad (6-2)$$

Donde w_u es la apertura de fisura máxima permitida, cuyo valor depende de la ductilidad requerida. Tomando w_u igual a $CMOD_3$ para simplificar los cálculos.

$$f_{Ftu} = 2.57MPa - (2.57MPa - 0.5 \times 4.7MPa + 0.2 \times 5.7MPa) = 1.21MPa \quad (6-3)$$

Para calcular el momento resistente se utiliza el diagrama de la Figura 6-8. A su vez aquí se considera que la losa es del mismo espesor que la calculada con hormigón armado convencional, o sea, 17 cm.

$$M_k = 1210KPa \times \frac{(0.17m)^2}{2} + (2570KPa - 1210KPa) \times \frac{(0.17m)^2}{3} = 30.59kNm/m \quad (6-4)$$

Con un coeficiente de seguridad de 1.5, como se recomienda en el Model Code 2010, para pasar de resistencia característica a resistencia de diseño se obtiene que la resistencia de diseño es:

$$M_d = 20.4kNm/m$$

6.7 Análisis estructural

6.7.1 Estado límite Último

Para el análisis de la losa se utiliza el método de líneas de rotura siguiendo las recomendaciones ACI 544.6R-15. Esto significa asumir la formación de rótulas plásticas. Lo que implica que la losa debe ser lo suficientemente dúctil para tener deformaciones y poder soportar cargas estando fisurada. Para cargas uniformemente distribuidas, las recomendaciones ACI 544.6R-15 plantean la combinación de cargas siguiente:

$$q_d = \lambda_{DL}W_G + \lambda_{LL}q_s \quad (6-5)$$

Donde:

- $\lambda_{DL} = 1.6$
- $\lambda_{LL} = 1.2$
- W_G es el peso propio de la losa y la carga permanente.
- q_s es la carga de servicio de la losa.

Tomando el peso del hormigón como 25 kN/m³, la carga permanente 18 kN/m³ y la SCU como 2.5 kN/m². Considerando la losa de 17 cm y recubrimiento de 3 cm. A su vez aplicamos una carga de 1 kN/m² de muros para simplificar las cuentas. Para el caso particular de losa la carga de diseño es:

$$Q_d = 1.6 \times \left(25 \frac{kN}{m^3} \times 0.17m + 18 \frac{kN}{m^3} \times 0.03m + 1 \right) + 1.2 \times 2.5 \frac{kN}{m^2} = 12.5 \frac{kN}{m^2} \quad (6-6)$$

Siguiendo esta recomendación, el método de líneas de rotura para losas elevadas con cargas distribuidas tiene 2 mecanismos de rotura. En el mecanismo 1, se desarrollan líneas de rotura negativas (tracción en fibras superiores) en los bordes de los paneles y, en el interior de los paneles, se desarrollan líneas de rotura positivas (tracción en las fibras inferiores). El mecanismo 2 es una falla local los pilares. Donde se desarrollan líneas de rotura negativas radiales desde el apoyo y líneas de rotura positivas elípticas rodeando los apoyos. En la Figura 6-9 se pueden ver los dos mecanismos de rotura según diferentes direcciones.

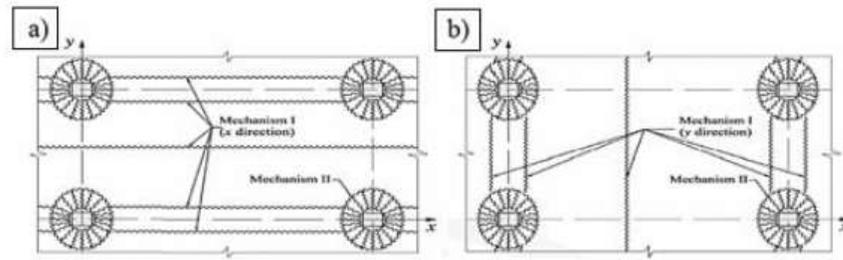


Figura 6-9 Mecanismos de rotura en losas a) en la dirección x y b) en la dirección y (ACI 544.6r-15)

6.7.2 Mecanismo 1

En la recomendación (ACI 544.6R-15) se establecen dos tipos de paneles: paneles interiores con continuidad en los bordes y paneles de esquina. Dependiendo del tipo de paneles se da una fórmula para calcular los momentos de cálculo. Siendo las distancias L_{rx} y L_{ry} las que se muestran en la Figura 6-10.

- Panel interior:

$$M_{px}^+ = q_d \frac{L_{ry}^2}{16} \quad (6-7)$$

$$M_{py}^- = q_d \frac{L_{rx}^2}{16} \quad (6-8)$$

$$M_{py}^- = M_{py}^+ \quad (6-9)$$

- Panel esquina:

$$M_{px}^+ = q_d \frac{L_{ry}^2}{2(\sqrt{2} + 1)} \quad (6-10)$$

$$M_{py}^- = q_d \frac{L_{rx}^2}{2(\sqrt{2} + 1)} \quad (6-11)$$

$$M_{py}^- = M_{py}^+ \quad (6-12)$$

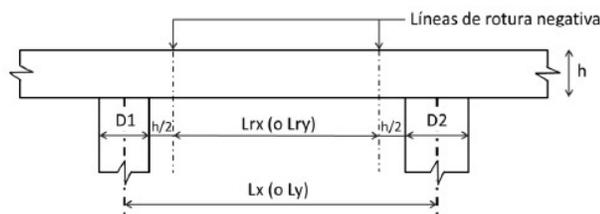


Figura 6-10 Definición de las distancias utilizadas en las ecuaciones (ACI 544.6r-15)

Se analiza el caso de panel interior ya que la zona a estudiar, que se muestra en la Figura 6-11, tiene continuidad luego de sus apoyos.

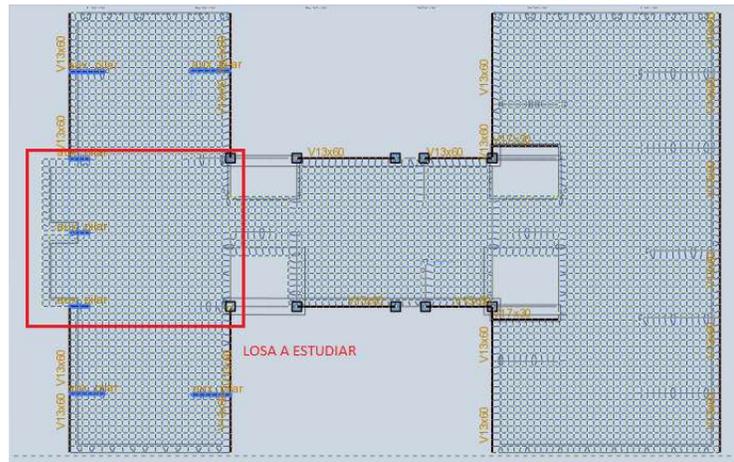


Figura 6-11 Zona de la losa a estudiar.

A continuación, se calculan las distancias calculadas para la losa.

$$Lx \text{ máx} = 6.28 \text{ m} \tag{6-13}$$

$$Lrx = 6.11 \text{ m} \tag{6-14}$$

$$Ly \text{ máx} = 3.40 \text{ m} \tag{6-15}$$

$$Lry \text{ máx} = 3.23 \text{ m} \tag{6-16}$$

Como se puede ver el caso más desfavorable es tomando Lrx .

