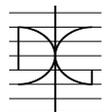


**Estudio técnico experimental de una placa de hormigón reforzada con fibras de acero apoyada en el suelo aplicado en obras portuarias**

Por:  
José Gabriel Guzmán González

Mayo 2015

Autor / Author: José Gabriel Guzmán González		Fecha / Date: mayo de 2015	
Título / Title Estudio técnico experimental de una placa de hormigón reforzada con fibras de acero apoyada en el suelo aplicado en obras portuarias			
Directores del trabajo / Supervisores: Dr. Pedro Serna Ros		Código / Code: CST/MIH-XX	Nº páginas / Pages: 83
Departamento / Departament: INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN Y PROYECTOS DE INGENIERÍA CIVIL			
Universidad / University: UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA			 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
Palabras clave / Keywords: Hormigón con fibras de acero, Pavimentos rígidos, Puertos			
Código Unesco: 3305-05, 3305-10, 3305-11			

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar agradezco a mi familia que siempre me ha apoyado incondicionalmente, especialmente a mi abuela Doña Deysi que me ha enseñado que todo en la vida se puede lograr con dedicación y empeño.

A mi director de tesis Pedro Serna, por su orientación, enseñanza, ayuda y sobre todo paciencia para desarrollar esta tesis de master.

Al personal técnico del Laboratorio de Hormigón del Departamento de Ingeniería de la Construcción y de Proyectos de Ingeniería Civil de la UPV, por su colaboración y ayuda en el desarrollo de la fase experimental de este proyecto.

A mis amigos Elvis, Arismendi, Henry, Joan, Geovanni, Martica, Mao y Mabel por haberse convertido en mi segunda familia y estar ahí en todos los momentos en estas tierras lejanas de mis orígenes. Sin ustedes mi estadía en España no hubiese sido la misma.

## Índice

<b>1</b>	<b>Introducción.....</b>	<b>5</b>
1.1	Objetivos .....	6
1.2	Estructura del documento.....	6
<b>2</b>	<b>Estado del arte.....</b>	<b>7</b>
<b>2.1</b>	<b>El hormigón reforzado con fibras.....</b>	<b>7</b>
2.1.1	Definición.....	7
2.1.2	Tipos de fibras.....	8
2.1.3	El hormigón reforzado con fibras de acero .....	10
2.1.4	Componentes del hormigón reforzado con fibras de acero .....	10
2.1.4.1	Cemento.....	10
2.1.4.2	Agua .....	11
2.1.4.3	Áridos .....	11
2.1.4.4	Aditivos .....	12
2.1.4.5	Adiciones.....	12
2.1.4.6	Fibras de acero .....	13
2.1.5	Características mecánicas del hormigón reforzado con fibras .....	14
2.1.5.1	Resistencia a tracción .....	14
2.1.5.2	Resistencia a compresión .....	15
2.1.6	Resistencia a flexotracción .....	16
2.1.6.1	Resistencia a cargas dinámicas (impacto) .....	17
2.1.6.2	Tenacidad.....	17
2.1.6.3	Cortante y Torsión.....	18
2.1.6.4	Punzonamiento .....	18
2.1.6.5	Adherencia fibras-matriz .....	19
2.1.7	Durabilidad del hormigón reforzado con fibras de acero .....	19
2.1.8	Ventajas del hormigón reforzado con fibras de acero .....	20
<b>2.2</b>	<b>Pavimentos de hormigón reforzado con fibras apoyados sobre el suelo .....</b>	<b>20</b>
2.2.1	Definición.....	20
2.2.2	Antecedentes .....	21
2.2.3	Diseño .....	23
2.2.3.1	Explanada y sub-base.....	23
2.2.3.2	Hipótesis de diseño .....	26

2.2.3.2.1	Hipótesis de Westergaard .....	26
2.2.3.2.2	Líneas de rotura .....	28
2.2.3.3	Instrucciones de diseño de pavimentos .....	32
2.2.3.3.1	Recomendaciones para el proyecto y construcción de pavimentos portuarios (ROM 4.1) .....	33
2.2.3.3.2	Technical Report 34 edition 2003 “ Concrete industrial Ground Floor” .....	34
2.2.4	Estudios previos de pavimentos de hormigón .....	35
<b>3</b>	<b><i>Programa experimental y metodología.....</i></b>	<b>37</b>
<b>3.1</b>	<b>Objetivos específicos .....</b>	<b>37</b>
<b>3.2</b>	<b>Desarrollo de programa experimental.....</b>	<b>37</b>
<b>3.3</b>	<b>Dosificación .....</b>	<b>39</b>
<b>3.4</b>	<b>Materiales a utilizar .....</b>	<b>39</b>
3.4.1	Cemento.....	39
3.4.2	Agua .....	40
3.4.3	Áridos .....	40
3.4.4	Fibras .....	40
3.4.5	Aditivo.....	40
<b>3.5</b>	<b>Ensayos de caracterización del hormigón.....</b>	<b>41</b>
3.5.1	Ensayo de caracterización del hormigón en estado fresco .....	41
3.5.2	Ensayos de caracterización del hormigón en estado endurecido .....	41
<b>3.6</b>	<b>Ensayos sobre los pavimentos de hormigón .....</b>	<b>41</b>
<b>3.7</b>	<b>Metodología.....</b>	<b>41</b>
3.7.1	Fabricación del hormigón.....	41
3.7.2	Fabricación de probetas.....	43
3.7.3	Fabricación de placas .....	44
3.7.4	Ensayos de caracterización .....	46
3.7.4.1	Ensayo de resistencia a compresión simple.....	46
3.7.4.2	Ensayo de resistencia por flexotracción a 3 puntos.....	48
3.7.5	Diseño de pórtico y condiciones de ensayo.....	50
3.7.5.1	Pórtico de carga .....	52
3.7.5.2	Metodología de ensayo de placa .....	53
3.7.5.3	Método de carga de la placa e instrumentaciones de medida .....	59
<b>4</b>	<b><i>Presentación y análisis de resultados.....</i></b>	<b>61</b>

<b>4.1</b>	<b>Ensayo de consistencia del hormigón por cono de Abrams</b> .....	<b>61</b>
<b>4.2</b>	<b>Ensayo de rotura por compresión</b> .....	<b>62</b>
<b>4.3</b>	<b>Ensayos de rotura por flexotracción a 3 puntos</b> .....	<b>63</b>
<b>4.4</b>	<b>Ensayo de placa</b> .....	<b>66</b>
4.4.1	Placa de hormigón reforzado con fibras de acero. ....	66
4.4.2	Placa de hormigón convencional .....	70
<b>4.5</b>	<b>Comparación de comportamiento de placas</b> .....	<b>75</b>
<b>4.6</b>	<b>Comparación con valores teóricos</b> .....	<b>76</b>
<b>5</b>	<b>Conclusiones</b> .....	<b>79</b>

Estudio técnico experimental de una placa de hormigón reforzada con fibras de acero apoyada en el suelo aplicado en obras portuarias

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco

## **1 Introducción**

El hormigón es uno de los materiales más usado en la actualidad en el mundo de la construcción de estructuras, este es capaz de tomar múltiples formas lo que lo hace muy atractivo, siendo relativamente económico en comparación con otros materiales disponibles. Este material cuenta con una gran resistencia a esfuerzos de compresión sin presentar grandes deformaciones, no siendo así para los esfuerzos a tracción cuya resistencia puede ser hasta 10 veces menor que la resistencia a compresión. Cabe destacar que el hormigón tiene un mecanismo de falla frágil, por lo que para contrarrestar este modo de falla se le introducen refuerzos los cuales pueden ser barras y mallas de acero, siendo estos los más comunes. Estos refuerzos se encargan de absorber los esfuerzos de tracción, controlar la fisuración y darle ductilidad al hormigón.

Se sabe que uno de las características principales del hormigón en estado endurecido es la aparición de fisuras ya sea por retracción, gradientes de temperatura o cargas, por lo que se han venido estudiando alternativas para controlar este fenómeno. La inclusión de fibras en el hormigón ha demostrado lo eficiente que son en el control de fisuración además pudiendo ser estas usadas como refuerzo estructural. El uso de fibras tiene como ventaja el refuerzo del hormigón en todas las direcciones, además de ser muy resistentes a cargas de impacto y fatiga por lo que es ideal para la fabricación de pavimentos de hormigón.

En este estudio se pretende estudiar el comportamiento que tienen los pavimentos de hormigón reforzados con fibras en el caso de obras portuarias, utilizando como base para el diseño las recomendaciones para el proyecto y construcción de pavimentos portuarios (ROM 4.1-94) y el Technical Report 34 "concrete industrial ground floor".

## 1.1 Objetivos

El objetivo general de este estudio es analizar un modelo en verdadera magnitud de un pavimento de hormigón con fibras de acero y compararlo con un pavimento de hormigón convencional equivalente.

Los objetivos específicos son:

- Diseñar un procedimiento de ensayo para evaluar pavimentos apoyados sobre el suelo que represente la realidad, utilizando muelles para representar la reacción del suelo.
- Comparar la capacidad de carga, características de deformación y modo de fallas de pavimentos de hormigón reforzado con fibras y de pavimentos de hormigón convencional. La comparación se hará con una dosificación de fibras de 40 kg/m<sup>3</sup>.
- Comparar los valores medidos de resistencia, deformación y modo de ruptura en pavimentos reforzados con fibras con valores calculados teóricamente con la hipótesis de líneas de rotura para pavimentos apoyados en el suelo (hipótesis de Meyerhof).

## 1.2 Estructura del documento

Este documento está organizado en cinco capítulos:

- Capítulo 1. Presenta la introducción del estudio, incluyendo objetivos generales y específicos.
- Capítulo 2. Contiene una revisión bibliográfica sobre el hormigón reforzado con fibras y los pavimentos de hormigón incluyendo hipótesis de diseño e instrucciones sobre la determinación del espesor del pavimento.
- Capítulo 3. Se describe el programa experimental elaborado para este estudio y la metodología seguida para desarrollar el ensayo de las placas.
- Capítulo 4. Se presentan los resultados y el análisis de los ensayos desarrollados en este estudio.
- Capítulo 5. Se presentan las conclusiones a las que han llevado los resultados de este estudio y las futuras líneas de investigación.

## **2 Estado del arte**

### **2.1 El hormigón reforzado con fibras**

#### **2.1.1 Definición**

Según la instrucción de hormigón estructural española “EHE-08” se define como hormigones reforzados con fibras (HRF) aquellos que incluyen en su matriz fibras cortas, discretas y aleatoriamente distribuidas en su masa, con el fin de mejorar algunas prestaciones ya sean en estado fresco, primeras edades o en estado endurecido.

A su vez el ACI 544.1R-96 considera el hormigón reforzado con fibras (HRF) aquel compuesto mayormente por cemento hidráulico, agregados y fibras discretas como refuerzo, siendo estas fibras producidas de materiales como el acero, vidrio y polímeros orgánicos (fibras sintéticas), también pudiendo estas ser de origen natural como el amianto y el yute.

El concepto en que se basa el HRF se puede decir que es similar en cierto punto al hormigón armado convencional, cosiendo las fisuras que puedan producirse y hubieran podido dejar la estructura fuera de servicio. La diferencia está en que en vez de unas pocas barras de diámetro relativamente grande y posicionadas en direcciones determinadas, en el HRF el refuerzo está constituido por muchas fibras de pequeña sección y orientadas aleatoriamente a las que se les transmiten los esfuerzos cuando la matriz del hormigón empieza a fisurarse.

Se ha observado que la incorporación de las fibras modifica el comportamiento no lineal del hormigón especialmente a tracción, cambiando el comportamiento frágil del hormigón convencional a dúctil, también impidiendo la apertura y propagación de fisuras aumentando la capacidad de mantener deformaciones sostenidas bajo acciones sin llegar al colapso, lo que se podría interpretar como un aumento de la tenacidad (habilidad que tiene el material para absorber energía durante la deformación plástica sin que se produzca la fractura) resultando el HRF muy adecuado para sobrellevar acciones dinámicas o prevenir situaciones donde se requiera el control de la fisuración. Este incremento de la tenacidad es una de las características más valoradas del HRF.

## 2.1.2 Tipos de fibras

De acuerdo a la función que tengan las fibras en el hormigón, se pueden clasificar en dos tipos:

- Fibras estructurales: son aquellas que proporcionan una mayor energía de rotura al hormigón en masa. Su contribución en los cálculos relativos a los estados límite últimos o de servicio y su empleo puede implicar la sustitución parcial o total de armadura en algunas aplicaciones.
- Fibras no estructurales: son aquellas que al incluirse en la masa del hormigón mejoran ciertas propiedades de este como: la resistencia al fuego, el control de la fisuración, resistencia a impacto, abrasión y otros, sin que se consideren en el cálculo de la sección de hormigón.

*La efectividad de la acción reforzante y la eficacia de la transmisión de tensiones por parte de las fibras dependen de muchos factores, pero especialmente, de la naturaleza, tipo y características geométricas de las fibras empleadas (Pujadas, 2008).*

En la Figura 1 se comparan, en un diagrama tensión-deformación, el módulo de elasticidad Young, la resistencia a tracción y la deformación de algunas de las principales fibras estructurales con los refuerzos de acero tradicionales (Byars, Waldron, Dejke, Demis, & Heddadin, 2003)

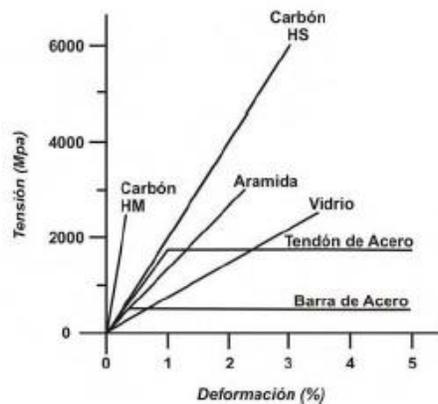


Figura 1. Propiedades de las fibras y de los refuerzos de acero (Byars et al., 2003)

De acuerdo con la naturaleza de las fibras estas pueden clasificarse en tres grandes grupos:

- Metálicas: aceros, aluminio, etc.
- Naturales: amianto (asbesto), celulosa, carbón.
- Sintéticas: nylon, polipropileno, poliácido nitrilo, alcohol de polivinil.

De acuerdo a la materia prima de procedencia estas fibras tienen diferentes características físicas y mecánicas, entre las más importantes para caracterizarlas tenemos:

- Físicas: el diámetro equivalente y longitud. El cociente de estos denominado relación de aspecto o de esbeltez “l/d” es el parámetro más característico ya que de su valor depende en buena medida la ductilidad y la tenacidad del hormigón fibroreforzado (Maccaferri, 2005).
- Mecánicas: resistencia a tracción, módulo de Young y alargamiento de rotura.

En la Figura 2 se puede observar algunas propiedades de diferentes fibras disponibles en el mercado.

Tipo de Fibra	Diámetro Equivalente (mm)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Resistencia a Tracción (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Alargamiento de Rotura (%)
Acrílico	0.02-0.35	1100	200-400	2	1.1
Asbesto	0.0015-0.02	3200	600-1000	83-138	1-2
Algodón	0.2-0.6	1500	400-700	4.8	3-10
Vidrio	0.005-0.15	2500	1000-2600	70-80	1.5-3.5
Grafito	0.008-0.009	1900	1000-2600	230-415	0.5-1
Aramida	0.01	1450	3500-3600	65-133	2.1-4
Nylon	0.02-0.4	1100	760-820	4.1	16-20
Poliéster	0.02-0.4	1400	720-860	8.3	11-13
Polipropileno	0.02-1	900-950	200-760	3.5-15	5-25
Polivinil alcohol	0.027-0.660	1300	900-1600	23-40	7-8
Carbón	-	1400	4000	230-240	1.4-1.8
Rayón	0.02-0.38	1500	400-600	6.9	10-25
Basalto	0.0106	2593	990	7.6	2.56
Polietileno	0.025-1	960	200-300	5.0	3
Sisal	0.08-0.3	760-1100	228-800	11-27	2.1-4.2
Coco	0.11-0.53	680-1020	108-250	2.5-4.5	14-41
Yute	0.1-0.2	1030	250-350	26-32	1.5-1.9
Acero	0.15-1	7840	345-3000	200	4-10

Figura 2. Tipos de fibras y principales propiedades físicas y mecánicas (ACI 544.5R-10, 2010)

El tipo de fibra a usarse en el hormigón viene básicamente condicionado por el uso que se le vaya a dar al hormigón como también al factor económico, la disponibilidad de estas y la durabilidad.

La dosificación de las fibras en el hormigón viene dada por el volumen que estas ocupan dentro del volumen total del hormigón (% de volumen de fibras/ volumen total del hormigón), aunque en algunos casos se usa la dosificación por peso de fibras por volumen de hormigón (kg de fibra/ m<sup>3</sup> hormigón).

### 2.1.3 El hormigón reforzado con fibras de acero

El hormigón reforzado con fibras de acero en lo adelante (HRFA) está constituido básicamente por los mismos componentes que un hormigón convencional más la incorporación de fibras de acero. La incorporación de estas fibras no solo altera las propiedades del hormigón endurecido sino que también modifica sus propiedades en estado fresco, como es el caso del asentamiento el cual puede disminuir entre 25-102mm respecto a un hormigón tradicional (ACI 544.1R-96, 2009), por lo que algunos de sus componentes se le exigen condiciones que a los hormigones tradicionales no son necesarias.

En función del volumen de fibras que se va a incorporar al hormigón y la geometría de estas, los componentes de este hormigón tendrán que sufrir ciertas modificaciones respecto al hormigón tradicional. Estas modificaciones limitan principalmente el tamaño máximo del árido, valores más bajos de la relación grava-arena, mayor cantidad de aditivos reductores de agua, mayor demanda de finos, entre otros.

La figura No.3 muestra el rango de proporciones para un HRFA según el ACI 544.1R-96 (2009).

Componentes de la mezcla	Tamaño máximo de árido (mm)		
	10	20	40
Cemento ( $\text{kg/m}^3$ )	350-600	300-530	280-415
Relación agua/cemento	0.35-0.45	0.35-0.50	0.35-0.55
% Árido fino-grueso	45-60	45-55	40-55
% Aire ocluido	4-8	4-6	4-5
Fibras conformadas ( $V_f$ %)	0.4-1.0	0.3-0.8	0.2-0.7
Fibras planas ( $V_f$ %)	0.8-2.0	0.6-1.6	0.4-1.4

Figura 3. Rango de proporciones para un HRFA (ACI 544.1R-96, 2009)

### 2.1.4 Componentes del hormigón reforzado con fibras de acero

#### 2.1.4.1 Cemento

El cemento es un componente decisivo en la docilidad del material en estado fresco y, posteriormente, en las características mecánicas del hormigón endurecido. Se puede emplear cualquier cemento que cumpla con los requisitos establecidos para un hormigón tradicional, siempre que sea capaz de proporcionar al hormigón las características que exige el proyecto.

Cuanto mayor sea el contenido de fibras y menor el tamaño máximo del árido, será necesario emplear una mayor cantidad de cemento con la finalidad de proporcionar más pasta.

### 2.1.4.2 Agua

Se puede emplear agua que cumpla los mismos requisitos exigidos en el caso de hormigones tradicionales armados, poniendo especial atención a los agentes que puedan afectar a las fibras como es el caso del contenido de cloruros para las fibras de acero, el cual puede producir corrosión. La Instrucción EHE 2008 establece, en el Anejo 14, que el aumento de la consistencia debido al uso de las fibras debe ser compensado siempre con la adición de aditivos reductores de agua, sin modificar la dosificación prevista de la misma.

### 2.1.4.3 Áridos

Además de cumplir los requerimientos de composición, resistencia, durabilidad, estabilidad y limpieza establecidos para el empleo en hormigones tradicionales, los áridos deben tener unos tamaños de partícula, granulometría y formas adecuadas para la elaboración de un HRFA.

Se pueden emplear áridos rodados o machacados, siendo más adecuado el empleo de los primeros (especialmente en la arena) ya que para valores idénticos de relación agua/cemento se obtiene mejor docilidad que con los áridos machacados.

Respecto del contenido de finos, cuando se adicionan fibras de acero es aconsejable incorporar mayor cantidad de finos para reducir el riesgo de segregación, aumentar la cohesión y favorecer la movilidad de las fibras.

La movilidad potencial de las fibras depende de la proporción de árido grueso y del tamaño máximo de árido (Figura 4). Cuanto mayor sean estos dos parámetros menor será la movilidad potencial de las fibras. (Hannant, 1978). La JSCE (Japan Society of Civil Engineers) plantea que el valor óptimo de tamaño máximo de árido sea inferior a la mitad de la longitud de la fibra.

