

# Desarrollo de materiales con retracción compensada a partir del óxido de calcio (CaO)

Tomo II: Anejos de la tesis

Tesis doctoral realizada por:

Cristina Fernández Rubio

dirigida por:

Sergio H. Pialarissi Cavalaro

Ignacio Segura Pérez

Barcelona, Febrero 2018

Universitat Politècnica de Catalunya  
Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental

TESIS DOCTORAL



---

**-índice-**

A2.1.	LOSA POSTERIOR Y PASILLO LATERAL (ZONA OESTE DEL RECINTO).....	3
A2.2.	LOSA DE SILO Y ESTUDIO DE CARACTERIZACIÓN COMPLEMENTARIO.....	15
A2.3.	LOSAS DEL APARCAMIENTO EN EL RECINTO DE CALES DE PACHS .....	31
A2.4.	LOSA DE LA ENTRADA EN EL RECINTO DE LA FARINERA VILAFRANQUINA.....	41
A2.5.	LOSA DEL CARRIL DE LA BÁSCULA DEL RECINTO DE CALES DE PACHS .....	49
A2.6.	LOSA NORTE Y LOSA SUR EN CIUTAT MERIDIANA .....	55
A2.7.	CARRIL PILOTO EN CIUTAT MERIDIANA Y PRUEBA DE HORMIGONADO PREVIA.....	65
A2.8.	CARRILES DE LA NAVE INDUSTRIAL DE OCHOA EN CORNELLÀ DE LLOBREGAT .....	75
A2.9.	LOSAS CON Y SIN CaO REALIZADAS EN EL RECINTO DE LES VINAGRERIES.....	81
A2.10.	LOSA DE ZANJA CON CaO REALIZADA EN LA CALLE LLUIS BORRASÀ (BARCELONA) .....	93
A2.11.	LOSA DE ZANJA CON CaO REALIZADA EN EL CAMÍ DE LA REINETA (COLLSEROLA- BARCELONA).....	99



## -índice de figuras-

Figura A2. 1 – Localización de las losas .....	3
Figura A2. 2 – a) vertido del hormigón; b) cono de Abrams.....	4
Figura A2. 3 – a) regleado manual del hormigón; b) acabado final mediante regla vibradora.....	5
Figura A2. 4 – a) Resistencia a compresión; b) Resistencia a flexotracción .....	5
Figura A2. 5 – Ensayo de deformación .....	6
Figura A2. 6 – Ensayos de resistencia a compresión (4, 7 y 28 días) .....	7
Figura A2. 7 – Ensayo a flexotracción (7 y 28 días).....	7
Figura A2. 8 – Deformación en probetas curadas a 20°C y HR de 65%.....	8
Figura A2. 9 – Deformación en probetas curadas a 20°C y HR de 95%.....	8
Figura A2. 10 – Deformación en probetas prismáticas curadas a 20°C y HR de 65 y 95%.....	9
Figura A2. 11 – Deformación en probetas cilíndricas curadas a 20°C y HR de 65 y 95% .....	9
Figura A2. 12 – a) localización de la fisura; b) geometría de la fisura y juntas cercanas.....	10
Figura A2. 13 – Medida del espesor de la fisura.....	10
Figura A2. 14 – Ensayo de ultrasonidos; a) proceso de ensayo; b) esquema de las medidas realizadas y referencias .....	11
Figura A2. 15 – Proceso de extracción del testigo 1 (a) y localización del mismo (b) .....	12
Figura A2. 16 – Proceso de extracción del testigo 2 (a) y localización del mismo (b) .....	12
Figura A2. 17 – Testigo 3: (a) extracción y (b) localización del mismo.....	13
Figura A2. 18 – Imagen del corte de cada uno de los testigos extraídos; a) testigo 1; b) testigo 2 y c) testigo 3.....	13
Figura A2. 19 – Localización de la losa.....	15
Figura A2. 20 – a) puesta en obra y; b) final del vertido del hormigón .....	17
Figura A2. 21 – a) exudación de hormigón y pelotas de arena; b) exudación y nidos de fibras.....	17
Figura A2. 22 – a) retoques con llana; b) acabado final mediante regla vibradora.....	18
Figura A2. 23 – Fabricación de probetas cilíndricas de 150x300mm (primer camión) .....	19
Figura A2. 24 – Valores de resistencia a compresión .....	19
Figura A2. 25 – Probetas cúbicas moldeadas en obra .....	20
Figura A2. 26 – Procedimiento de ensayo; a) probetas 1 y 2; b) probeta 4.....	20
Figura A2. 27 – Ensayo de cal remanente; a) secado de las probetas; b) dimensiones y marcado.....	21
Figura A2. 28 – Ensayo de cal remanente; a) curado acelerado; b) ensayo de resistencia a compresión.....	21
Figura A2. 29 – Proceso de medición de los ultrasonidos en las caras.....	22
Figura A2. 30 – Sistema de soporte de los termopares en cada.....	24
Figura A2. 31 – Sondas termopares; a) localización de los puntos de medición; b) puntos de medición (1) perimetral y (2) centro .....	24

Figura A2. 32 – Análisis de las temperaturas en la losa; a) perímetro (1); b) zona céntrica (2).....	25
Figura A2. 33 – a) calorímetro adiabático y b) sistema de adquisición de datos.....	27
Figura A2. 34 – a) Evolución de la temperatura; b) esquema para los valores de la tabla A2.13.....	27
Figura A2. 35 – Localización de las losas.....	31
Figura A2. 36 – Probetas cilíndricas de 150x300mm.....	33
Figura A2. 37 – Valores de resistencia a compresión de ambas losas.....	34
Figura A2. 38 – Diseño del molde del ensayo de expansión.....	34
Figura A2. 39 – a) elementos intervinientes en el ensayo; b) sistema de curado de las probetas.....	35
Figura A2. 40 – Resultado ensayo de deformación.....	35
Figura A2. 41 – 28.11.2013 - Lesiones aparecidas en la losa 380m <sup>2</sup> .....	36
Figura A2. 42 – 28.11.2013 - Lesiones en la losa de 32m <sup>2</sup> .....	37
Figura A2. 43 – 24.04.2014 - a) fisura en superficie; b) nido de fibras en superficie.....	37
Figura A2. 44 – 27.05.2014 - Extracción de testigo en losa de 380 m <sup>2</sup> .....	37
Figura A2. 45 – Levantamiento plano de fisuras en losa de 380 m <sup>2</sup> (Fecha:27.05.2014).....	38
Figura A2. 46 – Cinética de hidratación del cemento portland. Formación de las fases hidratadas (Hewlett et al., 1988).....	39
Figura A2. 47 – Localización de la losa.....	41
Figura A2. 48 – Hormigonado de la losa.....	42
Figura A2. 49 – Primer fratasado.....	43
Figura A2. 50 – a) aspecto superficial después del primer fratasado; b) aspecto superficial final.....	43
Figura A2. 51 – Valores de resistencia a compresión.....	44
Figura A2. 52 – Losa a los 161 días de edad.....	45
Figura A2. 53 – Fisuración observada y localización de las juntas adyacentes.....	45
Figura A2. 54 – Estado de la losa; a) vista general; b) levantamiento del extremo sur; levantamiento del lateral oeste.....	46
Figura A2. 55 – Fisura continua entre pavimento nuevo y existente.....	46
Figura A2. 56 – Localización de la losa.....	49
Figura A2. 57 – a) puesta en obra y; b) proceso de hormigonado.....	50
Figura A2. 58 – a) burbujas en el hormigón del camión 1; b) restos de cal en el camión 2 y 3.....	51
Figura A2. 59 – Valores de resistencia a compresión.....	52
Figura A2. 60 – Diseño del molde del ensayo de expansión.....	53
Figura A2. 61 – Elementos intervinientes en el ensayo de deformación.....	53
Figura A2. 62 – Resultado ensayo de deformación.....	53
Figura A2. 63 – a) Losa con hormigón HM-20/20/B; b) Losa con hormigón HM-30/20/B.....	55
Figura A2. 64 – a) vertido mediante bomba en losa norte; b) vertido en losa norte superior; c) hormigón.....	57
Figura A2. 65 – a) losa norte (inferior); b) losa norte (superior); c) losa sur.....	57
Figura A2. 66 – Resultados de resistencia a compresión; a) losa norte; b) losa sur.....	58