Para panel interior:

$$Mpy = 12.3 \text{ kN/m}^2 \times \frac{6.11^2}{16} = 28.6 \text{ kNm/m} \tag{6-17}$$

Se debe cumplir que $Mpy \leq Md$, en este caso:

$$28.6 \text{ kNm/m} > 20.4 \text{ kNm/m} \tag{6-18}$$

Por tanto, una losa de 17 centímetros con este material no es capaz de cumplir con las exigencias de la norma. Se realiza una iteración para ver cuál es el espesor de losa necesario para cumplir con estas exigencias.

Espesor (m)	Mu (kNm/m)	Md (kNm/m)
0.17	30.59	20.39
0.18	34.29	22.86
0.19	38.21	25.47
0.2	42.33	28.22
0.21	46.67	31.12
0.22	51.22	34.15

Tabla 6-3 Iteración con distintos espesores de losa de HRFA

Se vuelve a calcular la carga de diseño para poder verificar la losa con un espesor de 21 centímetros.

$$Qd = 1.6 * (25\text{kN/m}^3 \times 0.21\text{m} + 18\text{kN/m}^3 * 0.03\text{m} + 1\text{kN/m}^2) + 1.2 \times 2.5\text{kN/m}^2 = 13.9\text{kN/m}^2 \quad (6-19)$$

Por lo tanto:

$$M_{py} = 13.9 \times \frac{6.11^2}{16} = 32.4 \text{ kNm/m} \quad (6-20)$$

Como se puede ver la losa de 21 centímetros no es suficiente.

Calculando nuevamente para una losa de 22 centímetros tenemos que:

$$Qd = 14.3 \text{ kN/m}^2 \quad (6-21)$$

$$M_{py} = 33.3 \text{ kNm/m} \quad (6-22)$$

Por lo tanto, la losa debe ser de 22 centímetros para poder cumplir con las exigencias de la norma. Hay que tener en cuenta que la decisión del espesor de la losa se debe hacer teniendo en cuenta los momentos positivos ya que los momentos negativos, dada la estructura, son puntuales y muy altos (del orden de 2 o 3 veces del momento positivo), y el espesor de la losa sería muy grande. Para estos momentos se coloca armadura superior que cubra la diferencia entre el momento resistente del HRFA y el momento negativo en cada zona.

6.7.3 Mecanismo 2

Para el mecanismo 2 se tiene en cuenta la carga que transmite la losa a los pilares. El cálculo de este mecanismo está hecho para funcionar con pilares aproximadamente cuadrados, lo cual no se cumple en esta estructura y, por tanto, los cálculos que se realizan del mismo son aproximados. En este caso se toma como referencia el *Pilar 22*, el cual está señalado en la Figura 6-12, recibe una carga de 218.5 kN y es de forma rectangular de medidas $a = 0.13 \text{ m}$ y $b = 0.90 \text{ m}$, ya que es el pilar más exigido. La carga máxima se extrajo del modelo elástico lineal que se realizó en el programa Robot Structural Analysis.

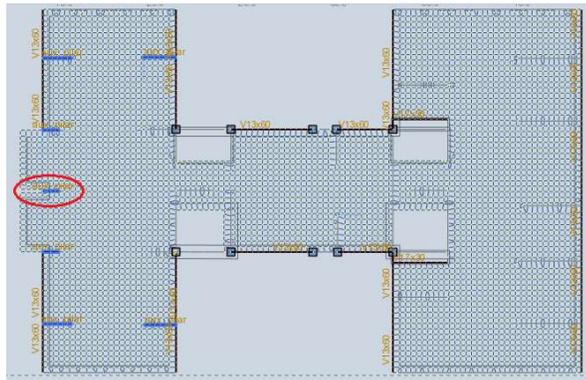


Figura 6-12 Referencia del Pilar 22.

$$M_{pd} = \frac{P_{pilar}}{12.4(1 + 4r_{m\acute{a}x})} \quad (6-23)$$

$$r_{m\acute{a}x} = m\acute{a}x \left\{ \frac{a}{L_y}; \frac{b}{L_x} \right\} \quad (6-24)$$

$$r_{m\acute{a}x} = m\acute{a}x \left\{ \frac{0.13 \text{ m}}{3.40 \text{ m}}; \frac{0.90 \text{ m}}{6.28 \text{ m}} \right\} = 0.14 \quad (6-25)$$

$$M_{pd} = \frac{218.5 \text{ kN}}{12.4(1 + 4(0.14))} = 11.30 \text{ kNm/m} \quad (6-26)$$

Se debe verificar que $M_{pd} \leq M_d$

$$11,30 \text{ kNm/m} \leq 34,15 \text{ kNm/m} \quad (6-27)$$

De esta manera se verifica el mecanismo 2. Nótese que se utiliza la resistencia de la losa de espesor de 22 centímetros que es el espesor a utilizar en caso de construir con HRFA.

6.7.4 Punzonamiento

Aunque existen estudios que determinan que el punzonamiento no es determinante en la falla de losas de HRFA ya que la falla por rotura plástica se da antes, se realiza la verificación utilizando el método adoptado por la recomendación (ACI 544.6R-15). Nuevamente se utilizan métodos pensados para otro tipo de pilares por lo que los cálculos son a modo de ejemplo. Se utiliza la superficie crítica para pilares alargados que se puede ver en la Figura 6-13 (García et al., 2009). En este caso se evalúa la tensión que hay alrededor del pilar y se compara con un tercio de la resistencia a flexotracción del material ($0.33f_{ct,fl}$). Para el punzonamiento se tiene en cuenta la carga que transmite la losa a los pilares. Se toma como referencia el *Pilar 22* nuevamente. Primero se calcula el área de influencia como se muestra en (6-28).

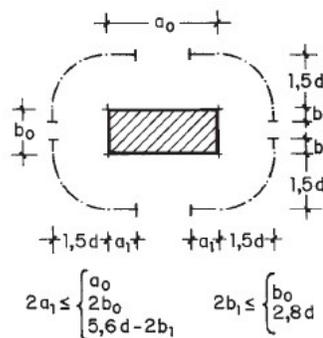


Figura 6-13 Superficie crítica de punzonamiento para pilares alargados.

$$\hat{A} = (2a_1 + b_1 + \pi * h) * h = 0.24 \text{ m}^2 \quad (6-28)$$

La tensión media en la sección crítica del pilar 22 es:

$$\sigma_{pz} = \frac{P_{pilar}}{A_{pz}} = \frac{218.5 \text{ kN}}{0.24 \text{ m}^2} = 918 \text{ kPa} = 0.92 \text{ MPa} \quad (6-29)$$

$$f_{pz} = 0.33f_{ctd} = 0.33 * 3.6 \text{ MPa} = 1.2 \text{ MPa} \quad (6-30)$$

Se debe cumplir que $\sigma_{pz} \leq f_{pz}$, por lo tanto, la losa no necesita armadura de punzonamiento.