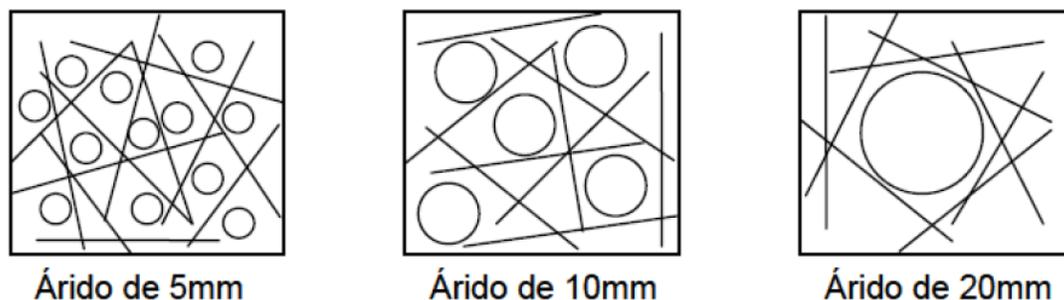


Figura 4. Efectos del tamaño del árido en la distribución de las fibras (Hannant, 1978).

Tamaños máximos de árido mayores que 20 mm no son recomendados, aunque en algunos estudios se han empleado áridos de hasta 38 mm con resultados satisfactorios (ACI 506.1R-08, 2008). Se recomienda también que el tamaño máximo de árido no supere:

- 2/3 de la longitud máxima de la fibra.
- 1/5 del lado menor del elemento.
- 3/4 de la distancia libre entre las barras de armado.

La relación árido grueso/árido fino (Gr/Ar) suele reducirse respecto de lo especificado para un hormigón tradicional con las mismas exigencias de resistencia, ya que un mayor volumen de mortero facilita la movilidad de las fibras. Se debe buscar una relación Gr/Ar óptima que proporcione la docilidad y resistencia deseadas.

#### **2.1.4.4 Aditivos**

En los HRFA se emplean principalmente aditivos reductores de agua (superfluidificantes) y aireantes. El Anejo 14 de la EHE 2008 establece que, cuando las fibras utilizadas sean metálicas, el ión cloruro total aportado por los componentes no debe exceder del 0.4% del peso del cemento.

Al adicionar fibras al hormigón (principalmente en altas proporciones), éste sufre una reducción sustancial de docilidad. Con el fin de no adicionar agua, ni afectar la resistencia y durabilidad esperadas, se emplean superfluidificantes.

De cualquier manera, si se pretende hacer muy fluido un hormigón con un volumen de fibras alto y no se controla adecuadamente la granulometría de los áridos y la distribución de las fibras en el hormigón, puede producirse apelotonamiento (erizos).

Cuando los HRFA van a estar sometidos a ciclos hielo-deshielo, todas las prácticas conocidas para el hormigón tradicional son aplicables, por lo que el uso de un aditivo aireante es una necesidad.

Ensayos previos a la puesta en obra son indispensables sobre todo cuando se combinen adiciones, aditivos y fibras, ya que la efectividad de los componentes al combinarse es desconocida (Massicotte, Degrange, & Dzeletovic, 2000).

#### **2.1.4.5 Adiciones**

Las adiciones usualmente empleadas en los HRFA son materiales puzolánicos tales como puzolanas naturales, cenizas volantes y humo de sílice. La adición de estos materiales se hace con el fin de reducir la permeabilidad del hormigón, aumentar la durabilidad, mejorar la cohesión

del material y en consecuencia la adherencia fibra-matriz, controlar la retracción, disminuir el riesgo de segregación y, en el caso particular de los hormigones proyectados, disminuir el rebote. Por todo esto y por la formación de silicatos similares a los producidos por el cemento, estos materiales pueden dar mejores características al hormigón.

Adiciones de humo de sílice (HS) al hormigón de entre 7-10 % como sustitución de cemento son recomendables en los hormigones proyectados en seco, no solo por las propiedades puzolánicas del HS sino también por las modificaciones reológicas que produce en el hormigón en estado fresco debido a la alta superficie específica del HS, razón por la que reduce el rebote. El HS en HRFA proyectados en seco puede reducir la pérdida de fibras hasta valores del 20%. (Bindiganavile & Banthia, 2000)

#### **2.1.4.6 Fibras de acero**

Las fibras metálicas o de acero (disponibles en el mercado) son elementos de corta longitud y pequeña sección que se incorpora a la masa de hormigón aleatoriamente durante el amasado con la finalidad de mejorar ciertas propiedades específicas con las que el hormigón tradicional no cuenta.

La matriz-fibra en los hormigones reforzados con fibras de acero (HRFA) es mucho más efectiva, adquiere una resistencia a la tracción y un módulo de elasticidad significativamente mayor en comparación al hormigón tradicional, la adherencia con la matriz es incluso mayor que la resistencia a tracción de la misma (Naaman, 2000).

La efectividad del refuerzo matriz-fibras, exige a las fibras las siguientes propiedades (Naaman, 2000):

- Una resistencia a tracción significativamente mayor que la del hormigón.
- Una adherencia con la matriz del mismo orden o mayor que la resistencia a tracción de la matriz.
- Un módulo de elasticidad significativamente mayor que el del hormigón.

Las convenciones empleadas para describir las fibras geoméricamente son:

$l_f$  : longitud de la fibra (mm).

$d$  : diámetro o diámetro equivalente de la fibra (mm).

$\lambda$  : esbeltez o relación de aspecto de la fibra ( $l/d$ ).

$A_f$  : área de la sección transversal de la fibra ( $\text{mm}^2$ ).

Las fibras deben cumplir con algunos requisitos mecánicos de resistencia a tracción, doblado y condiciones de superficie, los cuales están descritos en la UNE-EN 14889-1: 2008. En función de los materiales utilizados para la producción de fibras de acero, se clasifican los siguientes grupos:

- Grupo I: alambres estirados en frío (cold drawn wire)
- Grupo II: láminas cortadas (cut sheet)
- Grupo III: extractos fundidos (melt extracted)
- Grupo IV: conformados en frío.
- Grupo V: aserrados de bloques de acero (milled from Steel blocks).

Las fibras de acero pueden ser de acero al carbón, acero inoxidable o revestidas de zinc (galvanizadas), pueden tener geometrías y secciones muy variadas como podemos ver en la Figura 5. La mayoría de estas son redondas, con diámetros entre 0.4 y 1.3 mm y longitudes entre 25 y 60 mm. Estas fibras tienen una resistencia a tracción de dos a tres veces mayor que las barras de refuerzo tradicional y un área superficial significativamente mayor (para una masa de acero dada) para desarrollar adherencia con la matriz del hormigón (TR-63 The Concrete Society, 2007).

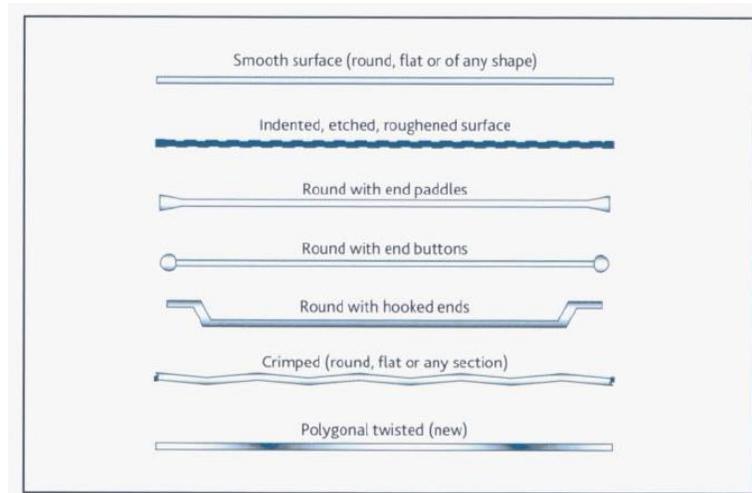


Figura 5. Geometría de las fibras acero (TR-63 The Concrete Society, 2007)

## 2.1.5 Características mecánicas del hormigón reforzado con fibras

### 2.1.5.1 Resistencia a tracción

En el diagrama tensión-deformación a tracción directa del HRFA, las fibras rigidizan sensiblemente la respuesta en fase de pre-fisura respecto de la de un hormigón tradicional y, de

forma destacada, aportan una capacidad de resistencia residual post-fisura debida el efecto de cosido entre las dos caras de la fisura (Figura 6).

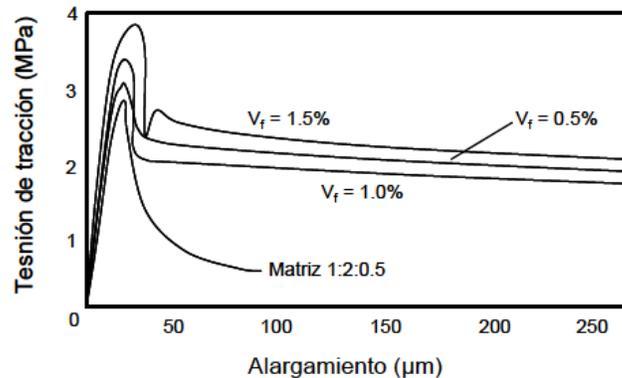


Figura 6. Curvas tensión de tracción-alargamiento de morteros en función del volumen de fibras “ $v_f$ ” a tracción directa (ACI 544.1R-96, 2009).

El efecto más importante en el comportamiento mecánico del hormigón, debido a la presencia de las fibras, se manifiesta en la resistencia a tracción post-fisura. La resistencia a tracción post-fisura, a su vez, afecta a muchas otras propiedades mecánicas como la adherencia de armaduras, la resistencia a cortante, la fatiga, etc. (Massicotte, 2000)

Adicionando fibras en un 1.5% por volumen en hormigones o morteros se pueden obtener incrementos en la resistencia a tracción directa del orden del 30-40% (ACI 544.1R-96, 2009).

### 2.1.5.2 Resistencia a compresión

La resistencia a compresión del hormigón no varía significativamente por la adición de fibras, aunque puede darse un incremento modesto en relevantes porcentajes de fibras metálicas (más de un 1.5% en volumen del hormigón), existe una diferencia sobre el hormigón simple en la ductilidad, siendo esta mayor cuando el hormigón está reforzado con fibras, lo que podemos entender mejor en la Figura 7. El módulo elástico y el coeficiente de Poisson no resultan modificados sustancialmente para porcentajes de fibras menores del 2% del volumen del hormigón. (Maccaferri, 2005)

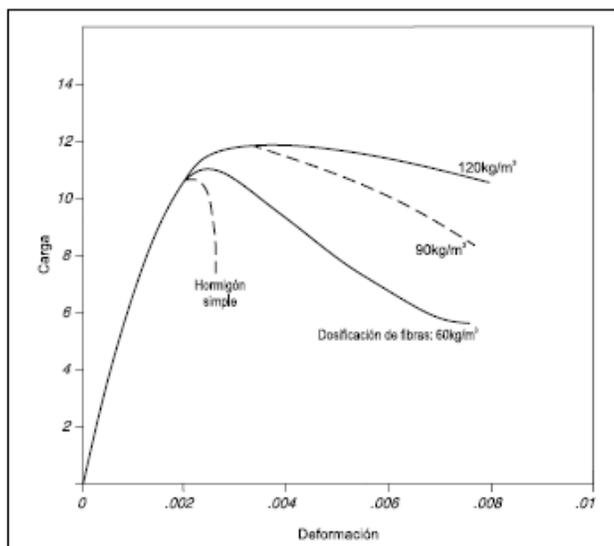


Figura 7. Grafica carga-deformación para hormigones con diferentes cuantías de fibras (Maccaferri, 2005)

### 2.1.6 Resistencia a flexotracción

El incremento de la resistencia a flexotracción al adicionar fibras de acero al hormigón es considerablemente mayor que el de la resistencia a compresión y a tracción. Esto se debe al comportamiento dúctil del HRFA en la zona fisurada por tracción, desarrollando resistencias residuales (Figura 8) (Hannant, 1978).

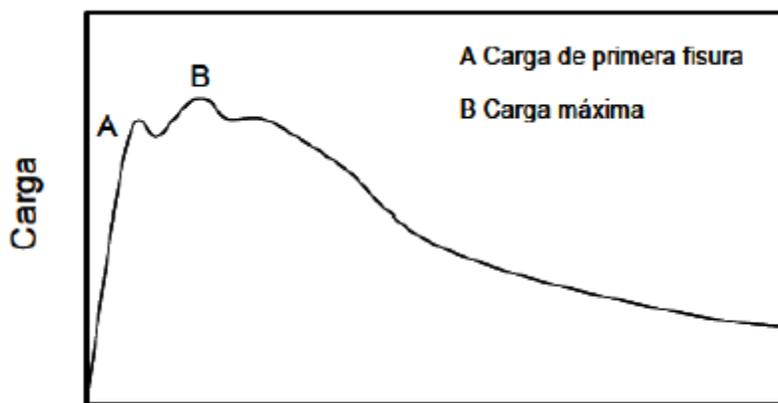


Figura 8. Curva carga-flecha a flexotracción para un HRFA (ACHE, 2000).

Los ensayos de flexotracción en HRFA se realizan principalmente sobre probetas prismáticas. Normalmente, se determina la resistencia a primera fisura, la resistencia a rotura por flexotracción y la resistencia residual a flexotracción.

El incremento de la resistencia a primera fisura obtenido con la adición de fibras de acero es mínimo, lo cual indica que esta propiedad depende básicamente de la matriz y muy poco del

contenido de fibras, del tamaño y de la forma de éstas, por lo que resulta más rentable mejorar las características de la matriz con el uso de, por ejemplo, aditivos, humo de sílice, entre otros (ACHE, 2000).

La resistencia a rotura depende principalmente del volumen de fibras y de la esbeltez de éstas, logrando incrementos de hasta el 100% respecto de la resistencia de la matriz, si se utilizan fibras de extremos conformados (Gimenez, 1987).

El empleo de mayores volúmenes de fibras, ensayos con sistemas de carga en el centro de la luz, probetas de menores dimensiones, fibras de mayores longitudes con orientación preferencial (cuando el ancho y/o la altura es menor que tres veces la longitud de las fibras) en la dirección longitudinal del elemento, da lugar a mayores incrementos en la resistencia. Con contenidos de fibras bajos y fibras de esbeltez baja, no es de esperar incrementos significativos de resistencia a flexotracción (Hannant, 1978).

Los ensayos con orientación preferencial son representativos cuando se experimenta una orientación similar en el elemento en el que se empleará el hormigón (Banthia & Trottier, 1995)/

#### **2.1.6.1 Resistencia a cargas dinámicas (impacto)**

Una de las principales características del HRFA es su resistencia a los impactos por absorción de energía, siendo en este caso su resistencia de 3 a 10 veces la resistencia del hormigón en masa (ACI 544.4R-88, 2009). Además, el HRFA presenta una menor tendencia a la desfragmentación y el desprendimiento.

Todo lo anterior se debe a la sensibilidad de la matriz, a la resistencia de las fibras al arrancamiento y a la deformación.

#### **2.1.6.2 Tenacidad**

La variable que más influye en la tenacidad es la capacidad adherente de las fibras (Banthia & Trottier, 1995).

La tenacidad es tradicionalmente cuantificada como el área bajo la curva carga-flecha obtenida experimentalmente. El ensayo de tracción directa, por la dificultad que implica realizarlo, no es muy empleado para evaluar esta propiedad. El ensayo de flexotracción, además de ser más simple que el de tracción directa, simula las condiciones de carga para muchas aplicaciones prácticas.

La curva carga-flecha depende principalmente de las dimensiones del elemento (ancho, alto y longitud), de la configuración de carga (punto medio o a tercios), del criterio de control del ensayo (carga, flecha, abertura de fisura, carrera de la prensa, etc.) y de la velocidad de carga. Los métodos de ensayo más utilizados evalúan la tenacidad mediante una flecha máxima establecida o con unos índices de tenacidad “ $I_t$ ” en función de diferentes valores de flecha obtenidos como múltiplos de la flecha a primera fisura.

El valor de los “ $I_t$ ” depende principalmente del contenido de fibras, del tipo y de la esbeltez de éstas y poco o nada de que la matriz sea hormigón o mortero, es decir, los índices reflejan principalmente el incremento de tenacidad debido a las fibras y no a cualquier otro mecanismo como por ejemplo el incremento de la resistencia a primera fisura (ACI 544.4R-88, 2009).

### **2.1.6.3 Cortante y Torsión**

Las fibras de acero en el hormigón generalmente aumentan la resistencia a cortante y a torsión, aunque la gran mayoría de investigaciones se han centrado en evaluar estas propiedades mecánicas en elementos de HRFA armados.

Barragán (2002) de ensayos experimentales de vigas de HRFA armadas, concluye que las fibras propician una fisuración más distribuida y además, incrementan la capacidad de carga última a cortante.

El empleo de sistemas combinados de refuerzo (fibras y estribos) conduce a notables incrementos en la ductilidad, aunque con aumentos resistentes a cortante poco significativos (del 0% al 15% para hormigones ordinarios y de alta resistencia, respectivamente) respecto de las vigas con solo estribos como armadura de cortante (Valle & Büyüköztürk, 1993).

### **2.1.6.4 Punzonamiento**

Al emplear volúmenes de fibras superiores al 0.5% se han experimentado roturas por punzonamiento más graduales y dúctiles, con un incremento considerable de la fisuración previa al agotamiento y de la resistencia después de la fisuración, en función del contenido de fibras, la esbeltez y la capacidad adherente de éstas. Las fibras permiten aumentar la resistencia a la rotura por punzonamiento, habiéndose obtenido incrementos de hasta un 42% (ACI 544.4R-88, 2009).

### **2.1.6.5 Adherencia fibras-matriz**

La adherencia fibras-matriz es el fenómeno que gobierna el comportamiento del HRFA después de la fisuración, cuando las fibras cosen las fisuras retrasando y haciendo más dúctil el fenómeno de agotamiento del material compuesto. Entonces se entiende la importancia de la adherencia química, mecánica y del rozamiento que comienza tras el despegue total de las fibras. Para elevar la absorción de energía se debe propiciar fenómenos de arrancamiento (pull-out) y evitar la rotura de las fibras.

La adherencia aumenta con la esbeltez de las fibras. Se ha comprobado que utilizando fibras de extremos conformados, la resistencia al arrancamiento de tres fibras de esbeltez igual a 100 es un 50% mayor que la obtenida al ensayar una sola fibra de esbeltez igual a 75 y con el mismo volumen que el conjunto de las tres fibras anteriores (Giaccio, Giovambattista, & Zerbino, 1986).

Se han comparado tres tipos de fibras elaboradas del mismo material y con la misma área, una circular recta, otra circular con extremos conformados y una tercera triangular retorcida. Realizando ensayos de tracción a una sola fibra, se encontró que la fibra triangular retorcida dio una resistencia de adherencia un 400% y 200% mayor que la fibra recta y que la de extremos conformados, respectivamente. Además, la energía de arrancamiento fue 2.5 veces mayor en el caso de la fibra triangular respecto de la conformada (Naaman, 2000)

### **2.1.7 Durabilidad del hormigón reforzado con fibras de acero**

La adición de fibras de acero en el hormigón genera comportamientos mecánicos caracterizados por presentar un mayor número de fisuras con menores valores de abertura de fisura, factor importante en los requerimientos de durabilidad.

Uno de los aspectos más preocupantes es la corrosión. En hormigones sin fisuras se ha constatado que la corrosión de las fibras se limita a la superficie del hormigón. Una vez que la superficie está corroída, el efecto de la corrosión no se propaga más de 2 mm a partir de la superficie. Las fibras muestran una buena resistencia a la corrosión en elementos no fisurados, aun cuando los elementos se encuentren expuestos a agua de mar (Serna & Arango, 2008)((ACI 544.4R-88, 2009). Mediante análisis de rayos X y microscopía electrónica, se ha observado que las reacciones entre el HRFA y el agua de mar se limitan a unos pocos milímetros bajo la superficie del hormigón. Estos cambios microquímicos aparentemente no tienen ningún efecto negativo en la durabilidad y el comportamiento del hormigón bajo cargas sostenidas en ambiente marino (O'neil & Devlin, 1999).

Cuando se emplean fibras con recubrimiento de zinc, se ha experimentado efectos positivos frente a la corrosión (Nemegeer, Vanbrabant, & Stang, 2000) tanto desde el punto de vista estético como mecánico (Serna & Arango, 2008).

(Granju & Ullah, 2005) han detectado incrementos en la resistencia a flexotracción en elementos fisurados sometidos a ambientes marinos, efecto que atribuye al autocurado (self healing) del hormigón y a la leve corrosión de las fibras que hace que la superficie sea menos limpia y más rugosa, haciendo el deslizamiento más difícil y generando ese incremento adicional.

Respecto de la carbonatación, la profundidad de penetración depende del hormigón, no del hecho de tener o no fibras (Nemegeer et al., 2000).