Figura A2. 67 – Alcorques situados en la losa con hormigón tipo HM-20/20/B.....	59
Figura A2. 68 – Mobiliario urbano colocado en la losa Norte.....	60
Figura A2. 69 – Paso de camión por la losa con hormigón tipo HM-30/20/B a los 7 días del hormigonado de esta .....	60
Figura A2. 70 – a) Vista general; b) Localización de la fisura entre la losa norte y la rampa; c) Detalle de fisura .....	61
Figura A2. 71 – Fisuras en el pasillo lateral .....	61
Figura A2. 72 – Fisura a 45º en alcorque de losa Norte (parte inferior).....	62
Figura A2. 73 – Fisura longitudinal y transversal en losa Norte (parte superior).....	62
Figura A2. 74 – Losa Norte superior; a) fisuras en la rampa; b) fisuras a 45º.....	63
Figura A2. 75 – Losa Sur; a) fisura de rotura de punta; b) fisuras de unión entre alcorques.....	63
Figura A2. 76 – a) cono de Abrams; b) aparato adquisición temperatura; c) probetas instrumentadas .....	65
Figura A2. 77 – Valores de resistencia a compresión de las probetas realizadas para el hormigón de prueba.....	66
Figura A2. 78 – Comparativa de las expansiones de las 4 probetas analizadas.....	66
Figura A2. 79 – Localización del carril dentro del recinto.....	67
Figura A2. 80 – a) acceso de la hormigonera; b) hormigonado mediante canal orientable.....	68
Figura A2. 81 – a) paso del camión por la losa Sur; b) acceso al carril a hormigonar.....	69
Figura A2. 82 – Vertido del primer camión.....	69
Figura A2. 83 – Pelotas de fibras de polipropileno durante el vertido del primer camión .....	69
Figura A2. 84 – Vertido del segundo camión.....	70
Figura A2. 85 – Acabado del carril manualmente .....	70
Figura A2. 86 – Zona con tratamiento denudado .....	71
Figura A2. 87 – Aspecto de la base del carril; a) vista longitudinal; b) detalle del contacto con la caseta central.....	71
Figura A2. 88 – Fisuras en el pasillo lateral .....	72
Figura A2. 89 – a) localización fisura I; b) localización fisura II; c) vista general .....	73
Figura A2. 90 – Fisuras aparecidas en el carril.....	73
Figura A2. 91 – Puesta en obra y proceso de hormigonado.....	76
Figura A2. 92 – Diseño del molde del ensayo de expansión .....	77
Figura A2. 93 – Elementos intervinientes en el ensayo de deformación .....	78
Figura A2. 94 – Resultado ensayo de deformación.....	78
Figura A2. 95 – Lesiones; a) fisura de retracción; b) ampliación de la fisura en “a”; c) escalón entre losas contiguas; d) junta de corte transversal.....	79
Figura A2. 96 – Alabeo de una losa de hormigón (convexo) .....	79
Figura A2. 97 – Localización de las losas dentro del recinto; a) imagen general; b) localización de cada losa.....	81
Figura A2. 98 – a) visión general del sistema de vertido; b) hormigonado mediante canalón.....	82
Figura A2. 99 – a) vertido del HRC; b) detalle de la mezcla vertida .....	83

Figura A2. 100 – a) inicio del regleado; b) puntos de hormigón nivelados .....	83
Figura A2. 101 – a) base de la losa; b) sistema de contención de tierras en la zona sudeste .....	84
Figura A2. 102 – Evolución de la resistencia a compresión con el tiempo .....	85
Figura A2. 103 – Resultados de resistencia a flexotracción de probetas prismáticas (28 días).....	86
Figura A2. 104 – Probeta prismática de hormigón con cal (P19) .....	87
Figura A2. 105 – Probeta prismática de hormigón convencional (P20) .....	87
Figura A2. 106 – Deformación probetas cilíndricas de hormigón cal (19); a) probeta 1; b) probeta 2 .....	88
Figura A2. 107 – Deformación probetas cilíndricas de hormigón convencional (20); a) probeta 1; b) probeta 2.....	89
Figura A2. 108 – a) vista general de la división entre las losas; b) detalle de la junta entre los hormigones y el elemento metálico de la puerta de acceso .....	90
Figura A2. 109 – Vista general de la losa con adición de cal a los 3 meses de edad.....	91
Figura A2. 110 – Losa de hormigón convencional; a) fisuración en las esquinas de las juntas; b) fisuración en piel de cocodrilo.....	91
Figura A2. 111 – a) localización de la zanja; b) zona a excavar.....	93
Figura A2. 112 – a) cata realizada en la zona peatonal de la figura 71.b; b) detalle del sustrato .....	94
Figura A2. 113 – a) zanja abierta; b) detalle de los materiales extraídos.....	94
Figura A2. 114 – a) proceso de vertido del hormigón expansivo; b) enrasado y acabado superficial del hormigón visto.....	96
Figura A2. 115 – a) estado del pavimento a los 14 días de edad; b) acabado de los 10 últimos metros de la zanja; c) detalle de acabado producido por la lluvia.....	97
Figura A2. 116 – a) localización de la zanja; b) y c) detalle de la zanja .....	99
Figura A2. 117 – a) rozadora de 25cm; b) compactadora adaptada a las dimensiones de la zanja; c) detalle de sección con capa de material granular compactada .....	100
Figura A2. 118 – a) vertido del hormigón; b) extendido del hormigón en la zanja; c) detalle del hormigón .....	101
Figura A2. 119 – a) capa de hormigón de 20cm; b) detalle de zanja hormigonada; c) aspecto de la zanja acabada .....	102
Figura A2. 120 – Aspecto del hormigón días después de la prueba; a) vista general; b), c) y d) detalles de la zanja .....	102



## -índice de tablas-

Tabla A2. 1 – Datos meteorológicos de la zona (Servei Meteorològic de Catalunya, 2013).....	3
Tabla A2. 2 – Características del hormigón.....	4
Tabla A2. 3 – Descripción de los ensayos realizados.....	5
Tabla A2. 4 – Ensayos de caracterización del hormigón con adición de cal.....	6
Tabla A2. 5 – Espesor de la fisura en función de la longitud.....	10
Tabla A2. 6 – Mediciones de ultrasonidos en distintas localizaciones marcadas en la figura A2.14 (*repetición en el mismo punto).....	11
Tabla A2. 7 – Datos meteorológicos de la zona (Servei Meteorològic de Catalunya, 2013).....	16
Tabla A2. 8 – Características del hormigón.....	16
Tabla A2. 9 – Descripción de los ensayos realizados en la reparación del socavón.....	18
Tabla A2. 10 – Resultados del ensayo de ultrasonidos realizado a la probeta 4.....	22
Tabla A2. 11 – Valores de ultrasonidos separados por zonas.....	23
Tabla A2. 12 – Resultados del ensayo de resistencia a compresión.....	23
Tabla A2. 13 – Datos extraídos de los resultados de calorimetrías (figura A2.34).....	28
Tabla A2. 14 – Datos meteorológicos de la zona (Servei Meteorològic de Catalunya, 2013).....	31
Tabla A2. 15 – Características del hormigón.....	32
Tabla A2. 16 – Descripción de los ensayos realizados.....	33
Tabla A2. 17 – Edades de la losa en las visitas realizadas.....	36
Tabla A2. 18 – Datos meteorológicos de la zona (Servei Meteorològic de Catalunya, 2013).....	41
Tabla A2. 19 – Características del hormigón.....	42
Tabla A2. 20 – Edades de la losa en las visitas realizadas.....	44
Tabla A2. 21 – Datos meteorológicos de la zona (Servei Meteorològic de Catalunya, 2013).....	49
Tabla A2. 22 – Características del hormigón.....	50
Tabla A2. 23 – Descripción de los ensayos realizados en la reparación del socavón en el recinto de Cales de Pachs S.A. ....	51
Tabla A2. 24 – Datos meteorológicos de la zona (Servei Meteorològic de Catalunya, 2013).....	56
Tabla A2. 25 – Características del hormigón.....	56
Tabla A2. 26 – Edades de la losa en las visitas realizadas.....	59
Tabla A2. 27 – Descripción de los ensayos realizados al hormigón de prueba.....	66
Tabla A2. 28 – Datos meteorológicos de la zona (Servei Meteorològic de Catalunya, 2013).....	67
Tabla A2. 29 – Características del hormigón.....	68
Tabla A2. 30 – Edades de la losa en las visitas realizadas.....	72
Tabla A2. 31 – Características del hormigón.....	75
Tabla A2. 32 – Descripción de los ensayos realizados en el Laboratorio de Materiales de la EPSEB (UPC).....	77
Tabla A2. 33 – Características del hormigón (HRC).....	82