En el anejo 14 de la norma EHE-08 se proporciona otra manera de verificar el Punzonamiento. La norma considera la colaboración de las fibras en la tensión resistente en la superficie crítica del hormigón.

$$\tau_{fd} = 0.5f_{ctR1,d} = 0.5 * 0.45 * f_{R1} = 1.25 \text{ MPa} \quad (6-31)$$

La superficie crítica está a una distancia igual a 2d del pilar, por lo tanto, el área crítica es:

$$\hat{A} = (2a + 2b + 2 * \pi * d) * h = 0.49 \text{ m}^2 \quad (6-32)$$

Tomando la fuerza total que llega al pilar tenemos que la tensión se calcula como:

$$\tau_{sd} = \frac{F_{sd}}{\hat{A}} = \frac{218.5 \text{ kN}}{0.49 \text{ m}^2} = 0.45 \text{ MPa} \quad (6-33)$$

Se debe cumplir que $\tau_{sd} < \tau_{fd}$, por lo tanto, el punzonamiento también se cumple verificando de esta manera.

6.7.5 Estado límite de servicio

Según el Model Code 2010 se considera útil la verificación de ELS en los casos de endurecimiento luego de la fisuración cómo es en este caso, limitando las tensiones en servicio (σ_t) según:

$$\sigma_t \leq 0.6 * f_{Fts} \tag{6-34}$$

Siendo f_{Fts} la resistencia definida anteriormente. En este caso:

$$\sigma_t \leq 1.54 \text{ MPa} \tag{6-35}$$

Por lo tanto, a partir de esta tensión se puede calcular el momento que puede resistir la losa sin fisurar:

$$M_t = 15 \text{ kNm/m} \tag{6-36}$$

En la Figura 6-14 se pueden ver los momentos positivos según la dirección x en la losa, donde se puede notar que se cumple esta condición, alcanzando este valor puntualmente. En la Figura 6-15, se pueden ver momentos negativos en la losa, y no se cumple la condición pero, estas zonas ya deben ser reforzadas para poder cumplir con las condiciones mecánicas y se debe colocar armadura superior. Teniendo esto en cuenta, la fisuración estará controlada.

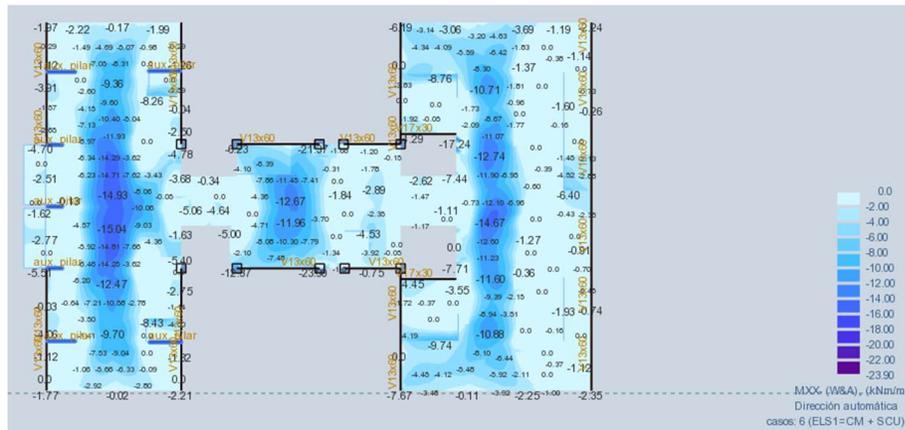


Figura 6-14 Momento positivo según x en estado límite de servicio



Figura 6-15 Momento negativo según x en estado límite de servicio

6.7.5.1 Estado límite de deformaciones

Para el estado límite de deformaciones se tiene en cuenta que los momentos en estado límite de servicio no alcanzan el momento de fisuración. Esto quiere decir que el material trabaja en el tramo elástico y se puede tomar el modelo lineal para calcular las deformaciones. Se limita la flecha a L/250

cómo establece el Model Code 2010 y como establecen la mayoría de las normas para losas estructurales.

Para el cálculo de la flecha total a tiempo infinito (δ_{tot}) se toma en cuenta la flecha instantánea del modelo elástico lineal de la losa (δ_{inst}) y un coeficiente de fluencia (φ) de 2. Por lo tanto, la flecha total es:

$$\delta_{tot} = \delta_{inst}(1 + \varphi) = 3\delta_{inst} \quad (6-37)$$

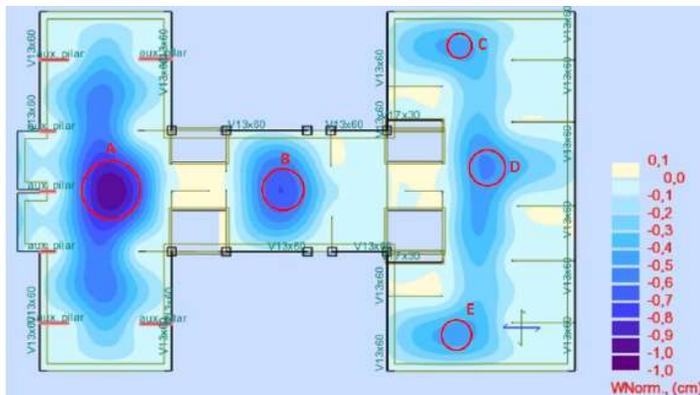


Figura 6-16 Deformaciones en modelo elástico lineal de la losa

Como se puede ver en la Figura 6-16 la flecha instantánea máxima de la losa es de 1 cm en la zona A.

Por lo tanto:

$$\delta_{inst} = 1 \text{ cm} \quad (6-38)$$

$$\delta_{tot} = 3\delta_{inst} = 3 \text{ cm} \quad (6-39)$$

Si se toma una flecha admisible de $\frac{L}{250}$, se realiza la verificación:

$$\delta_{adm} = \frac{L}{250} = \frac{1041}{250} \text{ cm} = 4.16 \text{ cm} > 3 \text{ cm} \quad (6-40)$$

6.7.5.2 Armadura de integridad estructural

Las normativas norteamericanas prevén una armadura de colapso anti-progresivo o de integridad estructural en aquellas losas sostenidas por pilares aislados. La misma se coloca uniendo los pilares y su rol es evitar el colapso general de la estructura en caso de daño en los soportes y que este colapso sea confinado a una zona pequeña. En este caso la losa tiene vigas laterales que unen a todos los pilares entre ellos y que ayuda con la fuerza del viento. Por este motivo no es necesario colocar este tipo de armaduras.

6.8 Comparación

En la Tabla 6-4 se pueden ver los puntos importantes de comparación entre el HRFA y el hormigón convencional. Como primer aspecto a notar es la diferencia de espesor entre las losas, con 17 cm el hormigón armado convencional y 22 cm el HRFA. Luego, se puede ver la siguiente gran diferencia y es que el HRFA permitiría prescindir de la armadura inferior y punzonado. Por último, se tiene que ningún método nos exime de colocar armadura superior para los momentos negativos, sólo diferenciándose en la cuantía ya que el HRFA tiene más resistencia en este sentido.