El uso de fibras para reforzar el hormigón no reduce la necesidad de inclusión de aire para resistir los efectos de los ciclos hielo-deshielo en ambientes severos (O'neil & Devlin, 1999)

### **2.1.8 Ventajas del hormigón reforzado con fibras de acero**

Las principales ventajas del hormigón con fibras las podemos resumir en:

- Fáciles y rápidos de aplicar.
- Sustitución del mallazo, eliminando los riesgos de una mala colocación
- Aseguran un refuerzo homogéneo y tridimensional más eficaz
- Se puede realizar el vertido del hormigón directamente desde el camión hormigonera. Si fuera necesario se puede bombear.
- De fácil integración en el hormigón, tanto en planta como a pie de obra.
- En la mayoría de los casos, para la realización de pavimentos de hormigón, supone un importante ahorro de materiales y de tiempo

## **2.2 Pavimentos de hormigón reforzado con fibras apoyados sobre el suelo**

### **2.2.1 Definición**

Un pavimento rígido es una estructura de hormigón apoyado sobre el suelo cuyo propósito principal es resistir las cargas aplicadas a través del soporte brindado por el suelo. El pavimento puede ser de sección uniforme o variable y puede incluir elementos rigidizantes como vigas y nervios. El pavimento puede ser reforzado o no, con refuerzo no pretensado, fibras, o tendones pretensado. El refuerzo se utiliza para controlar la apertura de fisuras resultantes de la retracción, efectos de la temperatura y cargas aplicadas. El tendón pretensado se utiliza para reducir las

fisuras resultantes de la retracción, efectos de la temperatura, cargas aplicadas, y acomodar movimientos debido al cambio de volúmenes en suelos expansivos (ACI Committee 360, 2010).

### **2.2.2 Antecedentes**

El diseño de pavimentos rígidos apoyados sobre el suelo está basado en teorías originalmente desarrolladas para pavimentos en aeropuertos y autopistas. En la década de 1920 Westergaard desarrollo una de las primeras teorías estructurales sobre pavimentos rígidos, esta teoría considera el pavimento como una placa homogénea, isotrópica y elástica apoyado sobre un suelo ideal, el cual ejerce una presión reactiva vertical en todos sus puntos proporcional a la deformación (deflexión) del tablero conocida como suelo de Winkler, donde el suelo actúa como un muelle lineal con una constante de proporcionalidad "k". En la década del 1930, el comportamiento estructural de los pavimentos de concreto fue investigado en el *Arlington Virginia Experimental Farm* en la *Iowa State Engineering Experiment Station* donde hubo una buena relación entre los resultados experimentales y los calculados bajo la teoría de Westergaard, siempre que el pavimento se mantuviera apoyado continuamente sobre el suelo (ACI Committee 360, 2010).

En la década del 1930, información experimental mostro que el comportamiento de diferentes suelos estudiados estaban bastante cerca a ser un sólido elástico e isotrópico. En 1943 Burmister basándose en el concepto de que el suelo es un sólido elástico e isotrópico, y asumiendo que el pavimento es de extensión infinita en su plano horizontal pero de espesor finito propuso la teoría de la capa solida sobre el comportamiento estructural de pavimentos rígidos. Esta teoría consideraba una deformación límite bajo condiciones de carga. El proceso de diseño de pavimentos rígidos basado en esta teoría no fue desarrollado lo suficiente para ser usado en el campo de la ingeniería debido a la falta de soluciones análogas para pavimentos de extensión finita en el plano horizontal, por ejemplo el caso de esquinas o bordes. (ACI Committee 360, 2010).

Las teorías anteriores estaban limitadas por un comportamiento lineal donde las deflexiones son proporcional a la carga. Posteriormente Losberg en 1961 propuso una teoría de resistencia basada en el concepto de líneas de rotura donde el pavimento no solo trabajaba en estado elástico, sino que se aprovechaba la rama plástica de este para resistir fuerzas y momentos. Esta teoría consiste en encontrar la formación de líneas de rotura en el pavimento donde se esperara que haya fluencia y luego determinar la resistencia luego de que las fisuras aparezcan

(The Concrete Society TR-34, 2003). En el caso de usarse fibras en el hormigón, se podría usar la ductilidad post-fisura que aportan estas en esta teoría.

En 1962 Meyerhof uso una teoría plástica (líneas de rotura) para derivar ecuaciones para carga última en casos de que esta se encontrara en el interior, bordes y esquinas de la superficie del pavimento apoyado sobre el suelo. En 1978 Losberg continuó su trabajo de 1962 introduciendo el uso de refuerzo estructural en la placa ya que consideraba que el refuerzo que se utilizaba “refuerzo de control de fisuras” era muy débil para prevenir la formación de fisuras y el control de apertura de estas. Losberg considero que este refuerzo contribuía en la resistencia a momento flector positivo y no así para el momento negativo el cual considero la resistencia del hormigón simple a flexión. En 1983 Baumann y Weisgerber desarrollaron un método de líneas de rotura para determinar la carga de colapso de una placa apoyada sobre el suelo, considerando cargas en el interior, bordes y esquinas de la superficie de la placa, este método como en el de Losberg se considera que el acero de refuerzo solo se consideraba que contribuía en la resistencia para momento positivo, resultando este método ser un poco conservador. En 1986 Rao y Singh presentaron un método de diseño de pavimentos en el cual la carga de colapso era predecida utilizando un comportamiento rígido-plástico y un criterio de rotura cuadrado para el fallo del hormigón. Los principios de diseño de Meyerhof y Rao y Singh son similares, con la excepción de que la ecuación de Meyerhof no toma en consideración las tensiones de cortante en el hormigón (The Concrete Society TR-34, 2003)

Las teorías antes mencionadas se pueden clasificar de acuerdo al modelo que se utiliza para describir el comportamiento del suelo y del pavimento (ACI Committee 360, 2010), siendo estos modelos :

- Para el pavimento:
  - Pavimento Solido isotrópico y elástico
  - Pavimento elástico De pequeño espesor
  - Pavimento elástico-plástico de pequeño espesor
- Para el suelo:
  - Modelo de Winkler
  - Modelo solido elástico-isotrópico

También se usan modelos numéricos como una alternativa de las teorías antes comentadas utilizando el análisis por el método de los elementos finitos en el pavimento de hormigón siendo este soportado por un suelo elástico, también puede ser usado un mecanismo de fractura no

lineal para modelar el comportamiento y resistencia del hormigón sometido a momentos y fuerza a medida que las fisuras se propagan.

### 2.2.3 Diseño

Los esfuerzos en los pavimentos apoyados sobre el suelo resultan de las cargas aplicadas, cambios de volumen en el suelo y el hormigón. La magnitud de esos esfuerzos dependen de factores como el grado de continuidad del pavimento, la uniformidad y resistencia del suelo, el método y la calidad de construcción y la posición de las cargas. En la mayoría de los casos los efectos de estos factores son evaluados haciendo un análisis simplificado haciendo asunciones respecto a las propiedades del material (ACI Committee 360, 2010).

El diseño de pavimentos apoyados sobre el suelo para resistir cargas depende de la interacción entre el pavimento y el material de soporte. El tamaño del pavimento y las propiedades del material de soporte son muy importantes en el diseño de pavimentos, el material de soporte debe tener una resistencia uniforme y aceptable como también no debe ser susceptible a efectos de cambio climático.

#### 2.2.3.1 Explanada y sub-base

El soporte que provee la explanada debe ser uniforme, sin puntos duros ni blandos como se muestra en la Figura 9. El principal objetivo de la sub-base es proveer soporte uniforme al pavimento cuando la explanada tiene algún tipo de irregularidad. Los dos tipos principales de sub-base son las tratadas y las no tratadas. Una sub-base tratada es aquella que se le añade cemento para proveer estabilidad al material. Existen casos donde el uso de sub-base no es necesario debido a que este no aporta soporte extra a la placa (Marais & Perrie, 1993).

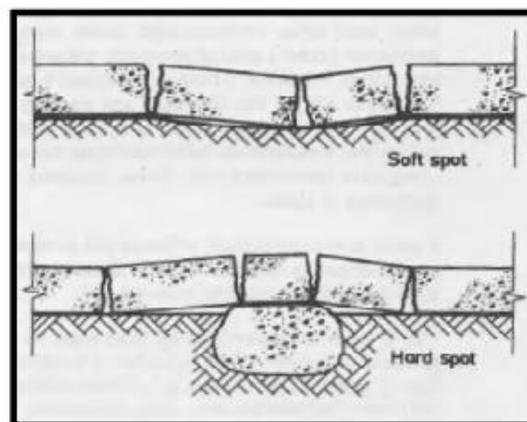


Figura 9. Consecuencias de los puntos duros y suaves en los pavimentos de hormigón (Marais & Perrie, 1993).

En las literaturas encontramos dos tipos de comportamiento del suelo, el modelo de Winkler y el modelo solido-elástico.

El modelo de Winkler asume que el suelo se deforma bajo una carga aplicada vertical directamente proporcional a la fuerza, sin transmitir esfuerzos cortantes a las áreas adyacentes del suelo donde no sea aplicada la carga (The Concrete Society TR-34, 2003), lo que se puede entender mejor en la Figura 10. La reacción de apoyo se considera en cada punto, proporcional al desplazamiento vertical del mismo, con una constante de proporcionalidad denominada Modulo de reacción del suelo o de balasto ( $k$ ), como se muestra en la Figura 11. Mientras que el modelo solido-elástico asume que el área del suelo que se deforma por una carga vertical afecta el suelo en su entorno en consecuencia deformándose como se observa en Figura 12.

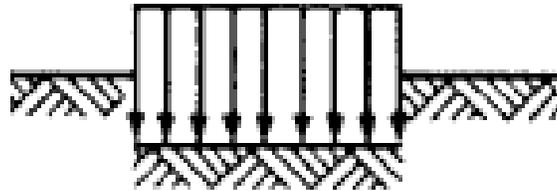


Figura 10. Modelo de suelo de Winkler, donde se aprecia que las cargas afectan únicamente las partes del suelo donde son aplicadas, sin afectar áreas adyacentes (Núñez, 1984)

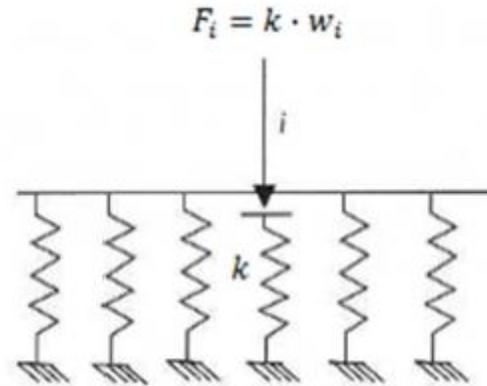


Figura 11. Módulo de reacción o balasto ( $k$ ) utilizado en el suelo de Winkler(Mena, 2011)

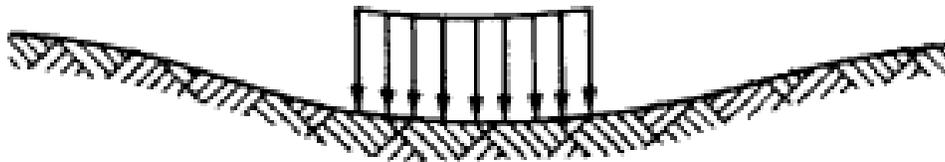


Figura 12. Modelo solido-elástico del suelo, donde se aprecia que las cargas aplicadas sobre el suelo no solo afectan la posición donde estas son aplicadas, sino que transmiten esfuerzos al suelo adyacente (Nunez, 1984).

Tanto la hipótesis de Westergaard como la teoría de líneas de rotura utilizan el modelo de suelo de Winkler. El llamado valor “K” es comúnmente usado para representar el soporte brindado por el suelo de Winkler y tiene unidades de presión por unidad de desplazamiento. En la Figura 13 encontramos valores típicos de K para suelos comunes. El valor de K se determina in-situ haciendo una prueba simple que establece usar un plato de carga de 760 mm de diámetro y aplicar una presión que provoque un asentamiento del suelo de 1.27mm, este valor de presión obtenido se dividirá por 1.27 mm lo que dará como resultado del valor de K (Spanish Standard NLT-357, 1998), esto lo podemos entender más fácil con la siguiente ecuación:

$$k = \frac{\text{presion aplicada en } 1.27\text{mm} \left(\frac{N}{\text{mm}^2}\right)}{1.27\text{mm}}$$

	valor de k (N/mm <sup>3</sup> )	
	valor inferior	valor superior
Suelo humus o musgoso	0.0050	0.015
Embankamiento reciente	0.010	0.02
Arena fina o suavemente compactada	0.015	0.03
Arena bien compactada	0.050	0.10
Arena muy bien compactada	0.10	0.15
Greda o arcilla (húmedo)	0.03	0.06
Greda o arcilla	0.08	0.10
Arcilla con arena	0.08	0.10
Gravilla con arena	0.10	0.15
Grava	0.20	0.25
Gravilla bien compactada	0.20	0.30

Figura 13. Valores típicos de K para suelos comunes

El diseño de pavimentos se clasifica básicamente en dos tipos el diseño elástico y el diseño plástico, a su vez tenemos dos tipos de pavimentos, los pavimentos sin refuerzo y los pavimentos reforzados. En ambos tipos de diseño el suelo interviene con su módulo de reacción “k”.

El espesor de los pavimentos es determinado por su resistencia a flexotracción, estos pavimentos se diseñan para que se mantengan sin fisuras superficiales debido a cargas aplicadas con un factor de seguridad entre un 1.4-2.0 respecto a módulo de ruptura. Estos pavimentos experimentan una reducción de volumen inmediatamente son fundidos, debido a la evaporación o infiltración del agua en el terreno, esto nos trae consigo problemas de retracción siendo esta

diferente en el espesor del pavimento ya que la tasa de desecación y enfriamiento es distinta en la parte superior e inferior del pavimento, produciendo esta disminución de volumen que se generen tracciones en el hormigón las cuales pueden concluir en fisuras. Es muy importante controlar el efecto de la retracción por secado para poder mantener un buen rendimiento en los pavimentos de hormigón teniendo como objetivo principal evitar la formación de fisuras “out-of-joint” y mantener la correcta estabilidad de las juntas. Los métodos de diseños usados en la actualidad para pavimentos de hormigón en masa están basados en limitar la fisuración y el alabeo debido a la retracción por restricción, aunque no eliminándolos del todo (ACI Committee 360, 2010), mientras que el diseño de pavimentos reforzados está basado en la capacidad de redistribución de esfuerzos, lo que se traduce en capacidad de recibir cargas de mayor magnitud que los pavimentos no reforzados . En pavimentos con juntas es normal esperar la fisuración en un 3% por cada paño (ACI Committee 302, 1997) .

En el diseño de pavimento se deben tomar tres posibles casos de carga ya que estas proporcionan distintos comportamientos mecánicos en el pavimento, estas son: carga en el centro de la placa, carga en esquinas de la placa y cargas en borde de la placa.

### **2.2.3.2 Hipótesis de diseño**

#### **2.2.3.2.1 Hipótesis de Westergaard**

La hipótesis de Westergaard asume que el hormigón solo va a estar sometido a cargas que lo mantendrán en el régimen lineal, si ocurriese una fisura se consideraría que la placa ha fallado. Esta hipótesis ha sido modificada con el pasar de los años aunque las mayorías de guías de diseño de pavimentos rígidos usan tablas provenientes de la ecuación original.

En su hipótesis Westergaard considera que:

- La placa de hormigón de espesor uniforme, se comporta como un medio elástico, lineal, isótropo, continuo y homogéneo. Definido mecánicamente por su módulo de elasticidad ( $E$ ) y su coeficiente de Poisson ( $\nu$ ).
- La reacción del apoyo se considera, en cada punto, proporcional al desplazamiento vertical del mismo (suelo de WINKLER).
- La placa de hormigón se encuentra en equilibrio bajo las cargas de tráfico, del peso propio, de las reacciones de los apoyos y de las reacciones de las placas continuas.

Además, Westergaard propuso una serie de fórmulas con el fin de establecer las tensiones y deflexiones producidas por una carga circular de intensidad “ $q$ ” y radio de huella “ $a$ ”, situada en

distintas posiciones de la placa. En todos los casos, el parámetro fundamental es el denominado Radio de rigidez relativo “ $l$ ”, definido según la expresión:

$$l = \sqrt[4]{\frac{E * h^3}{12(1 - \nu^2) * k}}$$

Donde:

- $l$ : Radio de rigidez relativo, en metros (m)
- $E$ : Módulo de Elasticidad, en megapascales (MPa)
- $h$ : Canto de la placa de hormigón, en metros (m)
- $\nu$ : Coeficiente de Poisson
- $K$ : Módulo de reacción o balasto, en megapascales por metros (MPa/m)

El resultado obtenido, depende de parámetros geométricos ( $h$ ), parámetros elásticos del material utilizado ( $E$  y  $\nu$ ) y de la capacidad resistente de la superficie de contacto o explanada.

Una vez obtenido el radio de rigidez relativo de la placa, Westergaard concluyo que la tensión producida en la placa debida a la aplicación de una carga circular de magnitud  $Q$  y radio de huella viene definida por expresiones del tipo:

$$\sigma_{max} = \frac{Q}{h^2} * f\left(\frac{l}{a}\right)$$

Con:

- $Q$ : carga circular, en Newtons (n)
- $a$ : radio de la huella, en metros (m)

De la expresión dada podemos apreciar la gran importancia del espesor de la sección ( $h$ ). La tensión máxima producida por una carga disminuye cuadráticamente con el espesor, con lo que a igualdad del resto de factores, la tensión máxima producida en una placa de espesor  $h/2$  es cuatro veces superior a la tensión máxima que la misma carga crea sobre una placa de espesor  $h$ .

Posteriormente, varios autores han realizado modificaciones respecto a las expresiones dadas por Westergaard, con el fin de ajustarlas a los resultados obtenidos experimentalmente. En este aspecto, Iannides [(Pérez, Miró, & Martínez, 2009)], obtuvo expresiones totalmente empíricas para tensiones y deflexiones producidas por una carga circular situada en tres posiciones de la losa.

Si la carga se aplica en la esquina de la placa, las expresiones siguientes proporcionan dichas tensiones y deformaciones:

$$\sigma_{esq} = \left(\frac{3Q}{h^2}\right) * \left[1 - \left(\frac{\sqrt{\pi} * a}{l}\right)^{0.72}\right]$$

$$\Delta_{esq} = \left(\frac{Q}{k * l^2}\right) * \left[1.205 - 0.69 \left(\frac{\sqrt{\pi} * a}{l}\right)\right]$$

Por otro lado, las expresiones siguientes nos permiten calcular tensiones y deflexiones en el caso que la carga esta aplicada en el interior de la placa:

$$\sigma_{int} = \left(\frac{0.316 * Q}{h^2}\right) * \left[4 \log\left(\frac{l}{b}\right) + 1.069\right]$$

$$\Delta_{int} = \left(\frac{Q}{8k * l^2}\right) * \left[\left(1 + \left(\frac{l}{2\pi}\right) * \ln\left(\frac{a}{2l}\right) - 0.673\right) * \left(\frac{a}{l}\right)^2\right]$$

Donde

$$b = \sqrt{1.6 * a^2 + h^2} - 0.675h \quad \text{si } a < 1.724h$$

$$b = a \quad \text{si } a > 1.724h$$

Finalmente, para las cargas aplicadas en el borde de la placa, las expresiones a utilizar son las siguientes:

$$\sigma_{bor} = \left(\frac{0.803 * Q}{h^2}\right) * \left[4 \log\left(\frac{l}{a}\right) + 0.282 \left(\frac{l}{a}\right) + 0.650\right]$$

$$\Delta_{bor} = \left(\frac{0.431 * Q}{k * l^2}\right) * \left[1 - 0.349 \frac{a}{l}\right]$$

Se puede establecer que a igualdad de factores (geometría de la placa, carga aplicada, explanada), las tensiones y deflexiones mayores se producen en la situación de carga aplicada en la esquina de la placa, mientras que la situación más favorable se produce cuando la carga se aplica en el interior de la placa.

### 2.2.3.2.2 Líneas de rotura

El método de las líneas de rotura es un método plástico como se menciona anteriormente. Esto implica que la resistencia post-fisura del hormigón es usada en la determinación del espesor de la placa. Esto se debe a la ductilidad que aportan las fibras al incluirse en la matriz del hormigón. Cuando se aplican cargas a un pavimento de hormigón apoyado sobre el suelo se generan

momentos positivos y negativos. Los momentos positivos provocan la formación de líneas de rotura en la cara inferior del pavimento, en el caso de pavimentos de HRFA se produce un estado de ductilidad debido a que las fibras cosen estas fisuras manteniendo la transferencia de tensiones en el hormigón post-fisurado, esta ductilidad es incluida en el diseño del espesor de los pavimentos. Los momentos negativos causan tensiones en la cara superior del pavimento, en el caso de que estas tensiones superen la capacidad del hormigón se formarían fisuras, la aparición de fisuras en la cara superior del hormigón se consideraría como el fallo de este por lo cual a la hora de diseñar pavimentos bajo esta hipótesis solo se incluirá la resistencia aportada por las fibras para el momento positivo y solo la capacidad del hormigón para el momento negativo.