---

Tabla A2. 34 – Descripción de los ensayos realizados .....	84
Tabla A2. 35 – Resultados ensayo compresión de testigos de ambos hormigones.....	85
Tabla A2. 36 – Edades de la losa en las visitas realizadas .....	89
Tabla A2. 37 – Características del hormigón .....	96
Tabla A2. 38 – Características del hormigón (áridos de tipo calizo) .....	101

f12

Experiencias reales del  
hormigón de retracción  
compensada (HRC)



## A2.1. LOSA POSTERIOR Y PASILLO LATERAL (ZONA OESTE DEL RECINTO)

### A.2.1. Introducción

Los objetivos de este documento son: la ejecución de una losa con hormigón de retracción compensada (HRC) y la extracción de testigos realizada con posterioridad.

Para el primer objetivo (losa) se expondrá el proceso de hormigonado, así como los ensayos de laboratorio que se llevaron a cabo. Igualmente se definirán las características de los materiales y su proceso de fabricación.

### A.2.2. Objetivo 1: ejecución de la losa

Las losas se ejecutaron los días 27 y 28 de marzo de 2013. Esta losa se localiza dentro del recinto de la empresa Les Vinagrieres del Penedès que se encuentra situada a aproximadamente 4 km al Noroeste de Vilafranca del Penedès. Dentro del recinto las losas se sitúan en la parte posterior oeste y en el lateral Sudoeste. En la figura A2.1 se muestra la localización de ambas losas y la zona aproximada de extracción de los testigos.

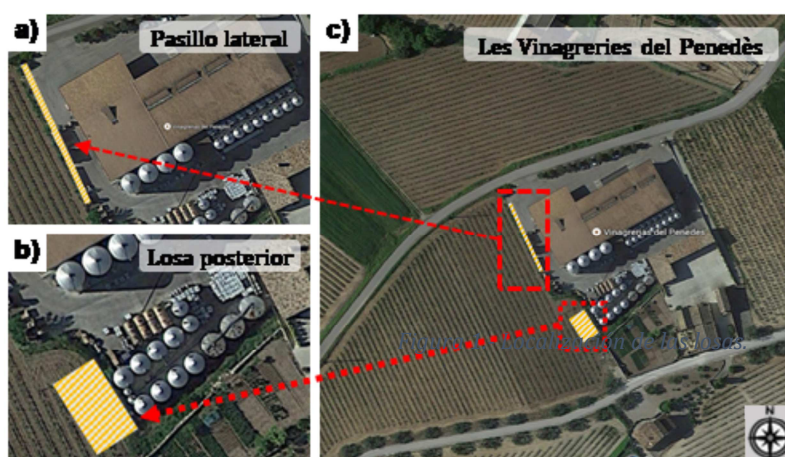


Figura A2.1 – Localización de las losas

Los datos meteorológicos del mes de abril y mayo en esta zona se han tomado de la estación meteorológica situada en La Granada que se encuentra a unos 4km al Noreste de la zona de hormigonado. Los datos registrados de este período se especifican en la tabla A2.1.

Datos medidos 2013	Marzo	Abril
Temperatura media mensual	10,7 °C	12,9 °C
Amplitud térmica media mensual	10,3 °C	12,1 °C
Precipitación mensual	93,0 mm	111,7 mm
Humedad relativa media mensual	71 %	64 %
Irradiación solar global diaria mensual	14,5 MJ/m <sup>2</sup>	19,2 MJ/m <sup>2</sup>

Tabla A2.1 – Datos meteorológicos de la zona (Servei Meteorològic de Catalunya, 2013)

### a) Confección del hormigón

El hormigón fue suministrado por la empresa Promsa situada en Cubelles, con un tiempo medio de transporte de aproximadamente 40 min. En la tabla A2.2 se presenta la dosificación utilizada en ambas losas, siendo el mismo hormigón en los dos casos.

Características del hormigón	Ud.	Datos
Tipificación del hormigón	-	HM-20/20/B
Cemento	kg/m <sup>3</sup>	230
Óxido de calcio (CaO) - Link EVR	kg/m <sup>3</sup> (% spc)	12 (5,22 %)
Relación a/c	-	0,58
Tipo de curado	-	Con aspersores durante 4 días
Fibras de Polipropileno	gr/m <sup>3</sup>	600
Dimensiones	m <sup>2</sup>	380 / 33

Tabla A2. 2 – Características del hormigón

### b) Puesta en obra y acabado superficial

La ubicación de la losa dentro del recinto, así como las condiciones de contorno existentes determinaron el sistema de vertido más adecuado. En este caso fue un vertido directo desde el camión mediante la canaleta orientable para ambas losas. El proceso de vertido del hormigón, así como uno de los conos de Abrams realizado se muestra en la figura A2.2b.

Una vez estuvo toda la losa hormigonada, se prosiguió a darle algunos retoques con la llana y finalmente se le dio el acabado superficial. Este último se realizó mecánicamente empleando una regla vibradora. Ambos procesos son los que se muestran en la figura A2.3. Una vez finalizada la losa, se realizó un curado con aspersores durante 4 días.

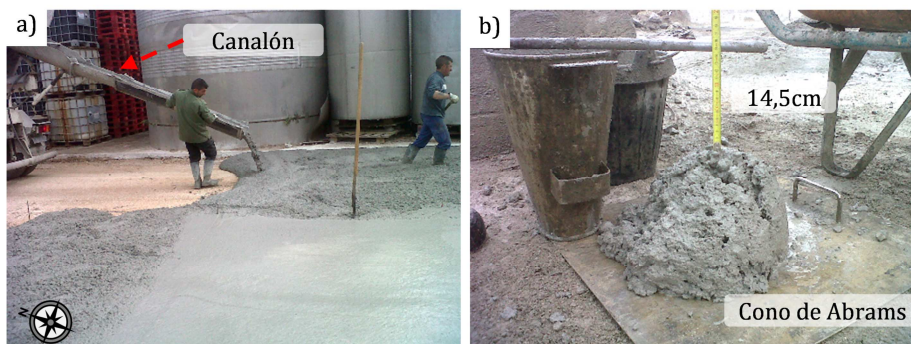


Figura A2. 2 – a) vertido del hormigón; b) cono de Abrams



Figura A2. 3 – a) regleado manual del hormigón; b) acabado final mediante regla vibradora

### c) Ensayos realizados

En este apartado se describirán los ensayos que se llevaron a cabo, así como los resultados obtenidos para cada uno de ellos. Los ensayos realizados en la losa se llevaron a cabo por parte de PROMSA. Los resultados obtenidos son los que se muestran a continuación.

Material	Ensayo	Especificaciones de los ensayos
Hormigón + CaO	Ensayos a compresión	Rc (7 días)
	Ensayos a flexotracción	Rf (7 días)
	Ensayo de deformación	Duración: 26 días

Tabla A2. 3 – Descripción de los ensayos realizados

En primer lugar se mostraran los resultados de resistencia realizados. Estos se muestran en la figura A2.4 mostrando en cada gráfico los datos de compresión y flexotracción respectivamente a los siete días de edad. En la figura A2.4a se muestran los valores de resistencia a compresión de hormigones con cal procedentes de dos de las cubas usadas durante el hormigonado. Por otra parte en la figura A2.4b se muestran los resultados de flexotracción obtenidos para los hormigones de las mismas cubas.