Comparación	Hormigón reforzado con fibras de acero	Hormigón convencional
Espesor (cm)	22	17
Armadura momento positivo	No	Sí
Armadura momentos negativos	Sí	Sí
Armadura integridad estructural	No	No
Armadura de punzonado	No	Sí

Tabla 6-4 Comparación entre HRFA y Hormigón convencional

6.9 Conclusiones

A continuación, se presentan las conclusiones de esta sección. Nuevamente se remarca que los cálculos realizados fueron a modo de ejercicio y que para adaptar las recomendaciones a la estructura propuesta fueron necesarias varias hipótesis y suposiciones que pueden no cumplirse en la realidad. Hay que tener en cuenta que para realizar estructuras con HRFA el calculista lo debe tener en cuenta al momento del diseño de la misma. En primer lugar, se tiene que el cálculo de la estructura con hormigón convencional se realizó con un método elástico y el de hormigón con fibras con el método de formación de rótulas plásticas. También se hace la suposición para el cálculo de la losa con HRFA que los momentos positivos y negativos son iguales, lo que, agregándole la armadura negativa no se cumple y, por tanto, las rótulas negativas se forman a momentos más altos. Algo más a tener en cuenta es que las recomendaciones de la ACI 544.6r-15 supone los apoyos son puntuales y en este proyecto, los pilares son pantallas alargadas que no cumplen con esta hipótesis y que sin dudas son más beneficiosas que apoyos puntuales. Con estas dos observaciones se puede concluir que hay una infravaloración del HRFA y el espesor del mismo seguramente sería menor para esta estructura. Más allá de esto, una disminución del espesor de la losa, aunque sería bueno, no es la ventaja más importante del HRFA, sino la posibilidad de prescindir del hierro inferior ahorrando tiempo y mano de obra. Aunque la losa de HRFA tiene un espesor 29% mayor, nos permite prescindir de la mayoría de la armadura proyectada en hormigón convencional. Esto trae aparejado una reducción importante en la mano de obra, pero también un aumento de cargas a la estructura.

7 Conclusiones generales

En este apartado se disponen las conclusiones generales de la investigación, así como también al planteo de varias líneas de investigación pertinentes para el estudio del HRFA.

Los resultados que se obtuvieron de la comparación del ensayo MVD y el ensayo de flexión de vigas son prometedores. Con los resultados ya normalizados, se rectifica el factor de 1,35 que propone Segura-Castillo et al., (2022). Aplicando este valor se obtiene un 8% por encima de f_{R1} y 4% por debajo de f_{R3} . Los resultados teniendo en cuenta el promedio de todos los testigos ensayados a flexión arrojan valores con más error, pero, no son representativos del trabajo realizado, ya que, todos los ensayos MVD fueron realizados evaluando la flexión media de la pieza. Una línea de investigación puede ser la extracción de testigos de viga para hacer ensayos a flexión media y tener una muestra mayor de datos.

Se logró plantear una función que vincula el ancho de fisura en la garganta (CTOD) con el desplazamiento del pistón de la prensa para el ensayo MVD en HRFA con endurecimiento. Se obtuvieron errores menores al 5% para f_{R1} y errores menores al 8% para f_{R3} , en general del lado de la seguridad. Este es un gran avance permitiendo realizar el ensayo MVD sin necesidad de medir el CTOD con instrumentos como el LVDT. Es una simplificación de un ensayo que, ya de por sí es mucho más sencillo que el de flexión en vigas y, permitirá realizar un control de calidad de HRFA en laboratorios con recursos limitados.

Por otro lado, el ensayo MVD modificado no pudo ejecutarse ya que no se logró la adherencia entre el dispositivo y los testigos. Es un cambio prometedor a un ensayo (MVD) que ya simplifica gran parte de la problemática del control de calidad del HRFA. Como línea de investigación a futuro es pertinente ahondar en la búsqueda de métodos para lograr una mayor adherencia que permita realizar este ensayo. Todo esto sin perder de vista que el nuevo ensayo debe conllevar una simplificación del anterior para que sea implementado.

La construcción del sensor magnético para la determinación de la cantidad y orientación preferencial de las fibras arrojó los siguientes resultados. Encontramos una relación entre la cantidad de fibras y la diferencia de inductancia obtenida con el sensor, concluyendo que, a mayor cantidad de fibras, mayor diferencia de inductancia con el vacío. Esto permite identificar lugares con diferentes cantidades de fibras en una losa ya construida, cuestión más que interesante para el control de calidad en estructuras ya construidas. También se encontró una relación entre la medida de inductancia y la posición de las fibras con respecto a la bobina. Lo que permite estimar la orientación preferencial de las fibras. La interpretación de las lecturas realizadas con la misma en 6 testigos extraídos, no se condice con los resultados obtenidos luego del ensayo MVD. Esto puede deberse a que el sensor tiene un alcance de entre 1 y 2 centímetros de profundidad y, por lo tanto, las medidas pueden no ser representativas de la cantidad de fibras que hay en el resto de la sección. Por estos motivos queda claro que hay que continuar con más experimentos con este sensor. Como línea de investigación futura en el ensayo inductivo se debería encontrar un dispositivo que se pueda variar la frecuencia para así obtener la frecuencia de resonancia del sensor. Luego, se deben hacer medidas con el sensor en su frecuencia de resonancia para saber si el mismo tiene un mejor funcionamiento. También se pueden hacer piezas con diferentes densidades de fibras para encontrar una relación entre la medida del sensor y la densidad exacta de la pieza.

Las conclusiones obtenidas en la parte de cálculo fueron satisfactorias. Aunque se tomaron varias hipótesis, del lado de la seguridad, es posible sustituir totalmente la armadura inferior de una losa y la armadura de punzonado, no siendo eficiente intentar sustituir la armadura negativa. Es necesario continuar con estos ejercicios para promover el cálculo de losas elevadas con HRFA, esto permitiría una mayor eficiencia en la construcción. Por otro lado, no se adentró en los costos totales ni en el cálculo total de la estructura por lo que no se puede asegurar que el costo total de una obra sería más bajo si se construyese con HRFA, pero variedad de estudios realizados en otros países apuntan a que sí.

8 Bibliografía

- ACI Committee 544 & American Concrete Institute. (2015). *Report on the Design and Construction of Steel Fiber-Reinforced Concrete Elevated Slabs*. American Concrete Institute.
- Bernal, E. S. (s. f.). *SUSTITUCIÓN DEL HORMIGÓN ARMADO POR HRFA EN FORJADOS CONVENCIONALES DE EDIFICACIÓN*. 99.
- Cañette, P., Eguren, M., & García, M. (2017). *Diseño y control del Hormigón Reforzado con Fibras en Uruguay*. 201.
- Destrée, X. (s. f.-a). *STEEL FIBRE AS ONLY REINFORCING IN FREE SUSPENDED ONEWAY AND TWO WAYS ELEVATED SLABS : DESIGN CONCLUSIONS BASED UPON FULL SCALE TESTING RESULTS*. 29.
- Destrée, X. (s. f.-b). *STRUCTURAL APPLICATION OF STEEL FIBRE AS ONLY REINFORCING IN FREE SUSPENDED ELEVATED SLABS : CONDITIONS - DESIGN - EXAMPLES*. 10.
- Faifer, M., Ottoboni, R., Toscani, S., & Ferrara, L. (2011). Nondestructive Testing of Steel-Fiber-Reinforced Concrete Using a Magnetic Approach. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 60(5), 1709-1717. <https://doi.org/10.1109/TIM.2010.2090059>
- Ferrara, L., Cremonesi, M., Faifer, M., Toscani, S., Sorelli, L., Baril, M.-A., Réthoré, J., Baby, F., Toutlemonde, F., & Bernardi, S. (2017). Structural elements made with highly flowable UHPFRC: Correlating computational fluid dynamics (CFD) predictions and non-destructive survey of fiber dispersion with failure modes. *Engineering Structures*, 133, 151-171. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.12.026>
- Ferrara, L., Faifer, M., & Toscani, S. (2012). A magnetic method for non destructive monitoring of fiber dispersion and orientation in steel fiber reinforced cementitious composites—part 1: Method calibration. *Materials and Structures*, 45(4), 575-589. <https://doi.org/10.1617/s11527-011-9793-y>
- García, Á., Morán, F., & Arroyo, J. (2009). *Jiménez Montoya Hormigón Armado* (15.ª ed.).
- González, D., Sfeir, V., Rippe, G., & Segura-Castillo, L. (2020). *Incidencia de la Orientación y Distribución de Fibras en el Comportamiento de Losas Elevadas Ejecutadas con HRFA*. 111.