La hipótesis de las líneas de rotura utilizan dos parámetros de la hipótesis de Westergaard para el diseño de pavimentos, estos son el radio de rigidez relativa "l" y el módulo de reacción del suelo "K". El radio de rigidez relativa expresa la rigidez que existe entre la explanada y el pavimento proveyendo la distancia de influencia de la carga en el pavimento traducidas a momentos flectores lo cual podemos apreciar en la Figura 14

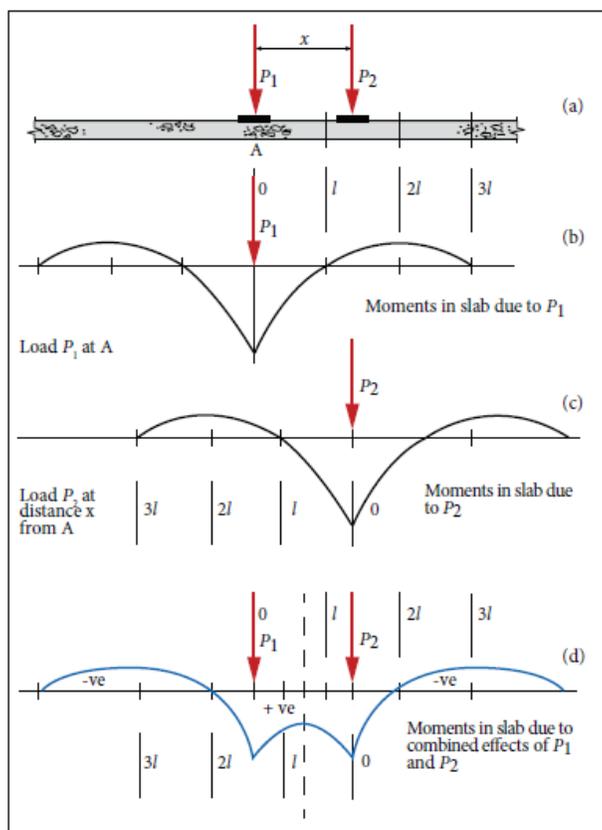


Figura 14. En esta figura se muestra el significado de radio de rigidez que no es más que la influencia de la carga aplicada, traducida en un diagrama de momento flector y su alcance. (The Concrete Society TR-34, 2003)

Basándose en la hipótesis de líneas de rotura para placas Meyerhof elaboró unas ecuaciones para la determinación del espesor del pavimentos apoyados sobre el suelo considerando como fallarían estos para diferentes casos de carga como: carga puntual, carga paralelas y cargas en cuatro puntos, lo cual podemos apreciar en la Figura 15, el mecanismo de fallo consiste en la formación de líneas de rotura radiales con respecto a los puntos de carga en la cara inferior de la placa provocados por momentos positivos y una línea de rotura que encierra perimetralmente la carga en el punto donde se produce el momento negativo tal que supere la resistencia a tracción del hormigón, esto se puede entender mejor en la Figura 16.

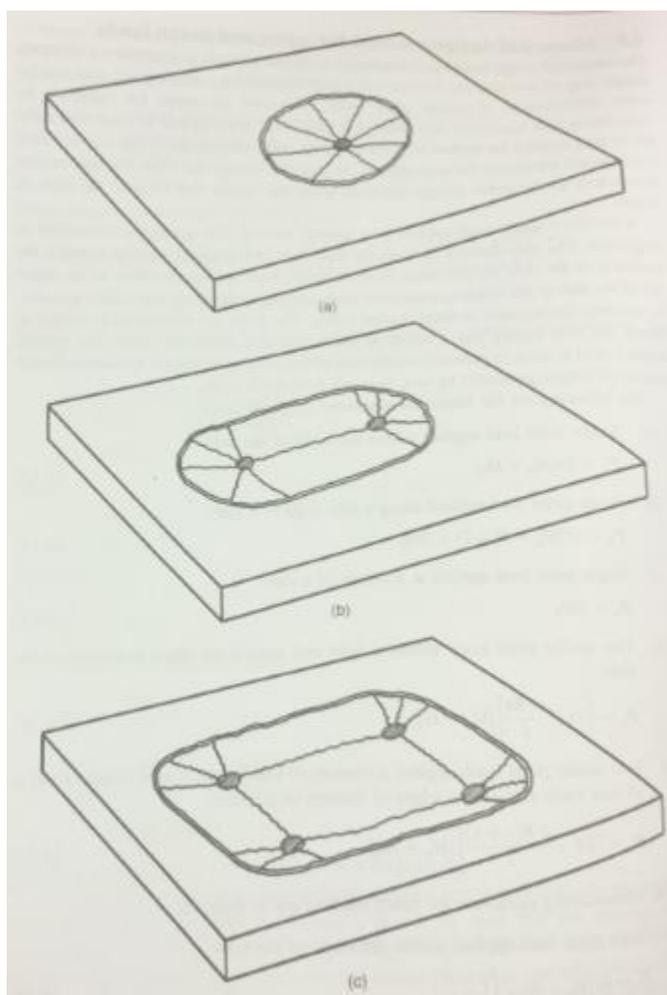


Figura 15. Mecanismos de fallos para pavimentos de hormigón reforzado según Meyerhof basándose en las líneas de rotura (Knapton, 2003)

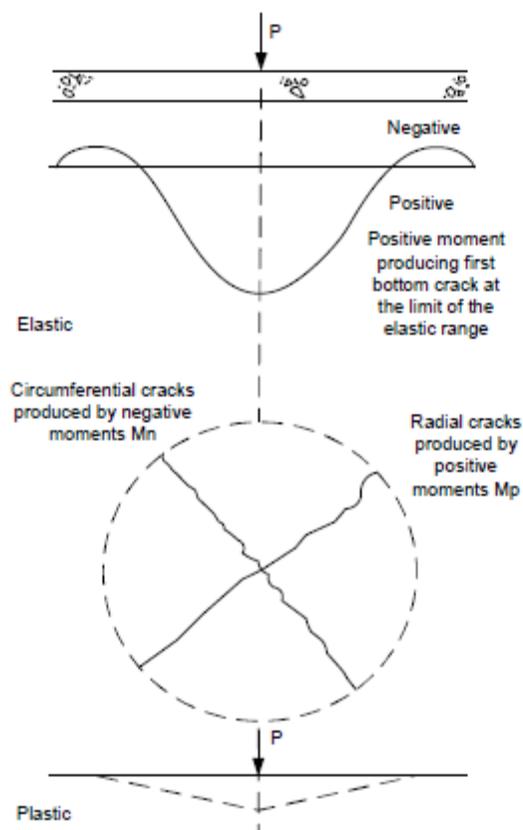


Figura 16. Mecanismo de falla para pavimentos apoyados en el suelo, donde se aprecia cómo influyen los momentos flectores en el agotamiento del pavimento.

El método de las líneas de rotura introduce la ductilidad provista por las fibras de acero en el hormigón por medio de la resistencia residual a flexión del HRFA o energía absorbida por este, esta se mide bajo el Japanese Standard Test Method JSCE-SF4 utilizando una probeta prismática de dimensiones 150x150x450 mm y cargándola a cuatro puntos. Utilizando los valores de carga- deflexión obtenidos bajo este ensayo se determina el valor de " $R_{e3}$ " también conocido como resistencia equivalente a flexión, que no es más que la energía equivalente absorbida por el hormigón para una deflexión de 3 mm expresada en relación a la primera fisura, lo que podemos entender mejor en la Figura 17.

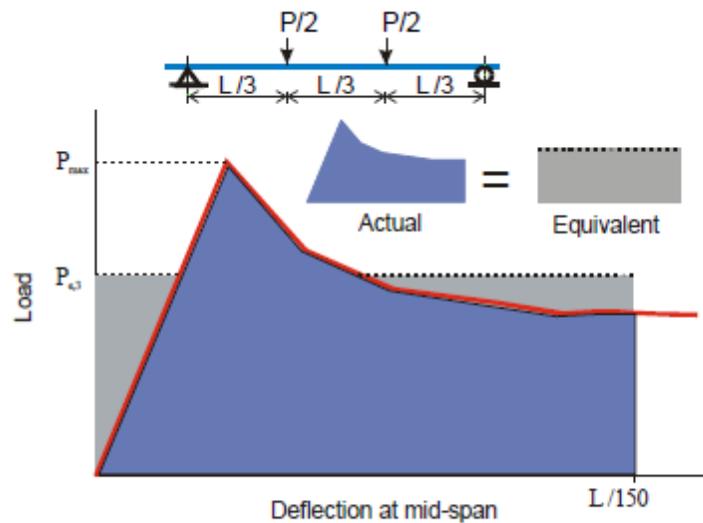


Figura 17. En esta figura podemos apreciar el diagrama carga-deflexión para hormigones con fibra, donde vemos la energía absorbida por el hormigón encerrada en la curva y su equivalencia, todo esto referenciado al pico donde aparece la primera fisura del hormigón. (Elsaigh, Kearsley, & Robberts, 2005)

### 2.2.3.3 Instrucciones de diseño de pavimentos

Existen variadas instrucciones sobre dimensionamiento de pavimentos apoyados sobre el suelo siendo estas clasificadas de acuerdo al método en que se fundamenta el cálculo de la sección.

Estos métodos son:

- **Analíticos:** los métodos analíticos consideran explícitamente cada uno de las variables actuantes (tráfico previsto, materiales utilizados, explanada, efectos medioambientales, etc.), con el fin de obtener las tensiones ( $\sigma$ ) y deformaciones ( $\epsilon$ ) producidas sobre el pavimento, comprobando a posteriori que los resultados obtenidos no sobrepasan los valores máximos admisibles.
- **Empíricos:** los métodos empíricos de dimensionamiento, aglutinan todos los factores de manera global, y realizan la comprobación en base a criterios obtenidos de la experiencia.
- **Semiempíricos:** los métodos semiempíricos son aquellos que mezclan los métodos analíticos y empíricos, estos han aparecido debido a la convergencia que se encontraron entre los métodos anteriores.

### 2.2.3.3.1 Recomendaciones para el proyecto y construcción de pavimentos portuarios (ROM 4.1)

La ROM 4.1-94 es una instrucción basada en métodos semiempíricos y está pensada para usarse solo para dimensionar pavimentos portuarios. Esta instrucción separa el diseño de las capas inferiores del diseño del pavimento de hormigón.

El diseño del espesor del pavimento de hormigón consiste en determinar el uso portuario (p.e. comercial, industrial, militar, deportivo, pesquero), la zona de operación (p.e. almacenamiento de contenedores, almacenamiento de gránulos sólidos, estacionamiento de contenedores, etc.) y la categoría de tráfico (A, B, C, D) esta última se determina mediante las cargas e intensidad a la que será sometido el pavimento. Una vez todo esto determinamos el espesor del pavimento mediante tablas. El diseño de las capas inferiores consiste en garantizar una buena superficie donde se apoyara el pavimento, este criterio se determina conociendo la naturaleza del relleno a usar y el grado de consolidación de este, combinando estos dos factores tenemos como resultado una categoría de explanada (E0, E1, E2, E3) y de acuerdo a la categoría de explanada que tengamos se nos exigen unos valores de calidad del suelo a conseguir. En la Figura 18 podemos ver el procedimiento a seguir.

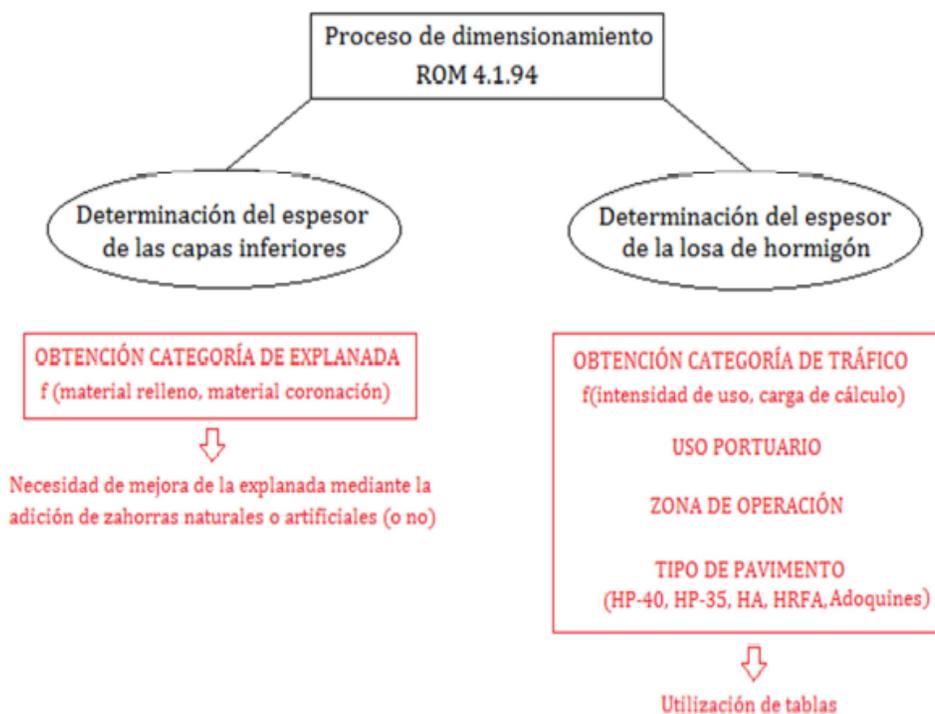


Figura 18. Proceso de dimensionamiento según la ROM 4.1-94 (Mena, 2011)

### **2.2.3.3.2 Technical Report 34 edition 2003 “ Concrete industrial Ground Floor”**

El Technical Report-34 en lo adelante TR-34 como generalmente se conoce, es una instrucción que abarca todo el tema de pavimentos industriales, desde las capas inferiores, el diseño del pavimento, las juntas, la construcción, el mantenimiento, etc., el método de diseño utilizado por el TR-34 está basada en un método analítico (método plástico).

Esta instrucción indica como diseñar pavimentos de hormigón convencional y de hormigón reforzado (fibras y barras de acero) apoyados en el suelo o en pilas.

El proceso de diseño es del tipo de estado límite último, donde se aplican factores de seguridad tanto en las cargas como en los materiales. Los estados límites últimos controlados son la resistencia y el servicio, donde el ELU de resistencia controla la flexión y el punzonamiento por cortante y por otra parte el ELU servicio controla la fisuración y la deflexión.

El diseño de la placa apoyada en el suelo en ELU flexión está basado en la hipótesis de líneas de rotura, la cual requiere una ductilidad adecuada para asumir un comportamiento plástico. Esta ductilidad es adquirida con el uso de refuerzo ya sean fibras metálicas o barras de acero. En este diseño se permite la fisuración en la cara inferior del pavimento asumiendo un comportamiento plástico (o residual post-fisura) el cual permite una redistribución de esfuerzos, este comportamiento se considera a la hora de calcular el momento flector resistente positivo conocido como “sagging moment”. Debido a que el TR-34 considera que un pavimento ha fallado cuando aparecen fisuras en la cara superior, este método solo considera la resistencia a flexión del hormigón para el cálculo del momento resistente negativo conocido como “hogging moment”. Esto se explica más fácil diciendo que solo se permite la formación de líneas de rotura en la cara inferior del pavimento. La resistencia residual aportada por las fibras se contempla en el momento positivo resistente y se incorporan por la resistencia a flexión equivalente “Re3”. Cabe destacar que el TR-34 establece que si el valor a usar de Re3 es menor que 0.30, no se incluyan las fibras como refuerzo estructural.

El diseño a punzonamiento debido a cortante en esta instrucción está basado en el Eurocódigo 2 para placas suspendidas, por lo que los valores obtenidos son muy conservadores debido a que no se considera que una parte de las cargas aplicadas va directo al suelo.

En cuanto ELU servicio para pavimentos apoyados sobre el suelo, este se considera integrado en el ELU resistencia debido a que este incluye la imposibilidad de que el pavimento fisure en la cara superior. En el caso de pavimentos apoyados en pilas se controlan la apertura de fisura y la deflexión mediante las guías de diseño del BS8110 o el Eurocódigo 2.

En esta instrucción el diseño del espesor del pavimento viene condicionado por la propiedad de los materiales a utilizar, la carga a la que será sometido el pavimento y la calidad del suelo medida a través del módulo de reacción de este. Con esto se determinan la carga última que resistirá la placa mediante las ecuaciones de carga última de Meyerhof y se compararan con las solicitaciones.

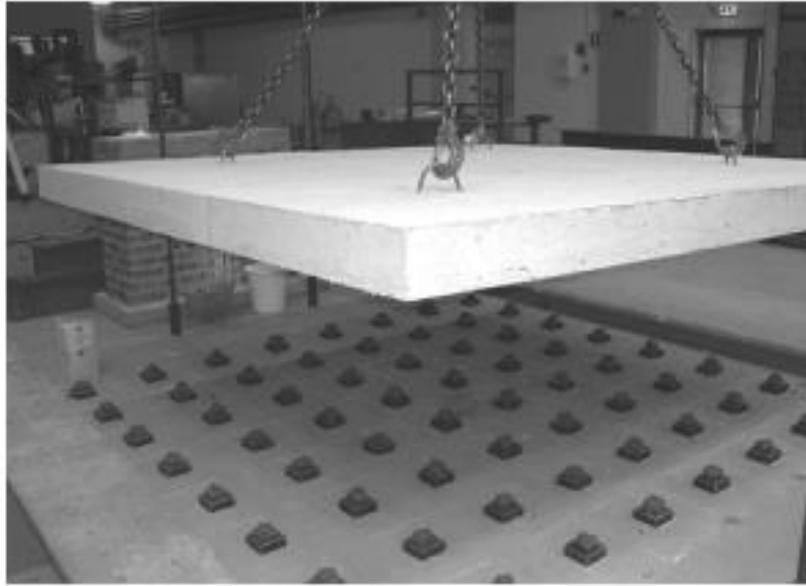
De manera general estos son los pasos a seguir para determinar el espesor del pavimento:

1. Elección de materiales a utilizar y aplicación de coeficientes de seguridad en estos.
2. Determinación de la calidad del suelo mediante el estudio de placa de carga.
3. Determinar el factor de resistencia a flexión equivalente "Re3" del hormigón en caso de incluir fibras de acero en este, mediante el ensayo JSCE-SF4 de la Japan Society of Civil Engineers.
4. Calcular los momentos resistentes positivos y negativos, teniendo en cuenta que el aporte de resistencia residual por parte de las fibras solo se considera en el momento resistente positivo.
5. Determinar la carga última resistente mediante las ecuaciones de Meyerhof, teniendo en cuenta usar la ecuación adecuada para el caso en que se aplique la carga (puntual, dos puntos, etc.) y la zona crítica que pueda estar presente la carga (esquina, centro o borde de placa).
6. Comparar la carga admisible y la carga actuante teniendo en cuenta aplicar los coeficientes de seguridad adecuados a la carga actuante (carga dinámica, estática, etc).

#### **2.2.4 Estudios previos de pavimentos de hormigón**

Sorelli, Meda, & Plizzari (2006) realizaron múltiples placas de hormigón reforzado con fibras de acero en distintas proporciones y formas, estudiando su comportamiento estructural, como resultado experimental tuvieron que con un contenido bajo de fibras de acero en el hormigón se mejoran la capacidad de carga de este y hacen la estructura trabajar con mayor ductilidad.

Los pavimentos estudiados por este equipo tenían dimensiones de 3x3x0.15 m y se sometieron a una carga puntual en el centro de este. Para reproducir el suelo utilizaron el modelo de Winkler utilizando 65 muelles de acero separados en ambas direcciones a 375 mm. Estos midieron la constante de los muelles teniendo como resultado un valor de 11 kN/mm por lo que con el área tributaria que le correspondía a cada muelle le daba un módulo de reacción del suelo de 78.5 MPa/m. En la Figura 19 se muestra el esquema utilizado para este estudio.



*Figura 19. Esquema utilizado para ensayar las placas, donde se puede apreciar los muelles utilizados para simular el suelo (Minelli & Plizzari, 2008).*

Bothma (2013) fabricó 4 placas de hormigón de dimensiones 2x2x0.12 m, 2 de hormigón reforzado con fibras de acero HRFA y 2 de hormigón convencional HC, con el objetivo medir la ductilidad a flexión del hormigón con fibras en pavimentos apoyados sobre el suelo, además de comprobar los resultados del ensayo con los cálculos teóricos respecto a las cargas de rotura. Para simular el suelo utilizó 169 muelles con una rigidez de 220 n/mm, separados a una distancia de 150 mm en ambas direcciones, con lo cual obtuvo un valor de módulo de reacción del suelo de 10MPa/m. En la Figura 20 se observa el esquema de muelles utilizados en este estudio.