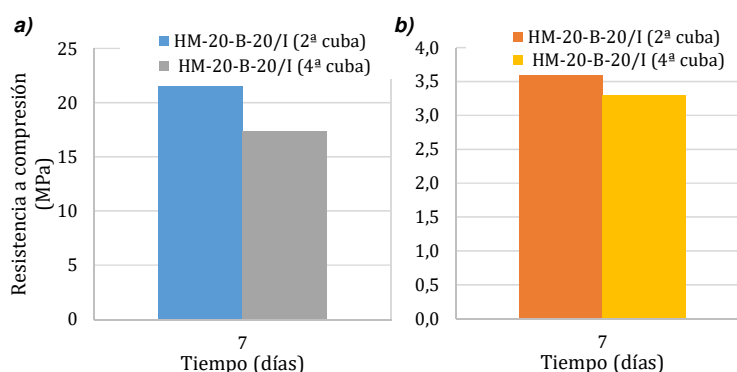


Figura A2. 4 – a) Resistencia a compresión; b) Resistencia a flexotracción

Los resultados de compresión (figura A2.4a) muestran que los valores obtenidos para ambas cubas obtiene valores de resistencia distintos a los 7 días de edad, siendo la diferencia de aproximadamente 5 MPa. En el caso de la segunda cuba, no llega a la resistencia de diseño especificada en la dosificación del material. Para los valores de resistencia a flexotracción (figura A2.4b) los datos obtenidos también son diferentes y con una diferencia de 0,4 MPa

aproximadamente. En este caso, aunque a menor escala, también existe una diferencia entre ambas cubas.

Los ensayos de deformación realizados para el hormigón de la losa son los que se observan en la figura A2.5. En dicha figura se muestra la deformación de hormigón en función del tiempo expresado en días, pudiéndose observar, en primer lugar, que el material expande hasta valores de 0,08 % a los 26 días. Por otra parte la curva muestra una tendencia a realizar ciclos de expansión en los que se observan aumentos y disminuciones de la expansión cada 7 días aproximadamente. Dichos cambios pueden obedecer a condiciones climáticas del lugar de ensayo (fines de semana) o a variaciones propias del material. En el caso de la segunda opción se debería estudiar dicho fenómeno con mayor profundidad para poder determinar la causa de las retracciones observadas.

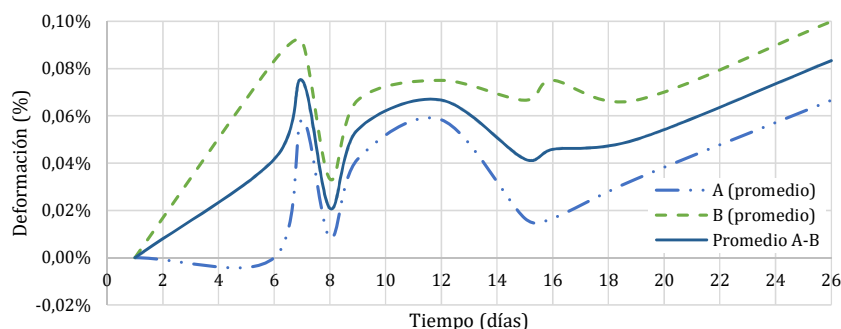


Figura A2. 5 – Ensayo de deformación

### A.2.3. Objetivo 2: caracterización del hormigón. Ensayos previos a la ejecución de la losa

Por tal de determinar las características de deformación del hormigón, así como sus propiedades mecánicas se llevaron a cabo ensayos comparativos entre un hormigón convencional y uno con adición de cal. Los ensayos que se realizaron son los que se muestran en la tabla A2.4.

Material	Ensayo	Especificaciones de los ensayos
Hormigón + CaO	Ensayos a compresión	Rc (4d, 7d, 28d)
Hormigón patrón		Rc (4d, 7d, 28d)
Hormigón + CaO	Ensayos a flexotracción	Rf (7d, 28d)
Hormigón patrón		Rf (7d, 28d)
Hormigón + CaO	Deformación 20°C (65%, 95% HR)	Probetas cilíndricas
Hormigón patrón		Probetas prismáticas

Tabla A2. 4 – Ensayos de caracterización del hormigón con adición de cal

En primer lugar, en la figura A2.6, se muestran, para los dos hormigones ensayados, los resultados de los ensayos de resistencia a compresión a tres edades (4, 7 y 28 días). Como puede verse en dicha figura, para cada material se realizaron dos series de ensayos. Los resultados muestran que, de manera general, los valores de resistencia a compresión son muy similares para ambos materiales en todas las edades. En base a estos resultados no puede determinarse que existan diferencias significativas entre ambos materiales. Podría darse que el efecto del curado o el



porcentaje de adición de cal a la mezcla no sea suficiente para genera un aumento de la resistencia del material.

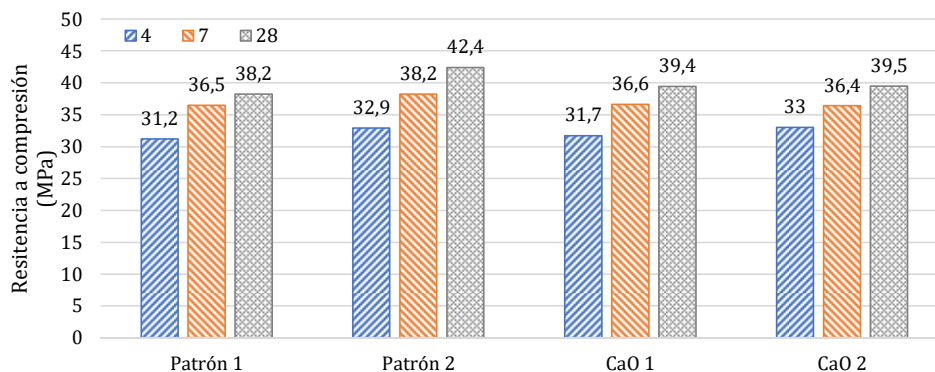


Figura A2. 6 – Ensayos de resistencia a compresión (4, 7 y 28 días)

Los resultados para los ensayos de resistencia a flexotracción son los que se muestran en la figura A2.7 para los dos hormigones estudiados. Al igual que para los ensayos de compresión, en este caso también existen dos repeticiones para cada material.

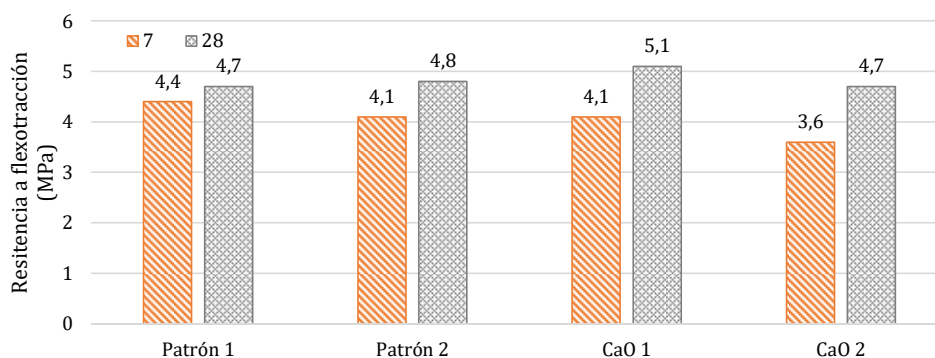


Figura A2. 7 – Ensayo a flexotracción (7 y 28 días)

Los resultados de dicho ensayo muestran que los valores que se han obtenido son igualmente muy similares entre los dos hormigones. Al igual que pasaba para el caso anterior existen algunos valores que se diferencian del resto pero sin que estos valores difieran en demasía del resto. Podría intuirse que a primeras edades la resistencia del hormigón convencional es mayor mientras que a largas edades se dan valores mayores para el hormigón con cal.

Para los ensayos de expansión se realizaron estudios mediante la modificación de dos variables, que son, la humedad relativa de curado y la forma de la probeta. En la figura A2.8 y en la figura A2.9 se muestran los resultados obtenidos para un hormigón convencional y otro con adición de cal variando la humedad relativa de curado.