- Infante, S., Porcelli, M., & Silvera, A. (2019). *Estudio experimental y numérico de elementos estructurales de Hormigón Reforzado con Fibras*. 98.
- Model Code 2010. 1*. (2010). International Federation for Structural Concrete (fib).
- Nunes, S., Pimentel, M., & Carvalho, A. (2016a). Non-destructive assessment of fibre content and orientation in UHPFRC layers based on a magnetic method. *Cement and Concrete Composites*, 72, 66-79. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.05.024>
- Nunes, S., Pimentel, M., & Carvalho, A. (2016b). Non-destructive assessment of fibre content and orientation in UHPFRC layers based on a magnetic method. *Cement and Concrete Composites*, 72, 66-79. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.05.024>
- Nunes, S., Pimentel, M., Sine, A., & Mokhberdorran, P. (2021). Key Factors for Implementing Magnetic NDT Method on Thin UHPFRC Bridge Elements. *Materials*, 14(16), 4353. <https://doi.org/10.3390/ma14164353>
- Nunes, S., Ribeiro, F., Carvalho, A., Pimentel, M., Brühwiler, E., & Masse, M. B. (s. f.). *Avaliação não-destrutiva da dosagem e orientação das fibras em camadas de UHPFRC*. 21.
- Rodríguez Llaves, I. (2014). *Sistema inductivo para la detección de la orientación de fibras de acero embebidas en estructuras de hormigón*. 110.
- Segura-Castillo, L., García, N., Figueredo, D., Clavijo, A., González, E., Muniz, B., Rodríguez, I., & Rodríguez, G. (2022). *Recent FRC Developments in Uruguay: Quality Control, Durability and Three Structural Applications*. 10.
- Segura-Castillo, L., Monte, R., & de Figueiredo, A. D. (2017). *Ensayo "Montevideo": Un nuevo ensayo, simple y económico para la caracterización del hormigón reforzado con fibras*. 11.
- Segura-Castillo, L., Monte, R., & de Figueiredo, A. D. (2018). Characterisation of the tensile constitutive behaviour of fibre-reinforced concrete: A new configuration for the Wedge Splitting Test. *Construction and Building Materials*, 192, 731-741. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.101>
- Xavier Destrée Consultant, Structural Engineer, La Hulpe, Belgium. Jürgen Mandl Research and Development ArcelorMittal Bissen, Bissen, Luxembourg—*PDF Free Download.pdf*. (s. f.).

9 Anexos

9.1 Conteo de fibras en ensayo MVD

Luego de realizado el ensayo MVD, se contabilizaron las fibras de cada cara de la sección de rotura. En la Figura 9-1 se muestra como es el esquema de cuadrantes para el conteo de fibras.

Sección de rotura de nomenclatura menor			Sección de rotura de nomenclatura mayor		
Cara superior de losa			Cara superior de losa		
A1	B1	C1	C1	B1	A1
A2	B2	C2	C2	B2	A2
A3	B3	C3	C3	B3	A3
Cara de fondo de losa			Cara de fondo de losa		

Figura 9-1 Esquema de nomenclatura de las secciones de rotura para el conteo de fibras

Nombre		1-A-23	2-A-23	3-A-12	4-A-12	5-A-23	6-A-12	7-A-23	8-A-23	9-A-12	11-A-23	12-A-12
Conteo de fibras total	A1 (un)	31	29	37	16	17	51	23	14	17	60	71
	A2 (un)	29	32	36	20	16	26	21	12	29	46	38
	A3 (un)	37	29	35	14	16	17	16	31	35	48	24
	B1 (un)	28	25	36	32	21	34	29	31	19	30	27
	B2 (un)	12	22	31	24	29	37	14	22	32	15	23
	B3 (un)	30	24	34	16	25	28	21	37	22	20	16
	C1 (un)	19	44	31	44	23	43	32	51	32	10	24
	C2 (un)	29	26	29	34	30	35	40	28	39	12	23
	C3 (un)	17	22	25	50	31	42	17	43	36	22	26
Conteo de fibras mitad CARA MENOR	A1 (un)	18	15	18	8	7	29	10	9	9	35	38
	A2 (un)	12	18	11	9	7	17	9	6	17	25	19
	A3 (un)	17	12	23	7	10	13	7	14	16	24	12
	B1 (un)	15	12	22	19	12	19	13	17	10	12	14
	B2 (un)	3	9	10	10	16	23	6	11	16	8	12
	B3 (un)	13	12	21	7	11	19	8	20	11	11	8
	C1 (un)	12	20	18	21	18	20	14	20	11	5	14
	C2 (un)	13	9	14	15	16	20	26	11	20	4	15
	C3 (un)	6	9	10	31	15	11	14	17	20	7	19
Conteo de fibras mitad CARA MAYOR	A1 (un)	13	14	19	8	10	22	13	5	8	25	33
	A2 (un)	17	14	25	11	9	9	12	6	12	21	19
	A3 (un)	20	17	12	7	6	4	9	17	19	24	12
	B1 (un)	13	13	14	13	9	15	16	14	9	18	13
	B2 (un)	9	13	21	14	13	14	8	11	16	7	11
	B3 (un)	17	12	13	9	14	9	13	17	11	9	8
	C1 (un)	7	24	13	23	5	23	18	31	21	5	10
	C2 (un)	16	17	15	19	14	15	14	17	19	8	8
	C3 (un)	11	13	15	19	16	31	3	26	16	15	7

Nombre		Testigo 1	Testigo 2	Testigo 3	Testigo 4	Testigo 5	Testigo 6
Conteo de fibras total	A1 (un)	8	30	16	14	12	13
	A2 (un)	27	33	17	27	12	16
	A3 (un)	54	41	20	48	18	34
	B1 (un)	16	13	21	7	19	13
	B2 (un)	22	26	17	17	7	11
	B3 (un)	37	17	14	24	7	23
	C1 (un)	21	12	20	3	8	9
	C2 (un)	27	20	13	23	10	6
	C3 (un)	31	17	23	21	11	22
Conteo de fibras mitad CARA MENOR	A1 (un)	7	19	11	4	4	10
	A2 (un)	18	15	9	10	4	6
	A3 (un)	29	18	8	24	10	13
	B1 (un)	10	8	11	2	10	3
	B2 (un)	8	14	6	7	7	8
	B3 (un)	19	7	5	10	6	11
	C1 (un)	10	7	10	3	5	6
	C2 (un)	6	11	7	7	5	5
	C3 (un)	11	8	10	9	4	10
Conteo de fibras mitad CARA MAYOR	A1 (un)	1	11	5	10	8	3
	A2 (un)	9	18	8	17	8	10
	A3 (un)	25	23	12	24	8	21
	B1 (un)	6	5	10	5	9	10
	B2 (un)	14	12	11	10	0	3
	B3 (un)	18	10	9	14	1	12
	C1 (un)	11	5	10	0	3	3
	C2 (un)	21	9	6	16	5	1
	C3 (un)	20	9	13	12	7	12

9.2 Ensayo Montevideo Modificado

9.2.1 Introducción

A pesar de la simplicidad que aporta el ensayo Montevideo (MVD) al momento de estudiar la flexión en una pieza, en este proyecto se busca simplificar aún más la preparación de la pieza y a su vez no provocar con la entalla una disminución de la altura útil de la pieza. Esto permite ensayar la pieza en la misma dirección que en el ensayo a flexión, lo que en el caso del HRF es fundamental dada la distribución de las fibras.