Las placas de hormigón fueron cargadas en el borde, y se obtuvo como resultado una modo de fallo más dúctil en las placas de hormigón con fibra respecto a las de hormigón convencional.



Figura 20. Distribución de muelles utilizada (Bothma, 2013)

### **3 Programa experimental y metodología**

En este capítulo se presenta el programa experimental que se ha desarrollado para determinar el comportamiento del hormigón con fibras aplicadas a pavimentos apoyados en el suelo para el caso de cargas de carácter portuario en zona de almacenes de contenedores.

#### **3.1 Objetivos específicos**

- Diferenciar el comportamiento que presentan los pavimentos de hormigón reforzado con fibras de acero con los pavimentos de hormigón convencional apoyados sobre el suelo, haciéndolo a escala real.
- Elaborar un sistema de apoyos para estos pavimentos que se asimile lo más posible a la reacción real del suelo.
- Aplicar cargas mediante un pórtico que emulen una situación real de lo que es una zona de almacenamiento de contenedores en un puerto

#### **3.2 Desarrollo de programa experimental**

Para este estudio se pensó en diseñar un pavimento de hormigón vibrado cuyas lados y sección fuera representativo a lo que es un pavimento real utilizado en puertos, lo cual según la ROM 4.1–94 pueden tener espesores variables entre 0.15-0.40 m y tamaño de paños del orden de 5x5 m<sup>2</sup>, a su vez se pensó en utilizar un soporte por parte del suelo que sea equivalente a lo que se emplea normalmente en la realidad. Para evaluar el comportamiento de estas placas de

hormigón se aplicaron cargas que correspondieran con las cargas que normalmente sería sometido un área de almacenamiento de contenedores en un puerto.

Teniendo en cuenta lo antes mencionado se decidieron fabricar dos placas, una de hormigón reforzado con fibras de acero y la otra de hormigón convencional, todo esto siguiendo los criterios de diseño de la ROM 4.1-94 para espesores de pavimentos, los cuales se basan en el nivel de tráfico a que será sometido el pavimento.

Se fabricaron dos placas: una de 20 centímetros de espesor de HRFA y la otra de 26 centímetros de espesor de hormigón convencional lo cual la ROM establece que deberían ser equivalentes en cuanto a resistencia. Ambos pavimentos se fabricaron en dimensiones de 4x4 m respecto a sus lados. Estos pavimentos son considerados por la ROM como tipo D (aptos para tráfico ligero).

En la Figura 21 se muestra el plan de trabajo de este estudio, detallando el conjunto de ensayos que se llevaran a cabo.

Hormigones	No. de amasadas	m <sup>3</sup> /Amasada	Temática	Tipo de ensayo	Ensayos
<b>Hormigón convencional</b>	3	1.5	Caracterización del hormigón	Asentamiento	3
				Compresión	9
				Flexotracción	6
			Evaluación de placa 4x4x0.26 m	Evaluación de comportamiento mecánico en pórtico de carga	1
<b>Hormigón reforzado con fibras de acero</b>	3	1.2	Caracterización del hormigón	Asentamiento	3
				Compresión	9
				Flexotracción	6
			Evaluación de placa 4x4x0.20 m	Evaluación de comportamiento mecánico en pórtico de carga	1

Figura 21. Plan de trabajo

### 3.3 Dosificación

Para la fabricación de las placas de hormigón a estudiar se utilizarán dos dosificaciones similares, con la diferencia que una lleva fibras de acero y la otra no. Estas dosificaciones además servirán para caracterizar estos hormigones en cuanto a sus propiedades mecánicas. Las dosificaciones elegidas se muestran en la Figura 22 para el hormigón con fibras y en la Figura 23 para el hormigón sin fibras, estas dosificaciones vienen dadas por m<sup>3</sup> de hormigón.

Compuesto	Cantidad
Cemento 42.5R	300kg
Agua total	190 l
Arena roja	375 kg
Arena amarilla	400 kg
Grava 12-20	775 kg
Gravilla 6-12	460 kg
Fibras de acero	40 kg
Plastificante Sika	2.97 l

Figura 22. Dosificación de hormigón reforzada con fibras de acero

Compuesto	Cantidad
Cemento 42.5R	300kg
Agua total	190 l
Arena roja	375 kg
Arena amarilla	400 kg
Grava 12-20	775 kg
Gravilla 6-12	460 kg
Plastificante sika	2.97 l

Figura 23. Dosificación de hormigón convencional

### 3.4 Materiales a utilizar

#### 3.4.1 Cemento

Para la fabricación del hormigón a ensayar se ha utilizado el cemento CEM II/A-V 42.5 R que es un cemento portland con adiciones de cenizas volantes silíceas en un 6-20% con altas resistencias iniciales.

### 3.4.2 Agua

Para la elaboración del hormigón se ha utilizado agua corriente, debido a que, en una aplicación práctica en obra, es este tipo de agua la que se utiliza.

### 3.4.3 Áridos

Para este estudio se utilizaron los tipos de áridos antes mencionados en la dosificación, los cuales estaban disponibles en la planta de hormigón donde se fabricaron las placas.

### 3.4.4 Fibras

Para este estudio se han utilizado fibras de acero de la casa Fibrocev, modelo F-due 44/45, las cuales son fabricadas bajo conformidad con la normativa EN 14889-1 :06 , las características de estas fibras son las siguientes:



Geometría: rectangular

Longitud: 44mm

Sección:  $0.75\text{mm}^2$

Diámetro equivalente: 0.98mm

Relación de esbeltez L/D: 45

Cantidad de fibra por kg: 3860 unidades

*Fibra de acero utilizada en el estudio de la casa Fibrocev, modelo F-due 44/45*

### 3.4.5 Aditivo

Debido a que el uso de fibras en el hormigón disminuye la consistencia de este (ACI 544.1R-96, 2009), se utilizara un aditivo plastificante de la casa Sika con el fin de tener asentamiento entre 10 y 14 cm utilizando el cono de Abrams.

### **3.5 Ensayos de caracterización del hormigón**

#### **3.5.1 Ensayo de caracterización del hormigón en estado fresco**

Los hormigones utilizados en este estudio se caracterizaron en su estado fresco mediante el ensayo de determinación de la consistencia del hormigón (UNE-EN 12350-2, 2009).

#### **3.5.2 Ensayos de caracterización del hormigón en estado endurecido**

Para este estudio se han realizado dos ensayos para caracterizar las propiedades mecánicas del hormigón en estado endurecido:

- Determinación de resistencia a compresión en probetas cilíndricas (UNE-EN 12390-3, 2009).
- Determinación de resistencia a tracción por flexión en probetas cúbicas (UNE-EN 14651:2007+A1, 2008).

### **3.6 Ensayos sobre los pavimentos de hormigón**

Para evaluar el comportamiento mecánico de estos pavimentos, se diseñó un pórtico de carga tal que las cargas aplicadas a estos pavimentos fuera de conformidad a las cargas habituales en la zona de almacenamiento de contenedores en un puerto. Este pórtico estuvo compuesto por dos torres de apoyo para soportar un dintel en el cual se apoyaría el dispositivo de aplicación de carga, dos barreras con el objetivo de evitar desplazamientos laterales de la placa a ensayar y un sistema de vigas de repartición para aplicar las cargas en cuatro puntos equidistantes en forma de cuadrado los cuales tenían como valor de separación 50 centímetros. Esto se explica mediante un esquema en el apartado 3.7.5.1.

### **3.7 Metodología**

#### **3.7.1 Fabricación del hormigón**

Debido al gran volumen de hormigón necesario para este estudio, la fabricación de este se hizo en la planta de hormigón de prefabricados LUFORT ubicada en la localidad de Chiva, Provincia Valencia. En dicha planta se fabricaron dos tipos de hormigones, uno sin fibras y otro con fibras de acero, ambos hormigones fueron fabricados con las mismas dosificaciones de sus diferentes componentes a diferencia de que uno de estos hormigones llevó fibras de acero en su matriz. Estos hormigones fueron dosificados y amasados por los equipos de amasado y dosificado electrónicos de la planta de hormigón.

Para la fabricación del hormigón con fibras se realizaron 3 amasadas cada una de 1.2 m<sup>3</sup> con el fin de fabricar la placa de HRFA de dimensiones 4x4x0.20 m<sup>3</sup>. De cada amasada se tomaron tres probetas cilíndricas y 4 prismáticas con el fin de caracterizar el hormigón.

Para la fabricación del hormigón convencional se realizaron 3 amasadas cada una de 1.5 m<sup>3</sup> con el fin de fabricar la placa de hormigón convencional de dimensiones 4x4x0.26 m<sup>3</sup>. De cada amasada se tomaron tres probetas cilíndricas y 4 prismáticas con el fin de caracterizar el hormigón.

Al finalizar cada amasada se procedía a medir la consistencia del hormigón bajo el ensayo estandarizado por la normativa UNE-EN 12350-2:2006 (Figura 24 y Figura 25). Con las dosificaciones usadas se buscaba valores de asentamiento utilizando el cono de Abrams entre 12-15 centímetros. Luego de esto se procedió a fabricar las probetas y placas como se detallara en lo adelante.



*Figura 24. Preparación de ensayo de consistencia*



*Figura 25. Toma de medidas de consistencia*

### **3.7.2 Fabricación de probetas**

Luego de terminar el proceso de amasado y ya comprobada la consistencia con el cono de Abrams, procedimos a llenar los moldes ya untados de desencofrante.

Se han fabricado dos tipos de probetas (Figura 27), probetas cilíndricas para caracterizar el hormigón a compresión y probetas prismáticas para caracterizar el hormigón a flexotracción, estas probetas se fabricaron cumpliendo con las especificaciones de formas y dimensiones establecidas en la norma UNE-EN 12390-1 2013.

Para los moldes cilíndricos de dimensiones 150x300mm se vertió hormigón en 3 tongadas aproximadamente de un tercio de la altura del molde y una vez vertida cada tongada se procedió a compactar con 25 golpes utilizando la barra de compactación y para finalizar procedimos a nivelar y acabar la probeta.

Para los moldes prismáticos de dimensiones 150x150x600mm, se procedió a hormigonar tal y como indica la normativa UNE-EN 14651:2007 +A1:2008 vertiendo el hormigón en tres partes, comenzando por la parte central en la cual se vierte el doble de hormigón que en las partes extremas (Figura 26), luego compactando este hormigón por vía de un vibrador eléctrico y para finalizar procedimos a nivelar y acabar la probeta.

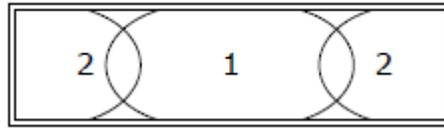


Figura 26. Secuencia de llenado del molde (UNE-EN 14651:2007+A1, 2008)



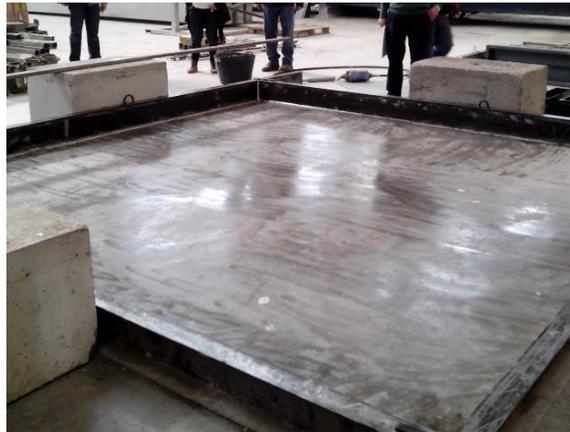
Figura 27. Probetas fabricadas

### 3.7.3 Fabricación de placas

Para la fabricación de las placas se procedió a fabricar dos moldes constituidos por perfiles metálicos soldados, estos moldes se apoyaron contra el suelo a fin de que este le sirviera como fondo del encofrado. Estos moldes se fabricaron con las dimensiones de las placas, para la placa de HRFA las dimensiones fueron 4x4x0.20 m y para la placa de hormigón convencional 4x4x0.26 cada placa se hormigón en tres tongadas, para la placa de HRFA estas tongadas fueron de 12 m<sup>3</sup> y para las placas de hormigón convencional de 15 m<sup>3</sup>.

A los dos moldes se le procedió a aplicar desencofrante con el fin de que no se adhiriera el hormigón en estos (Figura 28). Luego de verter el hormigón en los moldes (Figura 29), se procedió a vibrar el hormigón con un vibrador eléctrico (Figura 30) y al finalizar el vibrado se le dio terminación a las placas con el fin de hacerlas las más planas posibles (Figura 31), por último se le incrustaron 4 anclajes (Figura 32), uno en cada esquina para por medio de estos poder ser movilizadas cuando estas estén endurecidas.

Estudio técnico experimental de una placa de hormigón reforzada con fibras de acero apoyada en el suelo aplicado en obras portuarias



*Figura 28. Molde donde se aprecia la aplicación de desencofrante*



*Figura 29. Hormigonado de placa*



*Figura 30. Vibrado del hormigón*

Estudio técnico experimental de una placa de hormigón reforzada con fibras de acero apoyada en el suelo aplicado en obras portuarias



*Figura 31. Acabado de la placa*



*Figura 32. Colocación de anclajes*

### **3.7.4 Ensayos de caracterización**

#### **3.7.4.1 Ensayo de resistencia a compresión simple**

El ensayo de compresión simple se realiza de acuerdo con la norma UNE EN 12390 -3. Para la realización de este ensayo, se fabricaron probetas cilíndricas de diámetro 150 mm y 300mm de altura.

Previo a realizar el ensayo se procedió a refrentar las probetas con azufre tal y como marca la normativa utilizando el equipo de refrentado (Figura 33 y Figura 34). Esto se hace para lograr una superficie de apoyo uniforme. Después, una vez endurecido el azufre, se procede al ensayo propiamente dicho.

Estudio técnico experimental de una placa de hormigón reforzada con fibras de acero apoyada en el suelo aplicado en obras portuarias

Se coloca la probeta en la prensa (Figura 35), ajustando al máximo la cara superior. Se aplica una carga que irá aumentando a una velocidad constante hasta llevar la probeta a la rotura (Figura 35). La máxima carga alcanzada será la resistencia a compresión simple del hormigón.



*Figura 33. Equipo de refrentado*



*Figura 34. Refrentado de probetas*



Figura 35. Prensa utilizada



Figura 36. Aspectos de probetas ensayadas

#### **3.7.4.2 Ensayo de resistencia por flexotracción a 3 puntos**

Después de realizar la entalla de 25 mm en el centro de la probeta, tal y como marca la norma, se realizan los orificios pertinentes en la misma, para colocar el captador de desplazamiento. Estos orificios se realizan a 8cm de distancia con la entalla. Se utiliza un captador de 25mm. Seguidamente, se marcan los puntos de apoyo en la probeta. Una vez preparada la probeta, se coloca en la máquina de ensayo siguiendo el esquema marcado por la normativa (Figura 37). Luego de esto se conecta la máquina y el captador al equipo y se comienza el ensayo (Figura 39). Para ello se realiza una pre-carga manual, sobre la probeta, de 0.5 ó 1 kN. Si no se realiza esta precarga inicial, el tiempo de ensayo se ralentiza demasiado. A continuación, se conecta la máquina para que vaya cargando la probeta a una velocidad de 0.05mm/min hasta que la

apertura de fisura es de 0.5mm y a partir de ese momento una velocidad de 0.2mm/min. Una vez finalizado el ensayo se obtienen los valores de resistencia residual por flexión, de acuerdo con la norma, a partir de los datos obtenidos del equipo, utilizando los valores de la gráfica carga apertura de fisura (Figura 38).

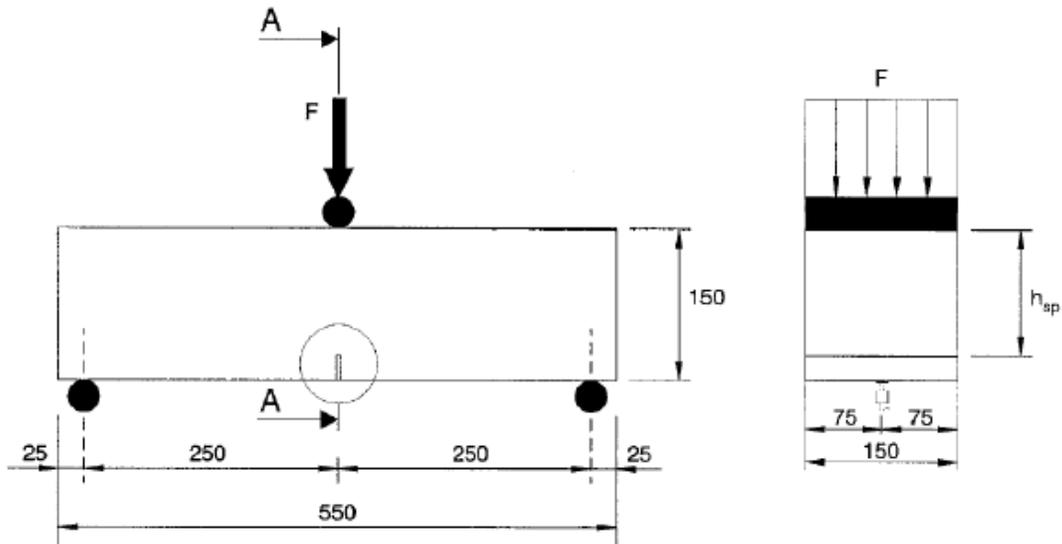


Figura 37. Esquema de rotura por flexotracción a tres puntos en probetas con entalla (UNE-EN 14651:2007+A1, 2008)

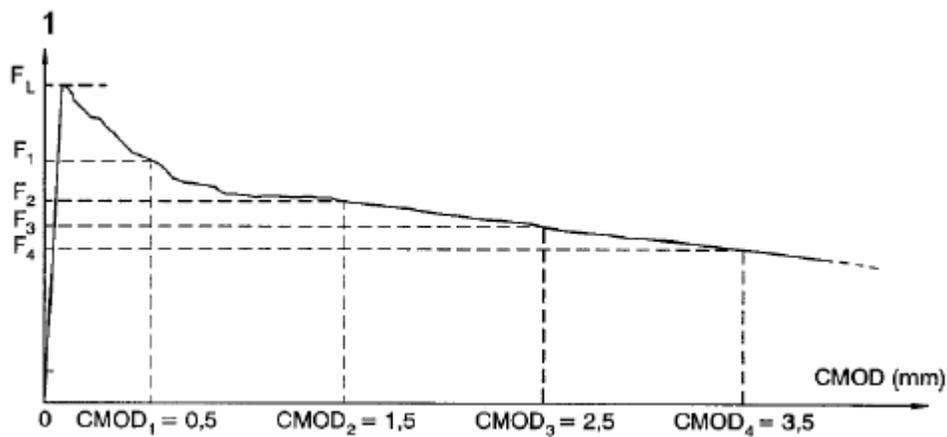


Figura 38. Curva carga-apertura de fisura (UNE-EN 14651:2007+A1, 2008)



Figura 39. Ensayo de probetas a flexotracción

### 3.7.5 Diseño de pórtico y condiciones de ensayo

El estudio del comportamiento mecánico de pavimentos de HRFA apoyados sobre el suelo, modelizando la reacción del suelo con muelles es algo novedoso, por lo que el diseño del ensayo ha sido una parte importante del trabajo, debido a que no existen ensayos estandarizados para este tipo de estudios.

Uno de los aspectos básicos de este estudio ha sido diseñar los soportes que hagan como reacción del suelo, garantizando el contacto de estos soportes con la placa y la estabilidad de estos frente a movimiento de la placa.

Para este ensayo se simuló un suelo con módulo de reacción de 70 MPa/m, lo que se consiguió utilizando dos configuraciones de muelles, una para la parte central de la placa que es donde se concentrarían las tensiones y por tanto donde estos debieron estar a separaciones más pequeñas y una configuración de muelles para el resto de la placa donde la separación es más grande entre muelles debido a que el nivel de tensiones será menor. Para lograr la reacción buscada en el terreno se procedió a utilizar muelles asignándoles un área tributaria de la placa a cada uno. Para los muelles de la parte central se les asignó un área tributaria de 37x37 cm<sup>2</sup>, y para los muelles de la parte exterior se les asignó un área tributaria de 50x50 cm<sup>2</sup>. La disposición utilizada se presenta en la Figura 40.