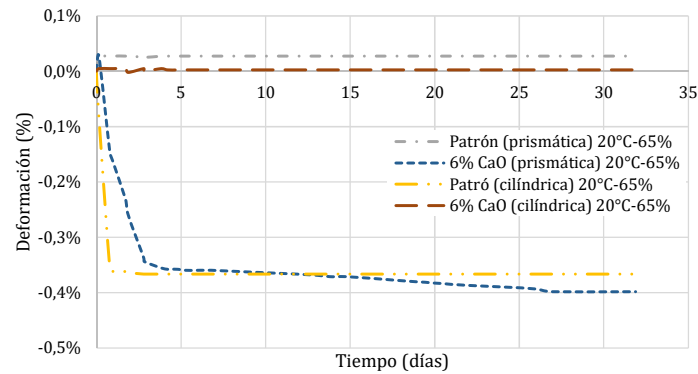


Figura A2. 8 – Deformación en probetas curadas a 20°C y HR de 65%

Los resultados obtenidos para la humedad relativa del 65% son los que se muestran en la figura A2.8. Las curvas obtenidas muestran que solamente una de las probetas expande a esta humedad mientras que el resto se da el fenómeno de la retracción. Para una de las probetas no se obtienen variaciones de deformación durante el período de tiempo de estudio.

La probeta que ha generado un porcentaje de expansión del 0,03% es la denominada “Patrón (prismática)” mientras que el resto, en las que se incluyen las que contienen cal, no generan expansiones, únicamente la cilíndrica con un 6% de cal no sufre deformaciones. En este caso, la humedad relativa del 65% no favorece a la expansión de las probetas con adición de cal, independientemente de su geometría. Para el 95% de humedad relativa durante el curado se obtienen los resultados que se muestran en la figura A2.9.

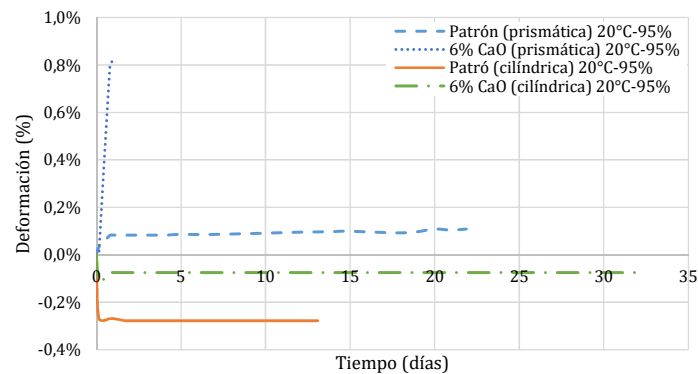


Figura A2. 9 – Deformación en probetas curadas a 20°C y HR de 95%

En la figura A2.9 se observa que un curado del hormigón con una humedad relativa del 95% mejora las propiedades en ambos materiales. En el gráfico se observa que las probetas que generan mayores expansiones son las prismáticas con y sin cal, mientras que las probetas cilíndricas experimentan retracciones. La expansión que se da para las probetas prismáticas es mayor en el caso de la que contiene cal. Esto podría explicarse por el hecho que la humedad alta mejora la hidratación de la cal que resta anhídrica y que podría generar dichas expansiones al hidratarse. Por otra parte, la probeta cilíndrica con cal, aunque con el mismo contenido que la anterior, no se da el fenómeno de la expansión por lo que podría darse que la forma de esta sea una variable influyente en el proceso de expansión.

En la figura A2.10 y en la figura A2.11 se muestran los resultados de los mismos hormigones, anteriormente presentados, pero contemplando como variable la forma de las probetas. Al comparar las probetas de la misma forma pero con distinta humedad relativa de curado se obtienen los gráficos que se muestran en la figura A2.10 y en la figura A2.11 para las probetas prismáticas y cilíndricas respectivamente.

En la figura A2.10 se observa que las probetas prismáticas obtienen valores positivos de deformación a excepción de la probeta curada a 65% de HR y con adición de cal.

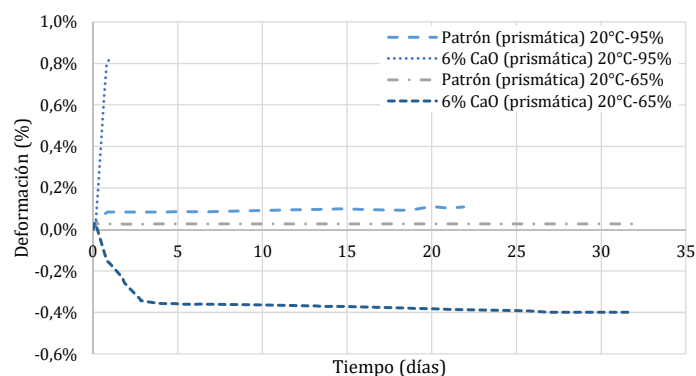


Figura A2. 10 – Deformación en probetas prismáticas curadas a 20°C y HR de 65 y 95%

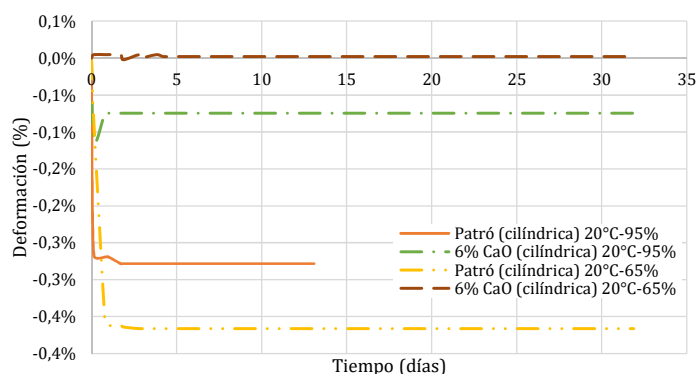


Figura A2. 11 – Deformación en probetas cilíndricas curadas a 20°C y HR de 65 y 95%

En el caso de las probetas prismáticas podría argumentarse que el curado en ambas condiciones de humedad relativa mejora las prestaciones del material en cuanto a la deformación positiva que se genera. Este fenómeno puede estar vinculado con la mejora en la hidratación de los componentes del cemento, que les permite tener agua suficiente para hidratarse por completo y generar nuevos compuestos que den lugar a dichas expansiones.

En el caso de las probetas con adición de cal se observa que en probetas prismáticas el curado es decisivo para poder generar expansiones en el material. En los casos en que la humedad durante el curado no sea la óptima, no existirá agua suficiente para hidratar el material y, por consiguiente, para generar expansiones, por lo que el hormigón se comportará como un hormigón convencional.

Para las probetas cilíndricas se observa que las denominadas “patrón” son las que mayores valores de retracción alcanzan, mientras que las que contienen cal obtienen retracciones menores.

Estas retracciones varían en función de la humedad relativa de curado, dándose mayores expansiones para los hormigones curados al 95% de humedad.

En el caso de los resultados para las probetas cilíndricas que se han mostrado en la figura A2.11 se observa que el curado influye de manera significativa en los valores de deformación que se obtienen independientemente del tipo de hormigón.

#### A.2.4. Objetivo 3: extracción de testigos

Para observar el estado del hormigón endurecido se midió el ancho de fisuras en superficie, mediante lupa, para con posterioridad mediante ultrasonidos determinar la profundidad de las mismas y, por último se extrajeron tres testigos.

##### a) Lupa

Por tal de caracterizar la fisura aparecida en la losa posterior se usó la lupa para determinar el ancho de fisura. Esta tenía una longitud, en planta, de 30 cm y un ancho inicial (en contacto con la junta) de 0,1mm. La figura A2.12 muestra la localización y la geometría de la fisura, y en la figura A2.13 se muestra el proceso de medición de esta.