Para esto se diseña un dispositivo metálico que consta de dos placas vinculadas con tornillos que se pueden ir ajustando para lograr un mejor rozamiento con la pieza a ensayar. Este dispositivo cumple la función de prensa y permite transmitir la fuerza horizontal de la cuña por rozamiento a la pieza. En la Figura 9-2 se puede ver el dispositivo.



Figura 9-2 Dispositivo para realizar el ensayo Montevideo Modificado.

9.2.2 Objetivos

En esta parte del proyecto se busca obtener un método más sencillo para el ensayo Montevideo, que permita ensayar la pieza en la misma dirección que se ensayó a flexión sin preocuparnos por la altura útil del mismo, obteniendo resultados que puedan ser más representativos de la correlación que existe entre el ensayo MVD y el ensayo a flexión.

9.2.3 Descripción del ensayo

Al igual que el ensayo MVD, el ensayo Montevideo Modificado busca generar una tracción indirecta a la pieza, en este caso a través del rozamiento que genera el dispositivo metálico, logrando así la separación de la pieza por la tracción generada.

La pieza no necesita ninguna preparación previa ya que no hay que hacer una entalla y por lo tanto basta con delinear por donde queremos que sea el centro de la falla es suficiente. Luego se coloca el dispositivo metálico que consta de dos partes, alineándolo con la línea dibujada anteriormente y dejando un espacio para que se pueda introducir la cuña. En este ensayo también se colocan los esquineros metálicos en los bordes del dispositivo metálico para reducir la fricción y el daño a la pieza y se coloca la macilla para lograr el mejor acomodamiento de los esquineros sobre el dispositivo. Por último, se coloca la cuña y el apoyo central para tener un único punto de apoyo como en el ensayo MVD.

9.2.4 Análisis del rozamiento entre el dispositivo y la pieza

Se hace un cálculo de la fuerza de rozamiento aproximada que se genera entre el dispositivo y la pieza. Para este cálculo se hacen algunas suposiciones de la rigidez de los materiales, del coeficiente de fricción que hay entre

ellos y se consideran los contactos en un solo punto. En la Figura 9-3 se muestra un testigo con el dispositivo para poder realizar el ensayo MVD modificado.

En la Figura 9-4 se muestra cómo la fuerza que hace la prensa a la cuña genera una reacción en cada parte del dispositivo. Luego, en la Figura 9-5, se muestra como se consideraron estas fuerzas, además se muestra la carga introducida por los tornillos del dispositivo a la pieza y, por último, la fuerza de rozamiento que reacciona ante la fuerza horizontal de la reacción.



Figura 9-3 Foto del dispositivo para el ensayo Montevideo modificado.

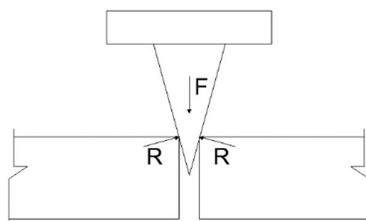


Figura 9-4 Introducción de la fuerza de la prensa en el dispositivo metálico.

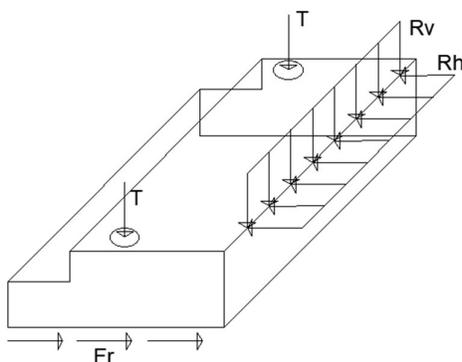


Figura 9-5 Esquema tridimensional adoptado.

Se intenta con esta parte del proyecto es saber cuál es la fuerza necesaria que debemos aplicar en el dispositivo para que el mismo no deslice con respecto al testigo. Primero se calcula la fuerza de la componente horizontal de la fuerza que ejerce la prensa. Para así obtener el valor mínimo que debe tener el módulo de la fuerza de rozamiento entre el dispositivo y la pieza. Luego de obtener el valor de la fuerza horizontal que genera la cuña se puede calcular

la fuerza de rozamiento mínima para que la pieza no deslice. Como sabemos el módulo de la fuerza de rozamiento se calcula según:

$$Fr = \mu N \tag{9-1}$$

Siendo:

- μ el coeficiente de rozamiento dispositivo-testigo
- N la fuerza directa que se aplica al dispositivo

Dado que el coeficiente de rozamiento es un valor muy difícil de comprobar, se harán suposiciones del mismo para saber en qué rangos se encuentra la fuerza que debemos aplicar en los tornillos. El valor de la directa en este caso es la suma de la componente vertical de la fuerza de la prensa (Rv) y la fuerza ejercida por los tornillos ($2T$). A continuación, se desarrollan los cálculos realizados para lograr resolver el problema que planteamos.

$$Rv = R \sin \theta \tag{9-2}$$

$$Rh = R \cos \theta \tag{9-3}$$

$$\sum V = 0 \text{ entonces, } F - 2Rv = 0. \text{ Por lo que: } F - 2R \sin \theta = 0 \tag{9-4}$$

$$Rh = R \cos \theta \text{ entonces, } Rh = \frac{F \cos \theta}{2 \sin \theta} = \frac{F}{2} \tan \theta = Fr, \text{ min} \tag{9-5}$$

Siendo:

- θ , el ángulo entre la cara de la cuña y la vertical (15°)

Luego la fuerza de rozamiento dispositivo-testigo:

$$Fr = \mu N = \mu (2t + Rv) \tag{9-6}$$

Por lo tanto, para que no haya deslizamiento se debe cumplir:

$$Rh = \frac{F}{2} \tan \theta \leq \mu (2T + Rv) \tag{9-7}$$

A continuación, se muestran los diferentes resultados obtenidos.

μ considerado	R_h (kN)	T_{min} (kN)
0.3	18.02	27.7
0.5	18.02	15.7
0.7	18.02	10.5

Tabla 9-1 Resultados obtenidos para carga de prensa de 10 kN.

μ considerado	R_h (kN)	T_{min} (kN)
0.3	27.04	41.5
0.5	27.04	23.5
0.7	27.04	15.7

Tabla 9-2 Resultados obtenidos para carga de prensa de 15 kN.