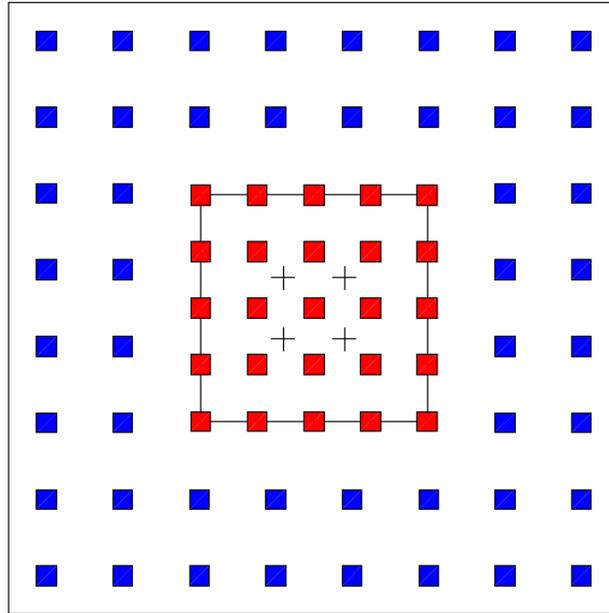


Figura 40. Disposición de muelles, en rojo la configuración denominada interior y en azul la exterior

Los muelles utilizados fueron del tipo disco (Figura 41), fabricados por SCHNORR® modelo 017 000, los cuales tienen una capacidad de carga de 33.67kn para una deformación de 0.9mm, esto al 75% de su capacidad, estos muelles se configuraron de manera que su rigidez y el área tributaria asignada equivalieran al módulo de reacción del suelo deseado, lo cual se entiende mejor en la Figura 42y Figura 43.



Figura 41. Muelles utilizados en el ensayo

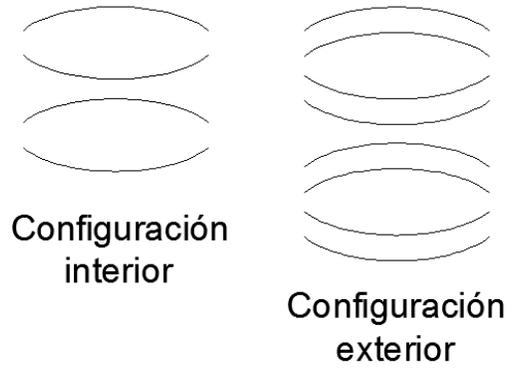


Figura 42. Configuración de muelles utilizados

Configuración	K suelo (Mpa/m)	Área tributaria (mm <sup>2</sup> )	k muelle teórica (Kn/mm)	K muelle unitaria (kN/mm)	K conjunto de muelles (KN/mm)	Carrera disponible al 75% de capacidad
Exterior	70.00	250000.00	17.50	37.41	18.71	3.6mm
Interior	70.00	136900.00	9.58	37.41	9.35	3.6mm

Figura 43. Tabla de valore de rigideces utilizada

### 3.7.5.1 Pórtico de carga

Para cargar la placa se diseñó un pórtico de carga, que mediante un gato transmitirían las cargas a la placa a través de vigas de repartición apoyadas en cuatro puntos de la placa, lo que se puede apreciar mejor en el esquema presentado en la Figura 44 y en la imagen del pórtico (Figura 45).

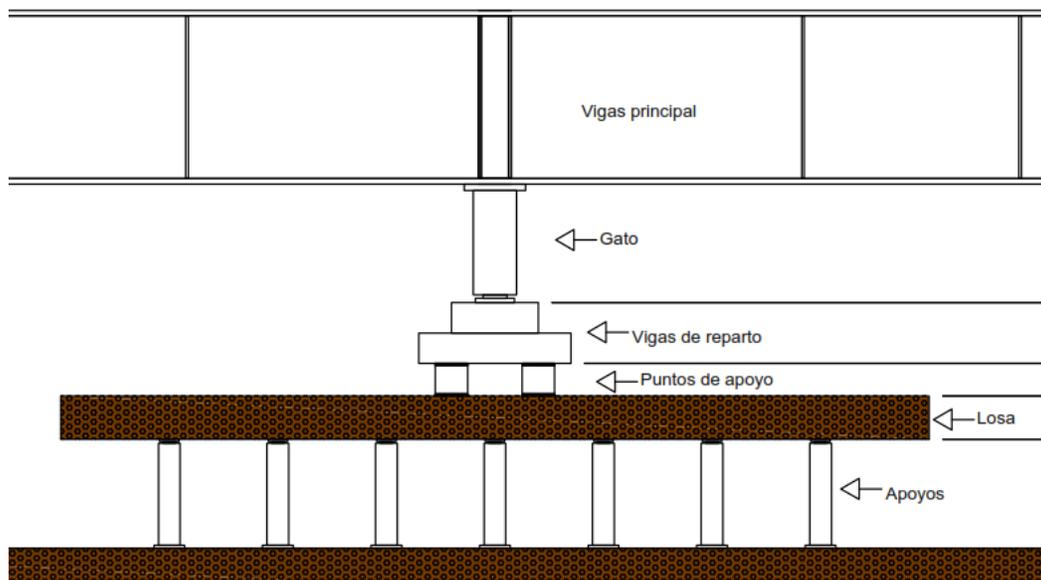
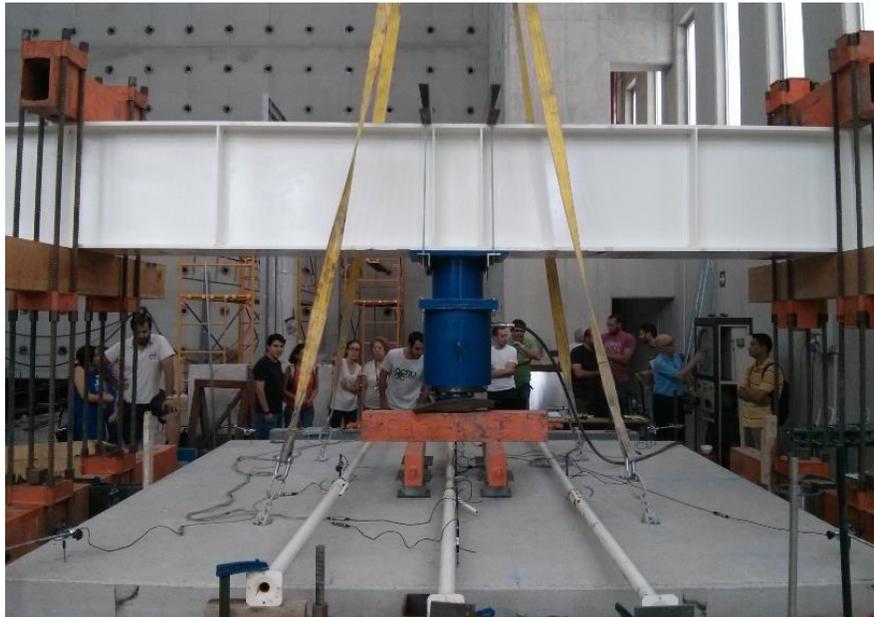


Figura 44. Esquema de carga del ensayo



*Figura 45. Pórtico de carga*

### **3.7.5.2 Metodología de ensayo de placa.**

La realización del ensayo va precedida de una serie de operaciones necesarias para preparar la placa a ser ensayada. A continuación se mencionan cada uno de los pasos de preparación por las que hay que pasar antes de hacer el ensayo.

#### **PASO 1:**

- Se procede a montar las torres del pórtico dejando sin colocar la viga de carga.
- Se colocan dos vigas ancladas al suelo en los exteriores que sirven para evitar el movimiento lateral de la placa cuando se proceda a cargar esta.
- Se procede a colocar los apoyos en los puntos especificados en el esquema de distribución de apoyos.

Estudio técnico experimental de una placa de hormigón reforzada con fibras de acero apoyada en el suelo aplicado en obras portuarias



*Figura 46. En esta imagen se ve el desarrollo del paso 1, donde se ven colocados las vigas laterales, los apoyos y las torres.*

## **PASO 2:**

- Mediante un puente grúa se proceda a mover la placa del sitio de acopio en el laboratorio al sitio de ensayo.



*Figura 47. Movilización de la placa desde el sitio de acopio*

Estudio técnico experimental de una placa de hormigón reforzada con fibras de acero apoyada en el suelo aplicado en obras portuarias



*Figura 48. Movilización de la placa al sitio de ensayo*



*Figura 49. Placa colocada en el sitio de ensayo*

### **PASO 3:**

- Una vez colocada la placa en su sitio sin quitar las eslingas que la sujetan se procede acceder debajo de esta y ajustar los apoyos mediante un sistema de rosca que estos tienen, garantizando que estos toquen la placa.

Estudio técnico experimental de una placa de hormigón reforzada con fibras de acero apoyada en el suelo aplicado en obras portuarias



*Figura 50. Ajuste de los muelles*

**PASO 4:**

- Luego de haber ajustado todos los apoyos, se procede a marcar y colocar los puntos de carga en la placa. Al mismo tiempo que se colocan las vigas de reparto sobre los puntos de carga.



*Figura 51. Proceso de marcado de puntos de apoyo*

Estudio técnico experimental de una placa de hormigón reforzada con fibras de acero apoyada en el suelo aplicado en obras portuarias



*Figura 52. Colocacion de puntos de apoyo*

**PASO 5:**

- Una vez colocados las vigas de reparto se procede a movilizar la viga de carga junto al gato del lugar de acopio al pórtico de carga, al mismo tiempo ajustando esta viga al pórtico.



*Figura 53. Movilizado de viga de carga mediante puente grúa al pórtico.*



*Figura 54. Ajuste de viga de carga al pórtico.*

**PASO 6:**

- Una vez con todo el sistema de carga instalado se procede a colocar los equipos de medición de deformación y carga (ordenadores, transductores de desplazamiento, controlador de cargas).



*Figura 55. Equipos de medición colocados en la placa.*

**PASO 7:**

- Ya con todos los equipos instalados se procede hacer una revisión de que todo esté en orden y se procede hacer el ensayo

**3.7.5.3 Método de carga de la placa e instrumentaciones de medida**

En los ensayos realizados se trabajó con un pistón hidráulico acoplado al pórtico de carga en uno de sus extremos mediante tirantes de acero (Figura 56). Este pistón dispone de una capacidad de fuerza máxima de 250 toneladas. La cantidad de fuerza que se aplica a la placa era controlada por un aplicador de fuerza manual que funciona por presión de aceite (Figura 57).



*Figura 56. Pistón hidráulico colocado en viga de carga*

Estudio técnico experimental de una placa de hormigón reforzada con fibras de acero apoyada en el suelo aplicado en obras portuarias



*Figura 57. Aplicador de carga manual*

Para medir las deformaciones de la placa se instalaron captadores de desplazamiento de 50 mm (Figura 58 ) en localizaciones de la placa que nos dieran la mayor cantidad de información posible, para esto se hizo un esquema (Figura 59) y se les asigno un número a los ejes donde se colocaron estos,



*Figura 58. Captador de desplazamiento de 50mm*

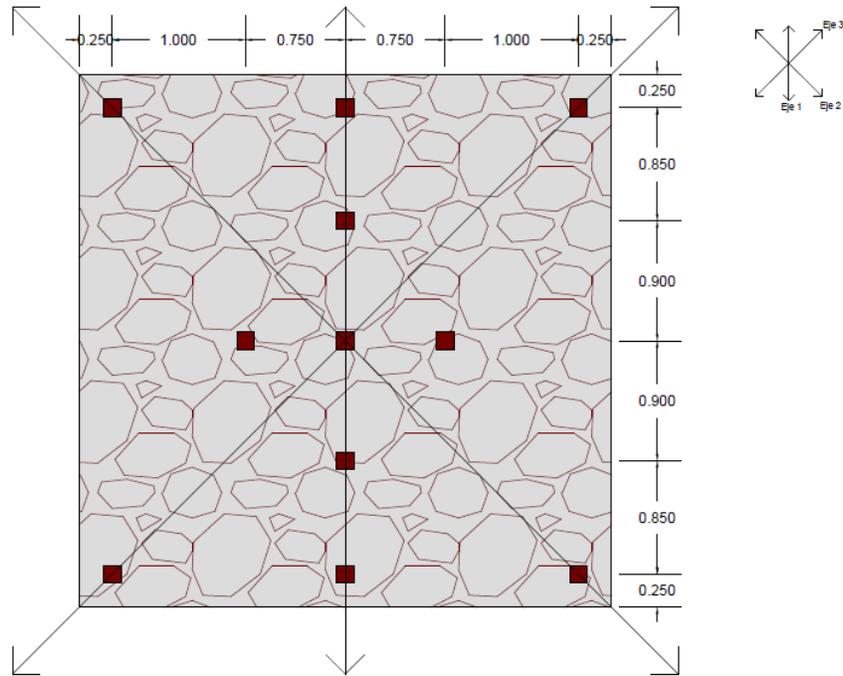


Figura 59. Disposición de captadores de desplazamiento, y ejes de captadores.

## 4 Presentación y análisis de resultados

En este capítulo se presentan los resultados de los ensayos anteriormente descritos en el programa experimental de este estudio. Se describen los resultados de los ensayos de caracterización del hormigón en estado fresco, los resultados de propiedades mecánicas y los resultados del ensayo de las placas. En lo adelante para dar los resultados de este estudio llamaremos al hormigón convencional como “HC”, al hormigón reforzado con fibras de acero como “HRFA” y las amasadas “A” acompañada con un número el cual corresponde al número de amasada.

### 4.1 Ensayo de consistencia del hormigón por cono de Abrams

Los resultados del ensayo de consistencia por el cono de Abrams se presentan en la Figura 60, se puede observar que el HC es ligeramente más fluido que el HRFA, y los valores de asentamiento se mantuvieron entre los valores 12-15 como se planteó en un principio.

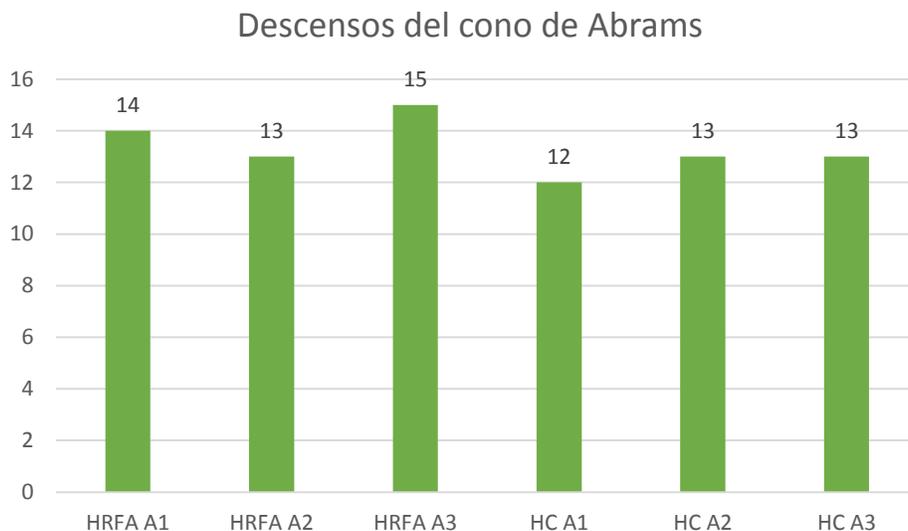


Figura 60. Valores de consistencia

## 4.2 Ensayo de rotura por compresión

De cada hormigón se fabricaron 3 amasadas y de cada amasada se fabricaron 3 probetas cilíndricas, por lo que tenemos un total de 18 probetas cilíndricas. Los resultados obtenidos de la rotura de las probetas cilíndricas a 45 días se presentan en la Figura 61.

Amasada	HRFA	HC
	fcm (MPa)	fcm (MPa)
<b>1</b>	27.7	28
	25	29.9
	25.5	31.1
<b>2</b>	27.7	27.7
	27.2	26
	27.5	26.6
<b>3</b>	25	27.7
	26.1	30.5
	24.4	31.6
<b>Media</b>	26.05	28.89
<b>Desviación</b>	1.28	2.15

Figura 61. Valores de la resistencia a compresión de los hormigones utilizados.

Los resultados de este ensayo muestran un valor ligeramente superior de resistencia en las probetas de hormigón convencional, aunque todos los resultados se mantengan dentro del rango de valores deseados en este estudio.

En la Figura 62 se puede observar la diferencia en el modo de falla por compresión del HC (izquierda) y el HRFA (derecha), donde se aprecia que el HRFA mantiene su integridad mientras que el HC se desintegra, esto se debe al aumento de tenacidad que proporcionan las fibras al hormigón, lo que proporciona una fisuración controlada y deformaciones menores.



Figura 62. Aspecto de probetas luego de ser ensayadas a compresión, en la izquierda tenemos una probeta de HC y en la derecha una probeta de HRFA.

### 4.3 Ensayos de rotura por flexotracción a 3 puntos

Del HRFA se fabricaron 3 amasadas y de cada amasada se fabricaron 2 probetas prismáticas, por lo que tenemos un total de 12 probetas prismáticas. Los resultados obtenidos de la rotura de las probetas prismáticas a 45 días se presentan por amasadas, seguido de una tabla con los resultados obtenidos de resistencias residuales.

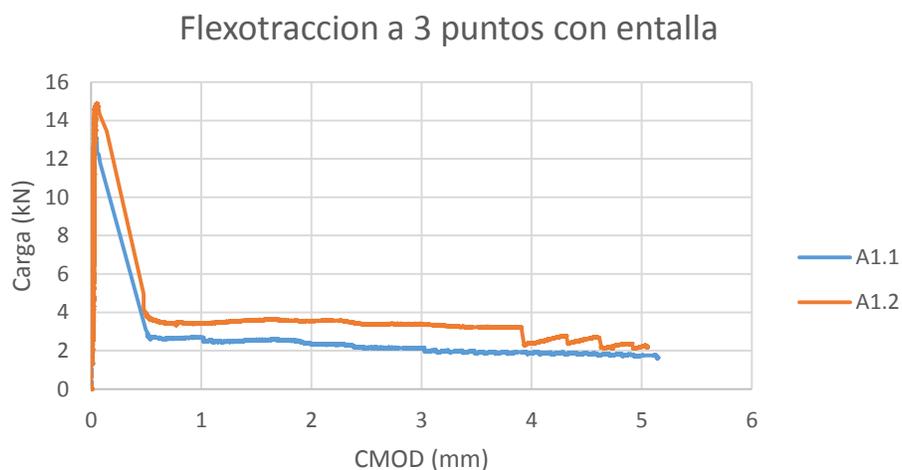


Figura 63. Grafico curva carga apertura de fisura para probetas de amasada 1

### Flexotracción a 3 puntos con entalla

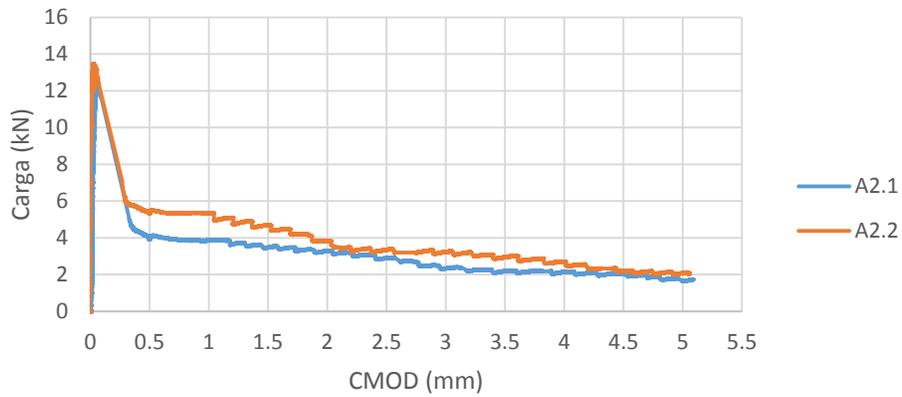


Figura 64. Grafico curva carga apertura de fisura para probetas de amasada 2

### Flexotracción a 3 puntos con entalla

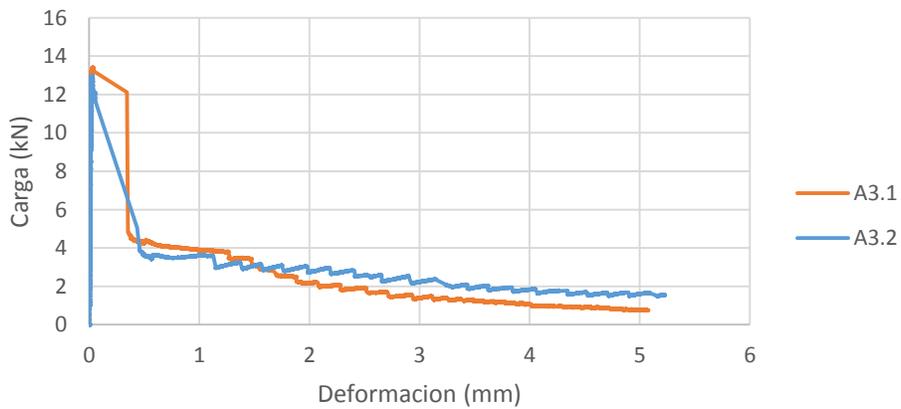


Figura 65. Grafico curva carga apertura de fisura para probetas de amasada 3

HRFA	LOP (MPa)	f <sub>r1</sub> (MPa)	f <sub>r2</sub> (MPa)	f <sub>r3</sub> (MPa)	f <sub>r4</sub> (MPa)	R <sub>e3</sub>
<b>Amasada 1.1</b>	4.31	0.99	0.82	0.69	0.60	0.24
<b>Amasada 1.2</b>	4.76	1.26	1.15	1.08	1.03	0.28
<b>Amasada 2.1</b>	3.93	1.25	1.11	0.92	0.70	0.30
<b>Amasada 2.2</b>	4.31	1.72	1.50	1.07	0.94	0.34
<b>Amasada 3.1</b>	4.29	1.37	0.99	0.62	0.39	0.28
<b>Amasada 3.2</b>	4.15	1.16	0.99	0.82	0.62	0.28
<b>Media</b>	4.29	1.29	1.09	0.87	0.71	0.29
<b>Rango</b>	19%	57%	63%	54%	90%	35%

Figura 66. Tabla de valores de resistencias residuales para hormigón con fibra

Como se puede apreciar en las gráficas anteriores, las fibras de acero proporcionan una pequeña recuperación de la resistencia luego de que aparezca la primera fisura, continuando la absorción de energía además haciendo que el hormigón se comporte como un material dúctil, esto se debe a que las fibras de acero mantienen el paso de tensiones de tracción en la fisura, lo que se traduce en mayor absorción de energía que el hormigón convencional. Se puede observar una dispersión en los resultados aunque las curvas de las distintas probetas siguen una tendencia paralela. En la Figura 67 se muestra el aspecto de una probeta ensayada a flexotracción.