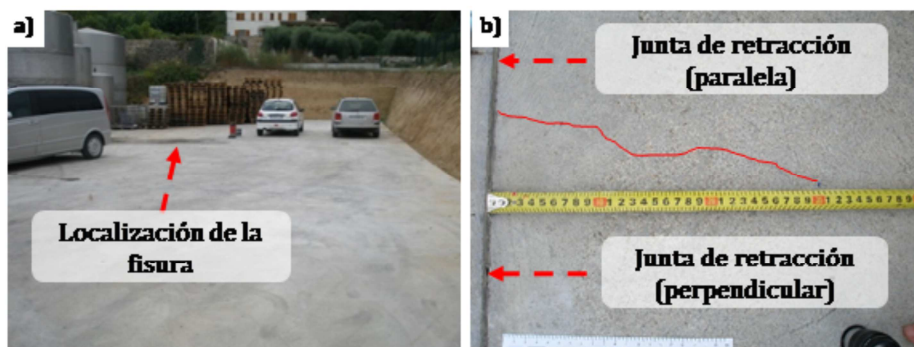


Figura A2. 12 – a) localización de la fisura; b) geometría de la fisura y juntas cercanas

Tabla A2. 5 – Espesor de la fisura en función de la longitud

Distancia del inicio (cm)	Espesor (mm)
5	0,1
10	0,1
20	0,1
25	0,1

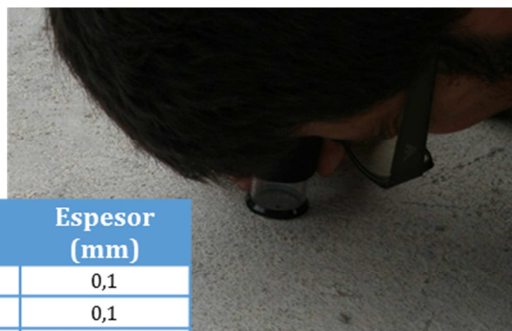


Figura A2. 13 – Medida del espesor de la fisura

Los resultados del ensayo que se recogen en la tabla A2.5 muestran una fisura de espesor uniforme. Por las características del material en que esta ha aparecido se presupone que solamente afecta a la parte superior de la lechada de cemento.

b) Ultrasonidos

Para poder determinar la profundidad de la fisura se realizó el ensayo de ultrasonidos en distintas posiciones por tal de poder comparar los resultados. En la figura A2.14 se muestra el procedimiento del ensayo y en la tabla A2.6 los resultados obtenidos. Los puntos de medición de los datos, así como la referencia de cada medición, se muestran esquematizados en la figura A2.14b.

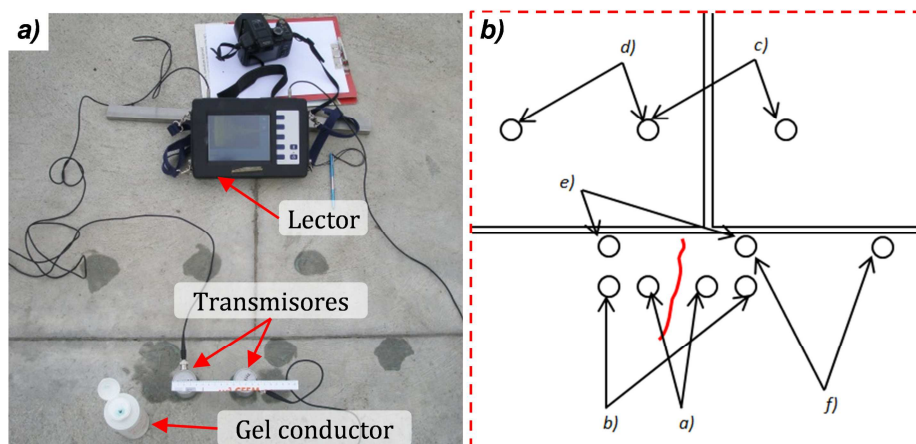


Figura A2. 14 – Ensayo de ultrasonidos; a) proceso de ensayo; b) esquema de las medidas realizadas y referencias

Los resultados de los ultrasonidos determinaron que la profundidad de la fisura era superficial, por lo que se extendía únicamente por la capa de lechada superficial. Esto se corroboró con la extracción del testigo 2 en el que se pudo observar como la fisura se extendía únicamente por la superficie.

Ref.	Distancia (cm) y posición	Velocidad ( $\mu$ s)							
a)	10 8.5 cm bajo la fisura Losas continua	112,6	112,7	112,9	62,7*	62,6*	62,7*	-	-
b)	20 8.5 cm bajo la fisura Losas continua	116,1	116,6	116,8	115,9	116,0	97*	-	-
c)	20 Por encima de la fisura Separación entre losas	400	260	500	498	-	-	-	-
d)	20 Por encima de la fisura Losas continua izquierda	64	-	-	-	-	-	-	-
e)	20 En contacto con la junta Losas continua (a lado y lado de la fisura)	108	109	110	108	109	111	112	-
f)	20 En contacto con la junta Losas continua (sin fisura)	107	109	107	108	111	108	110	-

Tabla A2. 6 – Mediciones de ultrasonidos en distintas localizaciones marcadas en la figura A2.14

(\*repetición en el mismo punto)

c) Extracción de testigos

- **Testigo 1**

El testigo 1 se extrajo de la parte posterior de la losa en contacto con el terraplén. La zona se muestra en la figura A2.15. Una vez extraída se midió el radio en la parte superior ya que por la parte inferior de esta la superficie era demasiado rugosa para poder conseguir dicho valor.

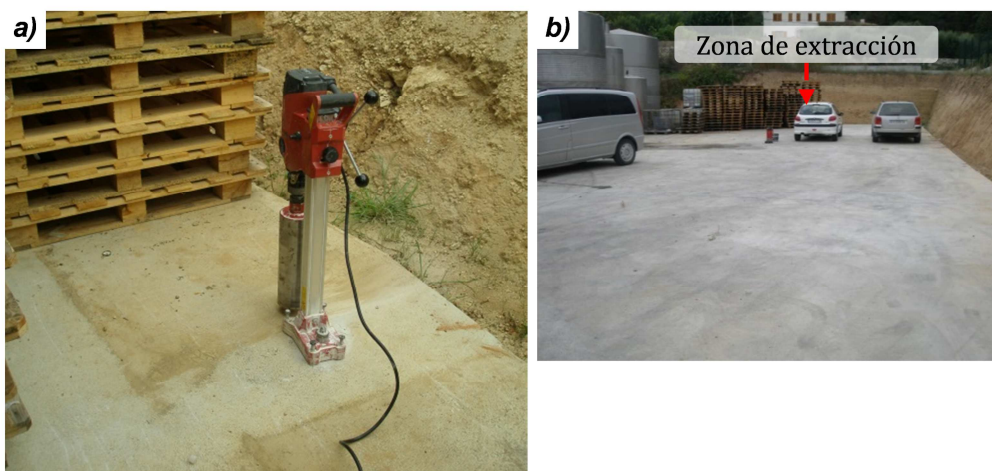


Figura A2. 15 – Proceso de extracción del testigo 1 (a) y localización del mismo (b)

- **Testigo 2**

El testigo 2 se extrajo de la zona central de la losa de 30x30m, incluyendo la fisura observada, es decir, se perforó de tal manera que la fisura quedara contenida en el testigo para poder observar la profundidad de esta. En la figura A2.16 se muestra el proceso de extracción de la probeta, así como la localización de esta.

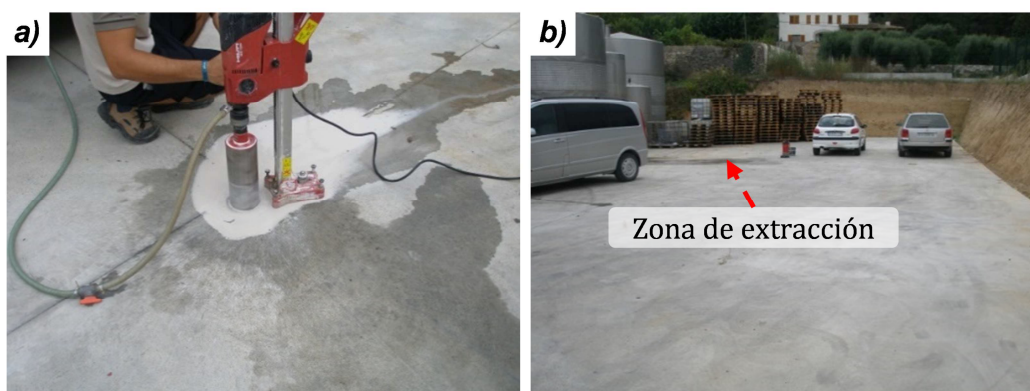


Figura A2. 16 – Proceso de extracción del testigo 2 (a) y localización del mismo (b)

- **Testigo 3**

El tercer testigo se extrajo de la entrada del recinto, de una zona con un hormigón, en un principio, distinto al de la losa de 30x30m. En este caso la zona hormigonada contemplaba todo el lado derecho del recinto, hasta llegar a la losa posterior, cuya anchura aproximada era de unos 2 metros. En la figura A2.17 se muestra el proceso de extracción y la localización dentro del recinto.