μ considerado	R_h (kN)	T_{min} (kN)
0.3	36.05	55.3
0.5	36.05	31.3
0.7	36.05	20.9

Tabla 9-3 Resultados obtenidos para carga de prensa de 20 kN.

Con estos resultados se puede apreciar que si se tiene un coeficiente de rozamiento de 0.3 se debe ejercer en los tornillos aproximadamente el doble de fuerza que ejerce la prensa y en caso de que el coeficiente de rozamiento sea 0.7 vemos que la fuerza en los tornillos es aproximadamente la misma que en la prensa. Creemos que estos números nos dan un buen punto de partida para saber el rango de fuerzas que se necesita aplicar.

En la *Tabla 9-4* Se muestra las diferentes tensiones que puede soportar un tornillo de 16 mm dependiendo de la tensión de rotura del material. Como se puede ver, las tensiones que es capaz de soportar el tornillo son más que suficientes para los rangos de fuerzas que tenemos en nuestro ensayo.

F_r (MPa)	T_r (kN)
294	59
392	79
490	99

Tabla 9-4 Fuerza de rotura para un tornillo de 16 mm para distintas tensiones de rotura.

En la *Figura 9-6* se puede ver el coeficiente de rozamiento entre dos superficies lisas de distintos materiales. Lo que nos puede dar una idea del coeficiente de rozamiento que existe entre nuestro dispositivo y el testigo.

Superficies en contacto	μ_s	μ_k
Cobre sobre acero	0.53	0.36
Acero sobre acero	0.74	0.57
Aluminio sobre acero	0.61	0.47
Caucho sobre concreto	1.0	0.8
Madera sobre madera	0.25-0.5	0.2
Madera encerada sobre nieve húmeda	0.14	0.1
Teflón sobre teflón	0.04	0.04
Articulaciones sinoviales en humanos	0.01	0.003

Figura 9-6 Coeficientes de rozamiento entre distintos materiales. Fuente: Serway R. A.. Física. Editorial McGraw-Hill. (1992)

9.2.5 Fase experimental

Luego de preparada la muestra se comienza con las pruebas experimentales. El inicio del ensayo es el esperado pero como se puede ver en la *Figura 9-7* en un momento comienza a haber desplazamiento sin aumento de la fuerza en la prensa, lo que indica que el dispositivo está deslizando con respecto al testigo. Por lo tanto, la fuerza de rozamiento que existe entre el dispositivo y el testigo no es suficiente.



Figura 9-7 Gráfico donde se puede apreciar el deslizamiento de la pieza

Con estos resultados se decide hacer que la pieza metálica tenga una superficie más rugosa como se puede ver en la Figura 9-8 y también rallar el testigo con una lima metálica, hacerle pequeños orificios con un talado, como se puede ver en la Figura 9-9 y colocarle resina epoxi para que la misma tenga un mejor comportamiento a fricción como se puede ver en la Figura 9-10.



Figura 9-8 Superficie modificada del dispositivo metálico.

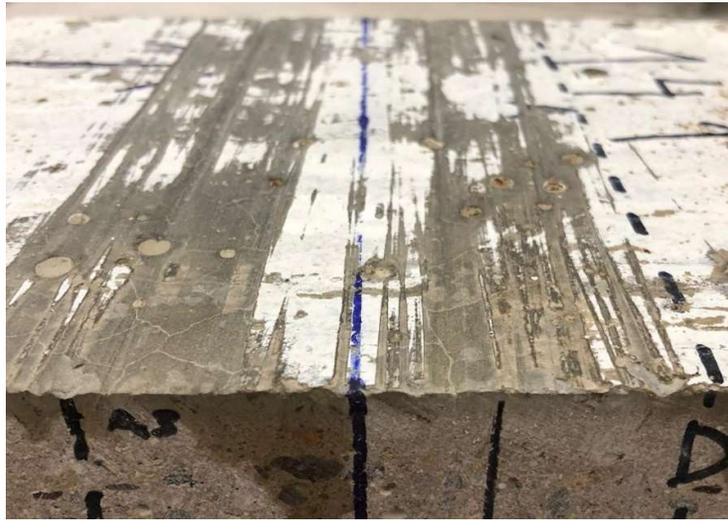


Figura 9-9 Mejora de la rugosidad en testigo.



Figura 9-10 Testigo con Poxilina para mejorar el rozamiento con la pieza metálica.

Luego de hacer estas preparaciones una parte de la pieza del dispositivo metálico se fracturó por lo que no se pudieron hacer más ensayos. Concluimos de todas maneras que, en principio, la preparación de la pieza no va a ser tan sencilla como era la idea al principio, pero queda una línea de investigación para poder validar esta forma de hacer el ensayo MVD.

9.3 Resultados de ensayo de bobina

9.3.1 Testigo 1

Testigo 1 cara superior	
Frecuencia (kHz)	10
Nro de vueltas	350
Lvacío (mH)	72,04

Punto	Dirección	L (mH)	% de cambio respecto a vacío
centro	x	73,74	2,4%
	y	73,50	2,0%
	1	73,77	2,4%
	2	73,55	2,1%
1	x	73,07	1,4%
	y	73,29	1,7%
	1	73,20	1,6%
	2	73,22	1,6%
2	x	73,90	2,6%
	y	73,50	2,0%
	1	73,70	2,3%
	2	73,89	2,6%
3	x	73,74	2,4%
	y	73,65	2,2%
	1	73,66	2,2%
	2	73,73	2,3%
4	x	73,39	1,9%
	y	73,07	1,4%
	1	73,15	1,5%
	2	73,34	1,8%

Testigo 1 cara inferior	
Frecuencia (kHz)	10
Nro de vueltas	350
Lvacío (mH)	72,04

Punto	Dirección	L (mH)	% de cambio respecto a vacío
centro	x	75,65	5,0%
	y	76,50	6,2%
	1	75,67	5,0%
	2	76,47	6,1%
1	x	75,39	4,7%
	y	77,11	7,0%
	1	76,01	5,5%
	2	76,02	5,5%
2	x	76,17	5,7%
	y	75,58	4,9%
	1	75,64	5,0%
	2	75,76	5,2%
3	x	75,05	4,2%
	y	75,64	5,0%
	1	75,32	4,6%
	2	75,44	4,7%
4	x	76,71	6,5%
	y	77,21	7,2%
	1	76,69	6,5%
	2	77,07	7,0%

9.3.2 Testigo 2

Testigo 2 cara superior	
Frecuencia (kHz)	10
Nro de vueltas	350
Lvacío	72,04

Testigo 2 cara inferior	
Frecuencia (kHz)	10
Nro de vueltas	350
Lvacío	72,04

Punto	Dirección	L (mH)	% de cambio respecto a vacío
centro	x	73,74	2,4%
	y	73,73	2,3%
	1	73,92	2,6%
	2	73,66	2,2%
1	x	73,92	2,6%
	y	73,77	2,4%
	1	74,09	2,8%
	2	73,6	2,2%
2	x	74,13	2,9%
	y	73,66	2,2%
	1	73,83	2,5%
	2	73,89	2,6%
3	x	73,78	2,4%
	y	73,82	2,5%
	1	73,73	2,3%
	2	73,88	2,6%
4	x	74,51	3,4%
	y	73,94	2,6%
	1	74,45	3,3%
	2	74,01	2,7%