Figura 67. Aspecto de probeta ensayada

Para las probetas de hormigón convencional no se muestran gráficas carga-apertura de fisura, solo se muestran los valores de flexotracción a carga de rotura en la Figura 68, debido a que estos no presentan resistencia residual a flexotracción, produciéndose una falla absoluta luego de que apareciera la primera fisura.

HC	fct (MPa)
A1.1	3.74
A1.2	3.36
A2.1	3.22
A2.2	3.9
A3.1	4.44
A3.2	4.28
<i>media</i>	3.82

Figura 68. Valores de resistencia a flexotracción en probetas con entalla cargadas a 3 puntos de HC

## 4.4 Ensayo de placa

### 4.4.1 Placa de hormigón reforzado con fibras de acero.

Una de las variables registradas durante la realización de los ensayos, es la flecha de las placas en la sección central. Este registro ha permitido realizar las curvas carga-flecha en la placa. Del análisis de la curva carga-flecha se pueden obtener resultados interesantes los cuales se verán a continuación.

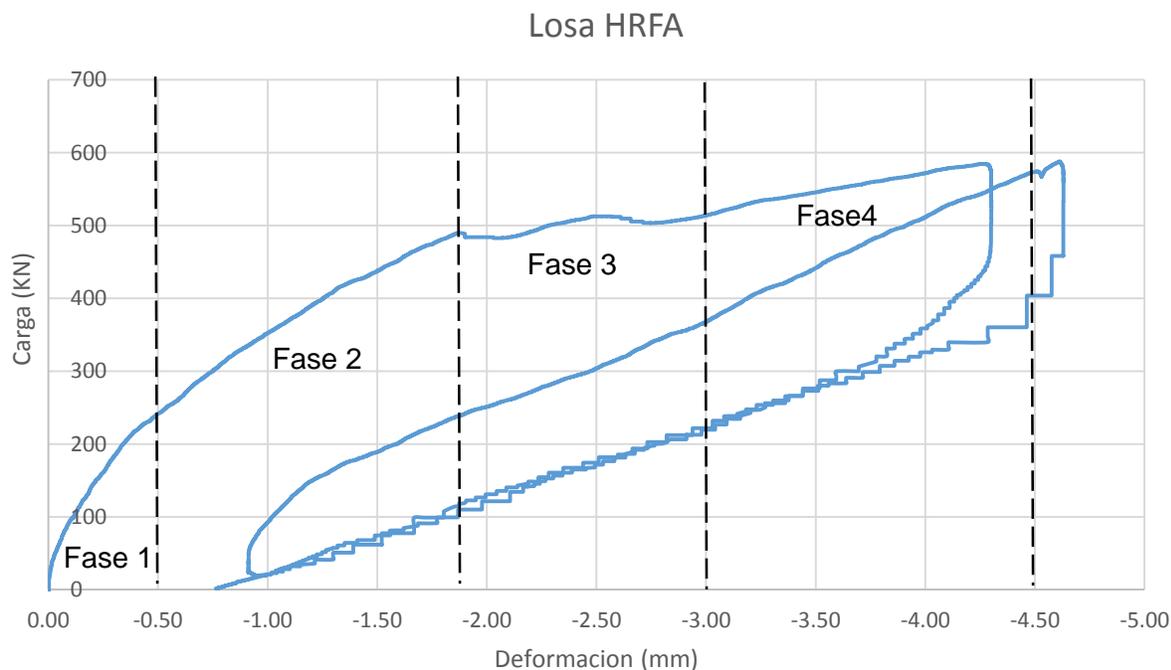


Figura 69 Gráfica carga-deformación en el centro de placa de HRFA

En la Figura 69 se muestra la curva carga-desplazamiento en el centro de la placa, esta figura muestra dos procesos de carga, En el primer proceso de carga se observan cuatro fases.

En la primera fase se observa un comportamiento elástico del hormigón con tensiones pequeñas y sin fisuración en la matriz, por lo que no hay pérdida de rigidez. En esta fase es el hormigón principalmente, el que absorbe las cargas aplicadas.

En la segunda fase se inicia la fisuración en la matriz, momento en el que se produce una pérdida de rigidez que se refleja en un cambio de pendiente de la curva. Es en esta fase donde comienza las fibras de acero a trabajar de forma significativa. Las fibras siguen fuertemente ancladas al hormigón y las tensiones tangenciales son suficientemente altas como para que la fibra se deslice muy poco, no obstante a los incrementos de carga.

En la tercera fase el hormigón alcanza su carga de plastificación para un valor aproximado de 483 kN y una deformación de 1.90mm. En esta fase se produce la plastificación del hormigón y las fibras de acero. A medida que se avanza esta fase, las fibras van perdiendo adherencia con el hormigón y se produce una reducción de pendiente. Es en este punto donde se aprecia que las fibras van perdiendo eficacia.

En la cuarta fase se aprecia una transición en la cual la placa presenta un aumento de rigidez debido a que las cargas ya están siendo sostenidas directamente por el suelo (los apoyos).

Para el segundo proceso de carga se aprecia una ligera contribución de las fibras aunque se nota que la carga está siendo transmitida en su mayoría a los apoyos, lo cual es evidente por la pendiente casi lineal que presenta este proceso de carga.

En las Figura 70 , Figura 71 y Figura 72 se muestran las deformaciones de la placa de hormigón reforzado con fibras de acero para diferentes valores de la carga. Estas figuras muestran los puntos de deformaciones en los lugares donde se colocaron los captadores de desplazamiento en la placa siempre teniendo como origen el centro de la placa. Cada grafica corresponde a un eje de captadores según indicado en la figura anterior.

En las figuras se puede apreciar que las deformaciones aumentan progresivamente junto con el aumento de carga, siendo las deformaciones más grandes siempre para el centro de la placa, se observa que la placa empieza a levantarse en los extremos (valores positivos de depormacion) luego de que la carga de fisuración se sobrepasa, aumentando continuamente con el aumento de carga. Las deformaciones máximas no superaron los 5 mm.

Estudio técnico experimental de una placa de hormigón reforzada con fibras de acero apoyada en el suelo aplicado en obras portuarias

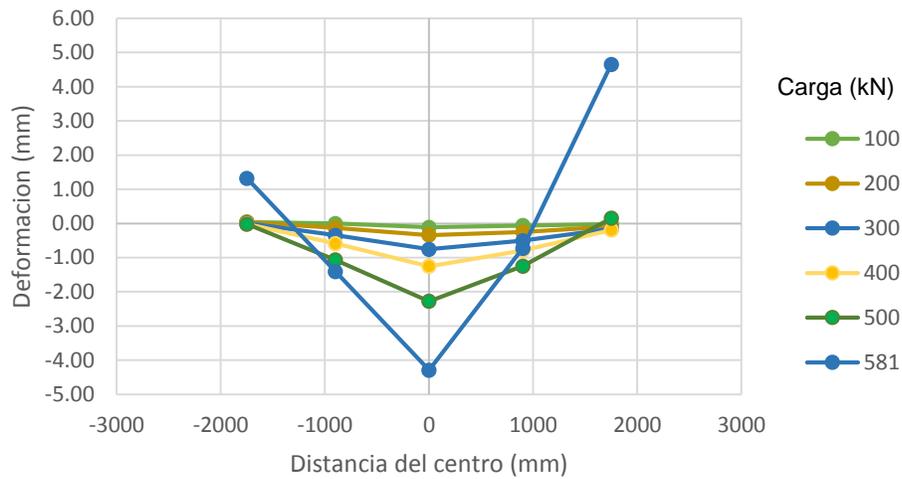


Figura 70. Curvas de deformaciones para distintas carga en el eje 1

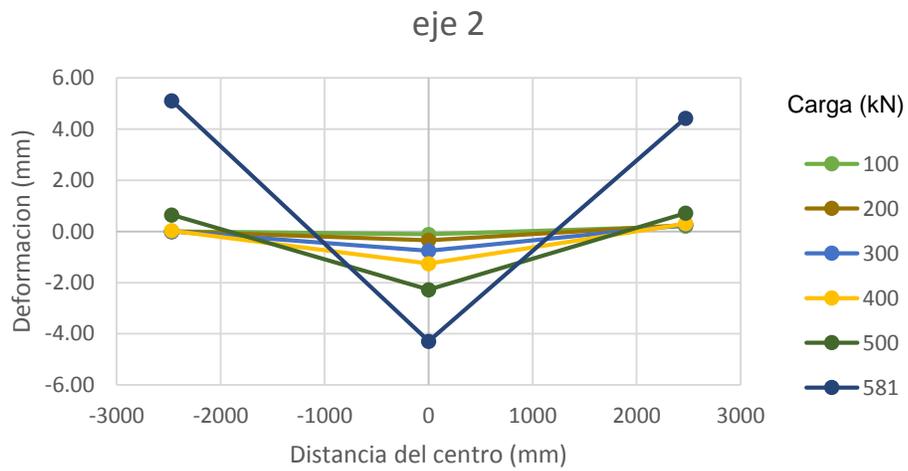


Figura 71. Curvas de deformaciones para distintas carga en el eje 2

Estudio técnico experimental de una placa de hormigón reforzada con fibras de acero apoyada en el suelo aplicado en obras portuarias

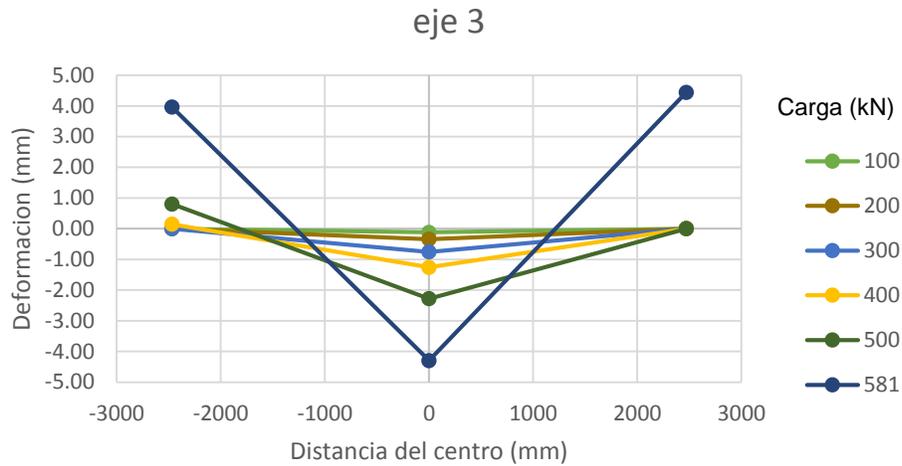


Figura 72. . Curvas de deformaciones para distintas carga en el eje 3

En la Figura 73 se muestra el patrón de fisuración que presentó la placa de hormigón reforzado con fibras, donde se aprecia que la placa permanece íntegra luego de haberse deformado hasta aproximadamente 5mm en el centro, esto se debe a que las fibras no permiten la fragmentación del hormigón. Se produjeron fisuras hasta de 3 mm (Figura 74) y se produjeron levantamiento de las esquinas de hasta 5 mm (Figura 75).



Figura 73. Patrón de fisuración en placa de HRFA

Estudio técnico experimental de una placa de hormigón reforzada con fibras de acero apoyada en el suelo aplicado en obras portuarias



*Figura 74. Fisura en lateral de placa de HRFA*



*Figura 75. Levantamiento de la placa de HRFA en esquina*

#### **4.4.2 Placa de hormigón convencional**

Para explicar los resultados de la placa de hormigón convencional nos basamos en la curva carga-deformación, esta curva se obtuvo a partir de los valores obtenidos en el ensayo de la carga y la deformación en el centro de la placa.

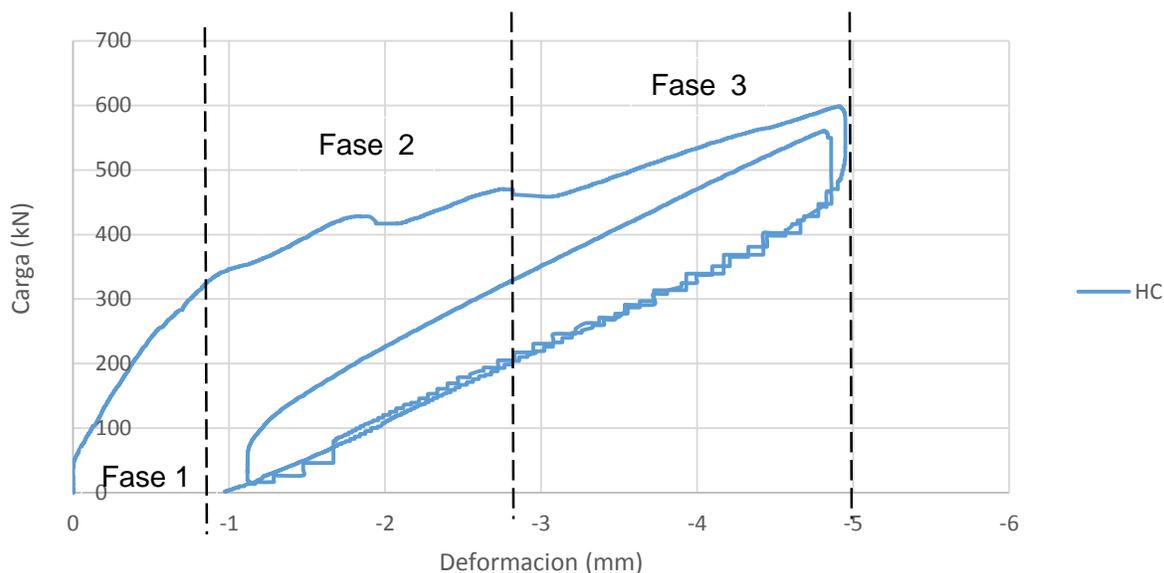


Figura 76. Curva carga deformación en el centro de la placa de HC.

En la Figura 76 se muestra la curva carga-desplazamiento en el centro de la placa, esta figura presenta dos procesos de carga. Para el primer proceso de carga se pueden observar tres fases.

La primera fase en la cual el hormigón permanece en una etapa elástica, con pequeñas tensiones y sin fisuración en la matriz, por lo que no hay pérdida de rigidez.

En la segunda fase se desarrolla la fisuración de la matriz donde se aprecia una disminución de pendiente que se traduce como pérdida de rigidez, es en esta fase donde el hormigón alcanza su carga última la cual corresponde a aproximadamente 427 kN y una flecha de 1.90mm. En esta fase se aprecia el comportamiento frágil del hormigón sin refuerzo.

Luego de esto aparece una tercera fase en la que se aprecia como la carga va directamente a los apoyos sin que el hormigón haga algún aporte, esto es evidente ya que hay un aumento de rigidez que coincide con la rigidez del suelo (los apoyos).

En las Figura 77, Figura 78 y Figura 79 se muestran las deformaciones de la placa de hormigón convencional para diferentes valores de la carga. Estas figuras muestran los puntos de deformaciones en los lugares donde se colocaron los captadores de desplazamiento en la placa siempre teniendo como origen el centro de la placa.

En las figuras se puede apreciar que las deformaciones aumentan progresivamente junto con el aumento de carga, siendo las deformaciones más grandes siempre para el centro de la placa, se observa que la placa empieza a levantarse en los extremos luego de que la carga de fisuración se sobrepasa, aumentando continuamente con el aumento de carga. Las deformaciones máximas no superaron los 5mm.

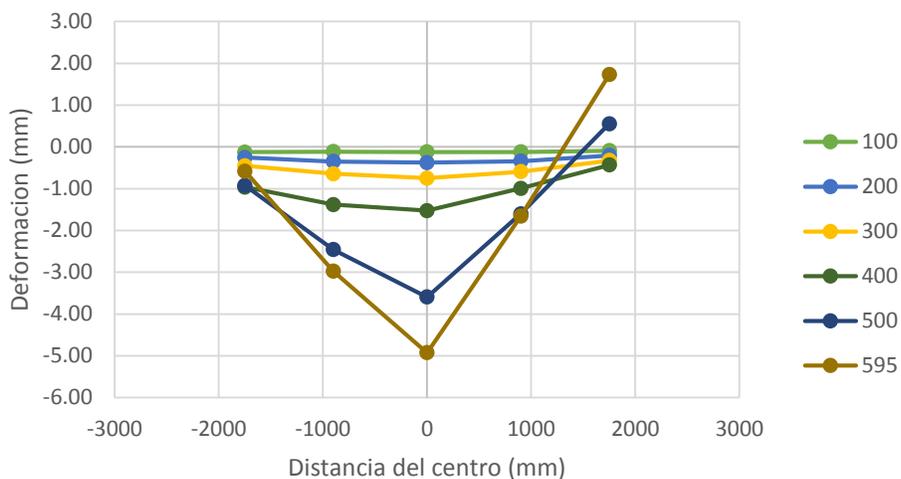


Figura 77. Curvas de deformaciones para distintas carga en el eje 1

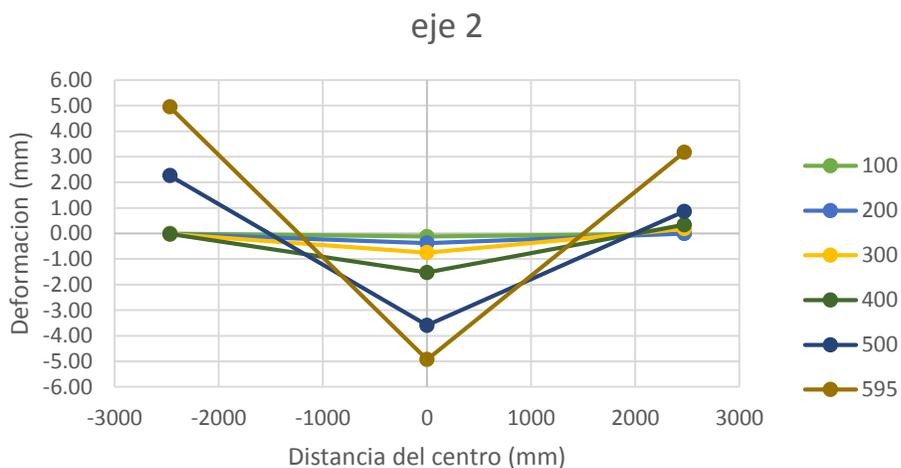


Figura 78. Curvas de deformaciones para distintas carga en el eje 2.

Estudio técnico experimental de una placa de hormigón reforzada con fibras de acero apoyada en el suelo aplicado en obras portuarias

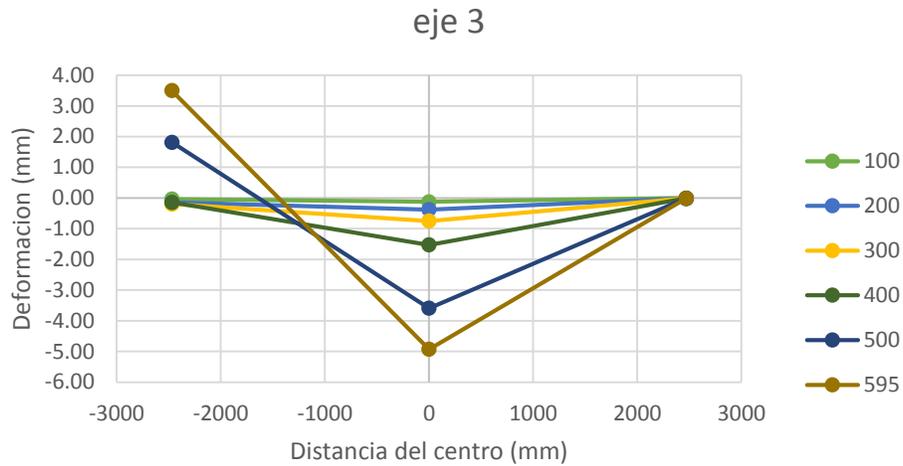


Figura 79. Curvas de deformaciones para distintas carga en el eje 3.