Figura A2. 17 – Testigo 3: (a) extracción y (b) localización del mismo

- **Análisis de resultados**

En general, la observación más importante que se obtuvo fue la gran porosidad que presentaban las probetas. En la figura A2.18 se observan los huecos de aire y los poros presentes en cada uno de los testigos. Puede verse que se alcanzan huecos de hasta 5 mm. No se realizó ningún ensayo complementario. Ultrasonidos para detectar posibles microfisuras después de poner las probetas en el agua.

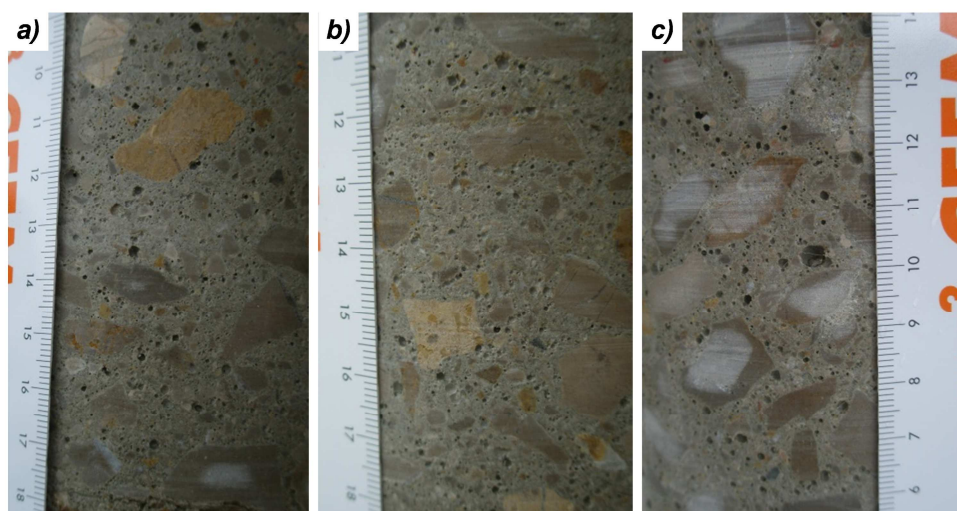


Figura A2. 18 – Imagen del corte de cada uno de los testigos extraídos; a) testigo 1; b) testigo 2 y c) testigo 3

En el caso de los ultrasonidos y de la lupa se determinó que la fisura aparecida era superficial (en la parte superior de la losa). Ello puede ser fruto de la acción térmica ambiental ya que se sitúa en el lado menos coaccionado de la citada losa, y se observó al final de un verano, no habiéndose manifestado con anterioridad.

#### A.2.5. Objetivo 4: inspecciones posteriores

En las inspecciones realizadas con posterioridad no se observaron fisuras en ninguna parte de la losa. Por lo que puede argumentarse que a una edad superior al año y medio la losa se encuentra en perfectas condiciones. Asimismo, en las inspecciones posteriores no se observan síntomas de que dicha fisura progrese, tanto en longitud, como en anchura.

### A.2.6. Conclusiones

Las conclusiones más relevantes extraídas de la realización de esta experiencia son:

- Los ensayos previos de caracterización del material muestran que la humedad relativa de curado de las probetas influye de manera significativa en los hormigones con cal. En estos casos, las probetas curadas a una mayor humedad mejoran las propiedades expansivas del material.
- La forma de las probetas también juega un papel importante en la deformación del material, ya que como se ha podido observar, las probetas prismáticas son las que obtienen valores mayores de expansión con respecto a las cilíndricas.
- Los resultados de resistencia a compresión y flexotracción de ambos materiales obtienen valores muy similares, por lo que no se observa una mejora o empeoramiento al añadir cal al hormigón.
- En cuanto a los resultados realizados para el hormigón de la losa se ha observado que a los siete días de edad la resistencia es inferior a los obtenidos para los hormigones caracterizados con anterioridad. Por otra parte, teniendo en cuenta la resistencia de diseño del hormigón puede verse que el hormigón de la losa ya ha alcanzado aproximadamente el 90% de dicha resistencia a los siete días.
- Finalmente, la única fisura encontrada en la losa era superficial y en visitas posteriores esta no presentó ninguna otra lesión aparente. Por lo que la edad de aproximadamente 2 años el estado del pavimento es muy bueno.



## A2.2. LOSA DE SILO Y ESTUDIO DE CARACTERIZACIÓN COMPLEMENTARIO

### A.2.1. Introducción

Los objetivos de este documento son, por un lado, describir la ejecución de una losa con hormigón de retracción compensada (HRC) y altas resistencias iniciales y, por otro lado, presentar los resultados de los ensayos de laboratorio realizados en los laboratorios de Cales de Pachs, orientados a determinar si quedaba óxido de cal sin reaccionar

Para el primer objetivo (losa) se expondrá el proceso de hormigonado, así como los ensayos de laboratorio que se llevaron a cabo. Igualmente se definirán las características de los materiales y su proceso de fabricación. Durante la ejecución de la losa intervinieron las siguientes personas.

Para el segundo objetivo (laboratorio) se detallará el ensayo realizado y las características de los materiales y maquinaria usados para dicho fin. Finalmente se expondrán los resultados con sus conclusiones.

### A.2.2. Objetivo 1: ejecución de la losa

La losa se ejecutó el día 25 de octubre de 2013 a las 9 de la mañana aproximadamente. Esta losa se localiza dentro del recinto de la empresa Cales de Pachs S.A., al lado de los silos de carga y en contacto con el muro de contención, tal como se muestra en la figura A2.19.

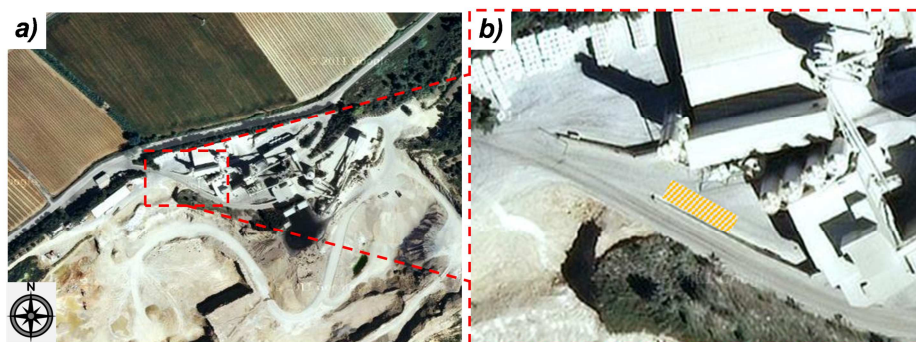


Figura A2. 19 – Localización de la losa

En la figura A2.19a se muestra una vista aérea del recinto de la empresa y se enmarca la zona donde se localiza la losa. En la figura A2.19b se marca la localización exacta de esta, entre el muro de contención y los silos de carga. Como información adicional, se muestra en la tabla A2.7 los datos ambientales del período de hormigonado y del mes siguiente. Los datos meteorológicos se han tomado de la estación meteorológica situada en Sant Martí Sarroca que se encuentra a unos 7 km al Noroeste de la zona de hormigonado.