Punto	Dirección	L (mH)	% de cambio respecto a vacío
centro	x	74,52	3,4%
	y	74,75	3,8%
	1	74,67	3,7%
	2	74,41	3,3%
1	x	74,9	4,0%
	y	75,31	4,5%
	1	75,23	4,4%
	2	75,09	4,2%
2	x	74,46	3,4%
	y	74,38	3,2%
	1	74,67	3,7%
	2	74,34	3,2%
3	x	74,84	3,9%
	y	74,46	3,4%
	1	74,68	3,7%
	2	74,38	3,2%
4	x	74,31	3,2%
	y	74,93	4,0%
	1	74,45	3,3%
	2	74,6	3,6%

9.3.3 Testigo 3

Testigo 3 cara superior	
Frecuencia (kHz)	10
Nro de vueltas	350
Lvacío	72,02

Testigo 3 cara inferior	
Frecuencia (kHz)	10
Nro de vueltas	350
Lvacío	72,02

Punto	Dirección	L (mH)	% de cambio respecto a vacío
centro	x	74,63	3,6%
	y	74,21	3,0%
	1	74,24	3,1%
	2	74,37	3,3%
1	x	74,85	3,9%
	y	74,05	2,8%
	1	73,89	2,6%
	2	74,95	4,1%
2	x	74,73	3,8%
	y	74,52	3,5%
	1	74,47	3,4%
	2	74,66	3,7%
3	x	74,45	3,4%
	y	74,13	2,9%
	1	74,19	3,0%
	2	74,09	2,9%
4	x	74,27	3,1%
	y	74	2,7%
	1	74,27	3,1%
	2	73,88	2,6%

Punto	Dirección	L (mH)	% de cambio respecto a vacío
centro	x	74,89	4,0%
	y	75,6	5,0%
	1	74,64	3,6%
	2	75,79	5,2%
1	x	75,08	4,2%
	y	75,8	5,2%
	1	74,79	3,8%
	2	76,06	5,6%
2	x	75,26	4,5%
	y	74,89	4,0%
	1	75,19	4,4%
	2	74,87	4,0%
3	x	74,59	3,6%
	y	74,98	4,1%
	1	74,84	3,9%
	2	74,62	3,6%
4	x	74,73	3,8%
	y	75,13	4,3%
	1	74,59	3,6%
	2	75,01	4,2%

9.3.4 Testigo 4

Testigo 4 cara superior	
Frecuencia (kHz)	10
Nro de vueltas	350
Lvacío	72,04

Punto	Dirección	L (mH)	% de cambio respecto a vacío
centro	x	73,41	1,9%
	y	73,35	1,8%
	1	73,49	2,0%
	2	73,13	1,5%
1	x	73,03	1,4%
	y	73,28	1,7%
	1	73,19	1,6%
	2	73,15	1,5%
2	x	73,64	2,2%
	y	73,43	1,9%
	1	73,87	2,5%
	2	73,19	1,6%
3	x	73,86	2,5%
	y	73,54	2,1%
	1	73,92	2,6%
	2	73,5	2,0%
4	x	73,39	1,9%
	y	73,53	2,1%
	1	73,38	1,9%
	2	73,42	1,9%

Testigo 4 cara inferior	
Frecuencia (kHz)	10
Nro de vueltas	350
Lvacío	72,04

Punto	Dirección	L (mH)	% de cambio respecto a vacío
centro	x	75,73	5,1%
	y	76,21	5,8%
	1	76,43	6,1%
	2	75,86	5,3%
1	x	75,89	5,3%
	y	76,45	6,1%
	1	75,97	5,5%
	2	76,15	5,7%
2	x	75,85	5,3%
	y	76,50	6,2%
	1	75,86	5,3%
	2	76,33	6,0%
3	x	75,57	4,9%
	y	75,61	5,0%
	1	76,16	5,7%
	2	75,2	4,4%
4	x	76,27	5,9%
	y	76,40	6,1%
	1	76,27	5,9%
	2	76,46	6,1%

9.3.5 Testigo 5

Testigo 5 cara superior	
Frecuencia (kHz)	10
Nro de vueltas	350
Lvacío	72,02

Testigo 5 cara inferior	
Frecuencia (kHz)	10
Nro de vueltas	350
Lvacío	72,02

Punto	Dirección	L (mH)	% de cambio respecto a vacío
centro	x	74,28	3,1%
	y	74,05	2,8%
	1	74,63	3,6%
	2	73,85	2,5%
1	x	74,16	3,0%
	y	73,89	2,6%
	1	74,37	3,3%
	2	73,9	2,6%
2	x	73,96	2,7%
	y	73,58	2,2%
	1	73,87	2,6%
	2	73,84	2,5%
3	x	74,05	2,8%
	y	74,78	3,8%
	1	74,03	2,8%
	2	73,82	2,5%
4	x	73,94	2,7%
	y	74,16	3,0%
	1	74,28	3,1%
	2	73,77	2,4%

Punto	Dirección	L (mH)	% de cambio respecto a vacío
centro	x	75,81	5,3%
	y	76,05	5,6%
	1	75,8	5,2%
	2	75,93	5,4%
1	x	75,12	4,3%
	y	75,63	5,0%
	1	76,35	6,0%
	2	75,33	4,6%
2	x	75,83	5,3%
	y	76,60	6,4%
	1	76,27	5,9%
	2	75,41	4,7%
3	x	75,67	5,1%
	y	75,26	4,5%
	1	75,67	5,1%
	2	75,4	4,7%
4	x	75,41	4,7%
	y	76,17	5,8%
	1	76,51	6,2%
	2	75,03	4,2%

9.3.6 Testigo 6

Testigo 6 cara superior	
Frecuencia (kHz)	10
Nro de vueltas	350
Lvacío	72,02

Punto	Dirección	L (mH)	% de cambio respecto a vacío
centro	x	72,65	0,9%
	y	72,89	1,2%
	1	72,8	1,1%
	2	72,6	0,8%
1	x	72,62	0,8%
	y	72,72	1,0%
	1	72,71	1,0%
	2	72,67	0,9%
2	x	72,65	0,9%
	y	73,17	1,6%
	1	72,9	1,2%
	2	72,83	1,1%
3	x	72,61	0,8%
	y	72,93	1,3%
	1	72,7	0,9%
	2	72,75	1,0%
4	x	72,62	0,8%
	y	72,76	1,0%
	1	72,61	0,8%
	2	72,73	1,0%

Testigo 6 cara inferior	
Frecuencia (kHz)	10
Nro de vueltas	350
Lvacío	72,02

Punto	Dirección	L (mH)	% de cambio respecto a vacío
centro	x	76,30	5,9%
	y	76	5,5%
	1	75,91	5,4%
	2	75,49	4,8%
1	x	75,69	5,1%
	y	75,70	5,1%
	1	75,47	4,8%
	2	75,03	4,2%
2	x	75,83	5,3%
	y	75,76	5,2%
	1	76,64	6,4%
	2	75,27	4,5%
3	x	75,71	5,1%
	y	75,05	4,2%
	1	75,15	4,3%
	2	75,08	4,2%
4	x	75,54	4,9%
	y	76,52	6,2%
	1	75,65	5,0%
	2	75,95	5,5%