En la Figura 80 se muestra el mecanismo de fallo de la placa, en el cual se aprecia que una vez esta alcanzó su carga de rotura se desintegró, lo cual responde a un modo de rotura frágil. Se tuvo un patron de fisuración extraño en la cara inferior de la placa (Figura 82) .En esta placa se obtuvieron aperturas de fisura de hasta 5 mm(Figura 81)

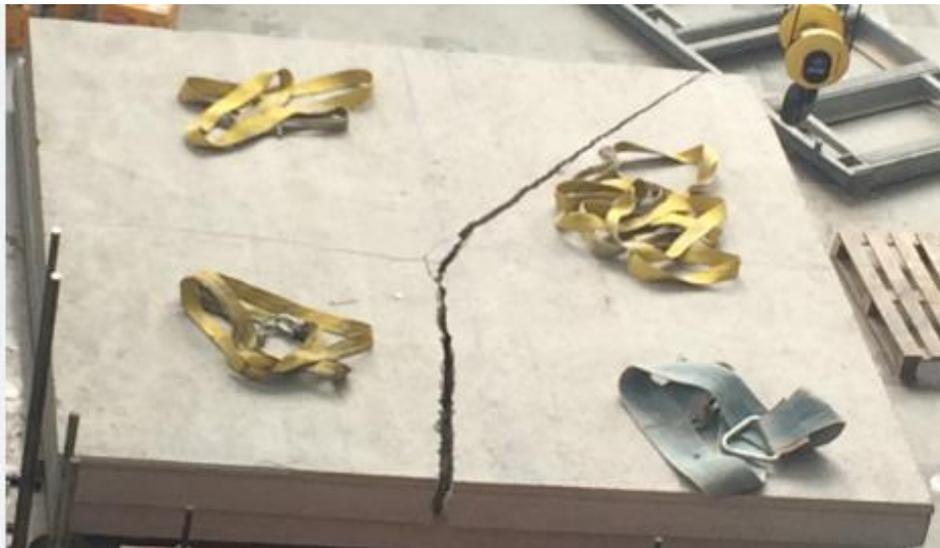
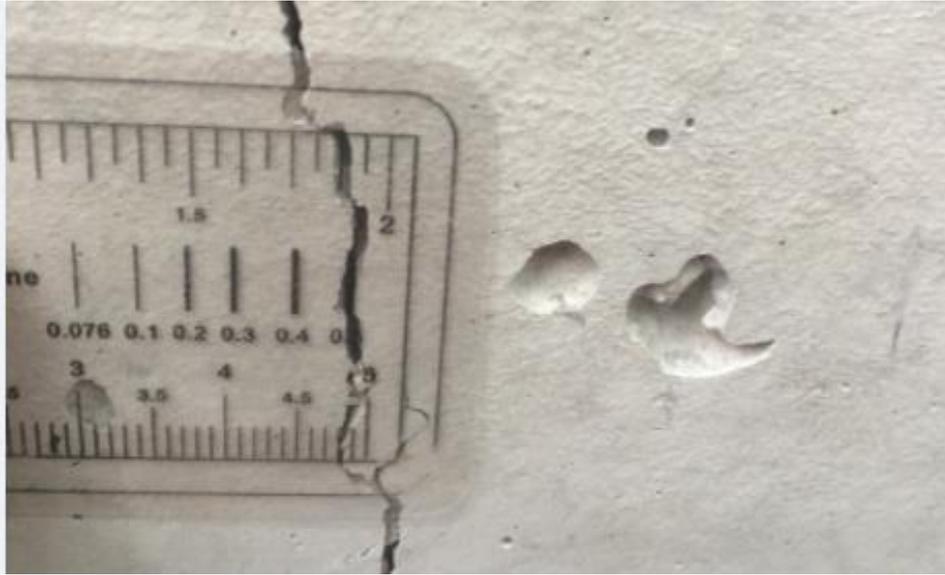


Figura 80. Mecanismo de fallo de placa de hormigón convencional.

Estudio técnico experimental de una placa de hormigón reforzada con fibras de acero apoyada en el suelo aplicado en obras portuarias



*Figura 81. Fisura en el lateral de la placa*



*Figura 82. Patrón de fisuración del centro de la placa en la cara inferior*

#### 4.5 Comparación de comportamiento de placas

Basándonos en las curvas carga-deformación obtenidas del ensayo para el centro de las placas (Figura 83), se compara el comportamiento mecánico de las placas teniendo como resultado lo siguiente:

En principio tanto en la placa de HRFA como en la de HC se aprecia una rigidez igual lo que es evidente debido a que ambas tienen la misma pendiente, esto cambia cuando comienza a fisurarse la matriz del hormigón y aparecer microfisuras, es donde se aprecia una disminución de rigidez para ambos hormigón aunque con diferentes magnitudes. La placa de HRFA presenta una menor reducción en la capacidad de carga, presentando una carga última mayor que la presentada por la placa de HC.

Luego de ser alcanzada la carga última por la placa de HRFA se produce una retención de carga gracias a las fibras (comportamiento dúctil), esto no sucede con la placa de HC la cual una vez alcanza la carga última transfiere las cargas directamente a los apoyos, lo que evidencia un comportamiento frágil por parte de esta. Además de lo dicho anteriormente la placa de HRFA mantiene menos deformaciones que la placa de HC para los mismos niveles de carga.

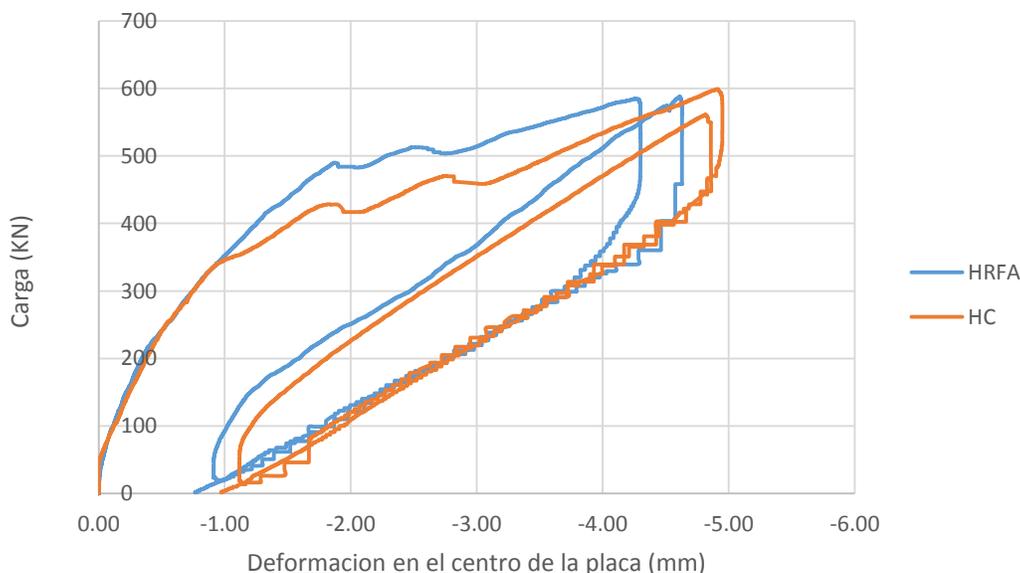


Figura 83. Curvas carga-deformación en el centro de la placa

#### 4.6 Comparación con valores teóricos

En este capítulo se procederá a calcular el valor de carga de rotura teórico para la placa de HRFA, con el fin de compararlo con la carga de rotura resultante en el ensayo. Para hacer estos cálculos utilizaremos la hipótesis de líneas de rotura con las ecuaciones planteadas en el Technical Report 34 version 2013. El valor de resistencia residual a utilizar solo se tomara en cuenta para el cálculo del momento positivo como indica la guía, estando este valor en función de las resistencias residuales a flexotracción del hormigón ( $f_{r1}$  y  $f_{r4}$ ).

Lo primero que hace el método es calcular los parámetros del diseño a realizar. El primer parámetro es el Módulo de deformación longitudinal secante del hormigón “ $E_{cm}$ ”.

$$\text{Siendo } E_{cm} = \left( \frac{22 * f_{cm}}{10} \right)^{0.3}$$

Donde:

$f_{cm}$  es resistencia media a compresión del hormigón

De los ensayos realizados al hormigón tenemos que  $f_{cm} = 26.05$  MPa

Por lo que  $E_{cm} = 29303.18$  MPa

El siguiente parámetro a calcular es la resistencia característica a flexión del hormigón

$$f_{ctk,fl} = \left[ 1 + \left( \frac{200}{h} \right)^{0.5} \right] * f_{ctk(0.05)} \leq 2 * f_{ctk(0.05)}$$

$$\text{Siendo } f_{ctk(0.05)} = 0.7 * f_{cm}^{\frac{2}{3}}$$

Donde

$f_{ctk(0.05)}$  es la resistencia característica a tensión axial del hormigón (5% frágil)

$h$  es el espesor de la placa en mm por tanto 200 mm

por tanto tenemos un valor de  $f_{ctk,fl} = 2.88$  MPa

El siguiente parámetro a calcular es el radio de rigidez relativo

$$l = \left( \frac{E_{cm} * h^3}{12 * (1 - \nu^2) * k} \right)^{0.25}$$

Donde:

$k$  es el módulo de reacción del suelo ( $n/mm^3$ )

$\nu$  es el coeficiente de Poisson del hormigón

Por lo que teniendo

$$k=0.07 \text{ n/mm}^3$$

$$\nu=0.02$$

$$l=734.28\text{mm}$$

Lo siguiente a calcular es el momento resistente de la placa  $M_u=M_n+M_p$

Donde

$M_p$  es el momento flector positivo

$M_n$  es el momento flector negativo

$$M_p = 0.45 * \sigma_{r4} + 0.16 * \sigma_{r1}$$

Donde

$$\sigma_{r1} \text{ es igual a } 0.45 * f_{r1}$$

$$\sigma_{r4} \text{ es igual a } 0.37 * f_{r4}$$

Donde

$f_{r1}$  es el valor de resistencia residual a flexotracción para CMOD=0.5

$f_{r4}$  es el valor de resistencia residual a flexotracción para CMOD=3.5

$$M_n = f_{ctk,fl} * \left(\frac{h^2}{6}\right)$$

Utilizando los valores promedio de  $\sigma_{r1}$  y  $\sigma_{r4}$  obtenidos experimentalmente tenemos que

$$M_u = 30.01 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Luego seleccionando el modelo de cargas correspondiente, que en nuestro caso sería cuatro cargas concentradas tenemos la siguiente expresión de carga última.

$$P_u = \left[ \frac{4\pi}{1 - \left(\frac{a}{3l}\right)} + \frac{1.8 * (x+y)}{l - \frac{a}{2}} \right] * \frac{[M_p + M_u]}{\gamma c}$$

Donde

$a$  es el radio de contacto en mm, en nuestro caso 300 mm debido a que tenemos cuatro puntos de carga de radio 75mm

Estudio técnico experimental de una placa de hormigón reforzada con fibras de acero apoyada en el suelo aplicado en obras portuarias

X la distancia entre las cargas en el eje de x en mm, en nuestro caso 500mm

Y la distancia entre las cargas en el eje de y en mm, en nuestro caso 500mm

I el radio de rigidez relativa en mm

y el coeficiente de seguridad para la carga, según la guía 1.5

Por lo que tenemos un  $P_u = 352.73\text{kN}$

El valor calculado de  $P_u$  por este método resulta coherente con el obtenido mediante el ensayo, el cual ronda los 350kn sin que aparezcan fisuras en la cara superior de la placa.

## **5 Conclusiones**

Este estudio consistió en investigar el uso de las fibras de acero en pavimentos de hormigón apoyados sobre el suelo, se construyeron dos pavimentos de hormigón, siguiendo los criterios de la ROM 4.1-94 la cual entiende que estos pavimentos a efectos de capacidad de carga son equivalentes. Se compararon los niveles de carga que sugiere la ROM para estos pavimentos con los calculados con la instrucción TR-34 y como conclusión se tuvo lo siguiente:

- El ensayo realizado concuerda con lo planteado sobre el modelo de suelo, esto queda evidenciado por la linealidad que se mostró en la curva carga-flecha en la fase donde el pavimento transmite las cargas directamente a los apoyos.
- Los valores de carga última obtenidos calculando con la instrucción TR-34 son muy similares con los valores obtenidos en el ensayo como era de esperarse.
- El mecanismo de fallo en el pavimento de HRFA fue similar al planteado por la hipótesis de líneas de rotura para las fisuras provocadas por la flexión positiva, no se pudo discernir la causa por qué las fisuras provocadas por el momento positivo alcanzaron la cara superior de la placa.
- Los pavimentos de HRFA desarrollan carga de roturas más altas que los pavimentos de HC, inclusive para contenidos bajos de fibras, utilizando espesores hasta en un 25% menor en pavimentos de HRFA.
- La inclusión de fibras de acero en pavimentos de hormigón producen un modo de rotura más dúctil que los pavimentos de hormigón convencional, debido a que las fibras hacen que el hormigón tenga una capacidad de absorción de energía más grande que los pavimentos de hormigón simple, lo que presenta un incremento en la tenacidad de los pavimentos de hormigón reforzado con fibras de acero.
- La estructura de los pavimentos de HRFA permanece integra aun cuando se ha superado la carga de agotamiento de estos, esto sucede por el mecanismo de anclaje que tienen las fibras en el hormigón haciéndolos recuperar parte de la deformación a la que han sido estos sometidos.
- La inclusión de fibra en la matriz de hormigón, hacen que los hormigones desarrollen una resistencia residual a flexión que no tienen los hormigones convencionales, haciendo que los HRFA tengan capacidades de cargas más altas.

Como Futuras líneas de investigación de plantean las siguientes:

Estudiar la influencia de las fibras en el comportamiento mecánico de pavimentos de hormigón utilizando pasadores para transferir cargas.

Estudiar el comportamiento de los pavimentos de hormigón con fibras cuando se aplican cargas en los bordes y esquinas de estos, utilizando como restricción los pavimentos de contornos.

Estudiar la influencia del suelo en los pavimentos apoyados desde el punto de vista de utilizar muelles para simularlo, que tan representativo es en comparación del suelo real.

## Bibliografía

- ACHE. (2000). Manual de Tecnología del Hormigón Reforzado con Fibras de Acero. *Comisión 2, Grupo de Trabajo 2/2, Hormigones Con Fibras*.
- ACI 506.1R-08. (2008). *Guide to Fiber-Reinforced Shotcrete*.
- ACI 544.1R-96. (2009). State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete Reported by ACI Committee 544. *ACI Structural Journal*, 96(Reapproved).
- ACI 544.4R-88. (2009). Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete, 88(Reapproved).
- ACI 544.5R-10. (2010). *Report on the Physical Properties and Durability of Fiber-Reinforced Concrete*. *ACI Structural Journal*.
- ACI Committee 302. (1997). Guide for Concrete Floor and Slab Construction. *Concrete*, 1–65.
- ACI Committee 360. (2010). *ACI 360R-10 Guide to design of slabs-on-ground*.
- Banthia, N., & Trottier, J.-F. (1995). Concrete Reinforced with Deformed Steel Fibers Part II: Toughness Characterization. *ACI Materials Journal*, 92(2), 146–154. doi:10.14359/9765
- Barragán, B. E. (2002). *Failure and toughness of steel fiber reinforced concrete under tension and shear*. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Bindiganavile, V., & Banthia, N. (2000). Rebound reduction in steel fiber reinforced dry-mix shotcrete through matrix modifications. In *Fifth International RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concrete (FRC)* (pp. 149–157).
- Bothma, J. (2013). *The Structural Use of Synthetic Fibres : Thickness Design of Concrete Slabs on Grade*.
- Byars, E. a., Waldron, P., Dejke, V., Demis, S., & Heddadin, S. (2003). Durability of FRP in concrete, current specifications and a new approach. *International Journal of Materials and Product Technology*, 19, 40. doi:10.1504/IJMPT.2003.003553
- Elsaigh, W. a., Kearsley, E. P., & Robberts, J. M. (2005). Steel fiber reinforced concrete for road pavement applications. *Proc., 24th Annual Southern ...*, (July). Retrieved from <http://137.215.9.22/bitstream/handle/2263/6329/021.pdf?sequence=1>
- Giaccio, G., Giovambattista, A., & Zerbino, R. (1986). Concrete Reinforced with Collated Steel Fibers: Influence of Separation. *Journal Proceedings*, 83(2). doi:10.14359/10420
- Gimenez, E. J. (1987). *Propiedades mecanicas y de adherencia de hormigones con fibras de acero contaminados con cloruros*. Universidad Politecnica de valencia.

- Granju, J. L., & Ullah, S. (2005). Corrosion of steel fibre reinforced concrete from the cracks. In *Cement and Concrete Research* (Vol. 35, pp. 572–577).
- Hannant, D. J. (1978). *Fibre Cements and Fibre Contents*. Chichester: Ed. John Wiley & Sons, Ltd.
- Knapton, J. (2003). *Ground Bearing Concrete Slabs* (p. 289).
- Maccaferri. (2005). Fibras como elemento estructural para el refuerzo del hormigón - Manual Técnico. (In Spanish), 251.
- Marais, R., & Perrie, D. (1993). *Concrete Industrial Floors on the Ground*. Midrand, South Africa: Portland Cement Institute.
- Massicotte, B. (2000). Fibre Reinforce Concrete: an Structural Perspective. In *Rilem Proceedings 15, BEFIB*.
- Massicotte, B., Degrange, G., & Dzeletovic, N. (2000). Mix design for SFRC bridge deck construction. In *Fifth International RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concrete (FRC)* (pp. 119–128).
- Mena, F. (2011). *Propuesta de un método de dimensionamiento para pavimentos de HRFA*. Universitat Politecnica de cataluna.
- Minelli, F., & Plizzari, G. a. (2008). Shear design of FRC members with little or no conventional shear reinforcement. *Walraven & Stoelhorst*, 8(2005), 605–610.
- Naaman, A. E. (2000). Fibre Reinforcements for Concrete: looking back, looking ahead. *Rilem Proceedings 15, BEFIB*.
- Nemegeer, D., Vanbrabant, J., & Stang, H. (2000). Final report on Durability of Steel Fibre Reinforced Concrete. In *Subtask 5.1 Durability of SFRC, Brite Euram Project BRPR-CT98-0813*.
- Nunez, E. (1984). *Caracterizacion de suelos*. Neuquen, Argentina.
- O'neil, E. F., & Devlin, J. T. (1999). Durability of Fiber-Reinforced Concrete Under Flexural Stress in a Severe Marine Environment, (September).
- Pérez, F., Miró, R., & Martínez, A. Proyecto, conservación y gestión de firmes. (Asociación Española de la Carretera (AEC) Fundació UPC, Ed.) (2009).
- Pujadas, P. (2008). *Durabilidad del hormigon con fibras de polipropileno*. Universidad Politecnica de Cataluna.
- Serna, P., & Arango, S. (2008). Evolution of the flexural behaviour of precracked SFRC in marine environment. In *BEFIB 2008: 7th RILEM International Symposium on Fibre Reinforced Concrete* (pp. 595–605).

Estudio técnico experimental de una placa de hormigón reforzada con fibras de acero apoyada en el suelo aplicado en obras portuarias

Sorelli, L., Meda, A., & Plizzari, G. (2006). Steel fiber concrete slabs on ground: A structural matter. *ACI Structural Journal*, 103(103), 551–558.

Spanish Standard NLT-357. (1998). Ensayo de carga con placa (The plate load test).

The Concrete Society TR-34. (2003). *Concrete industrial ground slabs*.

TR-63 The Concrete Society. (2007). *Technical Report No. 63, Guide for the Design of Steel-Fibre-Reinforced Concrete*.

UNE-EN 12350-2. (2009). *UNE-EN 12350-2*.

UNE-EN 12390-3. (2009). *UNE-EN 12390-3*.

UNE-EN 14651:2007+A1. (2008). *UNE-EN 14651:2007+A1*.

UNE-EN 14889-1. (2008). *UNE-EN 14889-1*.

Valle, M., & Büyüköztürk, O. (1993). Behaviour of Fibre Reinforced High-Strength Concrete Under Direct Shear. *ACI Journal*, March-April.