<b>Datos medidos 2013</b>	<b>Octubre</b>	<b>Noviembre</b>
Temperatura media mensual	17,6 °C	10,6 °C
Amplitud térmica media mensual	11,7 °C	10,6 °C
Precipitación mensual	13,3 mm	129,2 mm
Humedad relativa media mensual	71 %	61 %
Irradiación solar global diaria mensual	13 MJ/m <sup>2</sup>	9,2 MJ/m <sup>2</sup>

Tabla A2. 7 - Datos meteorológicos de la zona (Servei Meteorològic de Catalunya, 2013)

a) Confección del hormigón

El hormigón fue suministrado por la empresa Beton Catalan S.A. situado en el polígono industrial de Sant Pere Molanta a una distancia de aproximadamente 7 km (10 min) del punto de hormigonado. Dicha central es una planta dosificadora de hormigón, lo que significa que los materiales se mezclan en las cubas de los camiones directamente. El principal inconveniente de este proceso es que, en algunos casos, los materiales no terminan de mezclarse correctamente y se observan pelotas de materiales en el momento del vertido del hormigón.

Por otra parte, el agua de amasado se vio modificada durante el período comprendido entre la dosificación y la puesta en obra. En primer lugar, los conductores añaden agua según criterio propio y, una vez en obra, los operarios suelen volver a añadir agua para mejorar la trabajabilidad. En otras palabras, resulta imposible conocer la relación a/c real de la mezcla. La dosificación que se estableció para la realización de la losa es la que se describe en la tabla A2.8.

<b>Características del hormigón</b>	<b>Ud.</b>	<b>Datos</b>
Tipificación del hormigón	-	HM-50/15/F
Cemento	kg/m <sup>3</sup>	450
Óxido de calcio (CaO) - Link EVR	kg/m <sup>3</sup> (%spc)	33,3 (7,4)
Relación a/c	-	0,33
Tipo de curado	-	Sin curado
Fibras plásticas estructurales de 45 mm	kg/m <sup>3</sup>	4,5
Dimensiones	m	14 x 3,2 (45m <sup>2</sup> )

Tabla A2. 8 - Características del hormigón

b) Puesta en obra y acabado superficial

La ubicación de la losa dentro del recinto, así como las condiciones de contorno existentes determinaron el sistema de vertido más adecuado. En este caso fue un vertido directo mediante el canalón orientable tal como se puede ver en la figura A2.20.

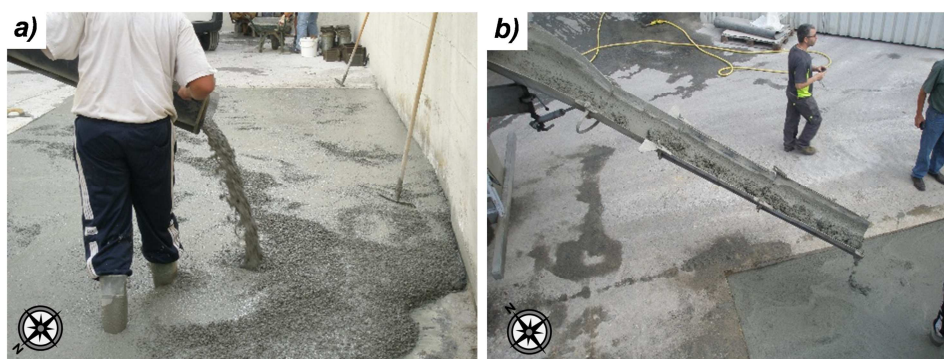


Figura A2. 20 – a) puesta en obra y; b) final del vertido del hormigón

La losa a hormigonar tenía unas dimensiones de 14 x 3,20 m. Las profundidades de esta variaban en función de la zona, siendo la profundidad máxima de unos 20 cm y la mínima de 10 cm en contacto con el muro. Para el hormigonado de esta losa fue requerido el volumen de hormigón de dos camiones. El primer vertido de hormigón era muy fluido y el hormigón vertido exudaba agua y formaba nidos de fibras, tal como se observa en la figura A2.21a y en la figura A2.21b, respectivamente. Para el segundo camión se modificó la dosificación para evitar esta exudación.

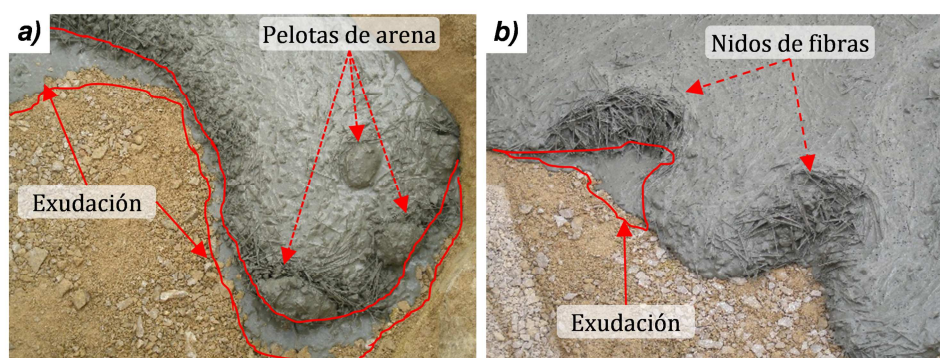


Figura A2. 21 – a) exudación de hormigón y pelotas de arena; b) exudación y nidos de fibras

La exudación del hormigón que se observa en la figura A2.21a y b se debió a la existencia de agua en la cuba, previa a la dosificación del hormigón. En total se contabilizaron 70 l de agua extra en el 1<sup>er</sup> camión con respecto a la establecida según la dosificación. Para los siguientes camiones se requirió que vaciaran el depósito antes de introducir los materiales para el mezclado. El 2<sup>o</sup> camión no presentó problemas de exudación ni de arrastre de fibras. Además de la exudación y de los nidos de fibras, aparecieron pelotas de arena en el hormigón, que son las que pueden verse en la figura A2.21a. Al romper estas pelotas se observó restos de arena y cemento seco.

La colocación del hormigón, así como el acabado final, se llevó a cabo por un único operario. Este, mediante rastrillos distribuyó el hormigón por toda la extensión de la losa y se encargó de romper algunas de las pelotas de arena que aparecieron. Finalmente, una vez estuvo toda la losa hormigonada, se prosiguió a darle algunos retoques con la llana y finalmente se le dio el acabado superficial. Este último se realizó mecánicamente empleando una regla vibratora. Ambos procesos se muestran en la figura A2.22, respectivamente.

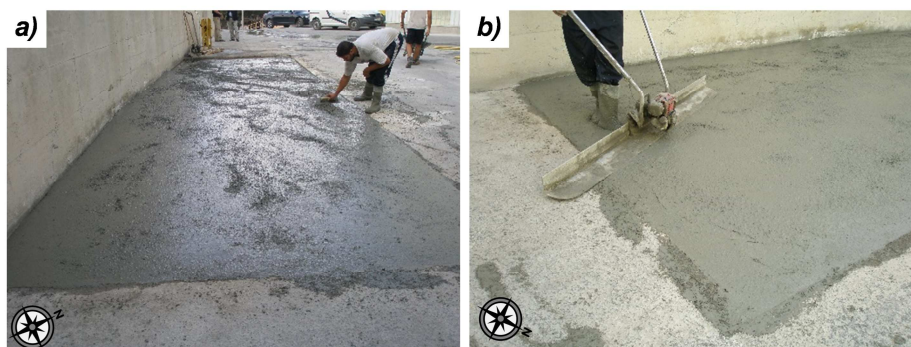


Figura A2. 22 – a) retoques con llana; b) acabado final mediante regla vibradora

En la figura A2.22a se muestran los retoques manuales del contorno de la losa mediante el uso de la llana, mientras que en la figura A2.22b se observa el acabado superficial con regla vibradora. Una vez finalizada la losa, no se realizó ningún tipo de curado. De esta manera se quiso ver el comportamiento a largo plazo de este material sin la aplicación de un curado adecuado.

### c) Ensayos realizados

En relación con el comportamiento del HRC que se ha definido en el apartado anterior, es necesario también llevar a cabo ensayos de laboratorio para poder dar explicación al comportamiento del material. En este apartado se describirán los ensayos que se llevaron a cabo, así como los resultados obtenidos para cada uno de ellos. En la tabla A2.9 se muestran los ensayos que se realizaron para el volumen total del hormigón vertido.

Tipo / Cantidad	Ensayo	Especificaciones de los ensayos
16 cilíndricas (150 x 300 mm)	Ensayos a compresión	Rc (6h, 8h, 2d, 6d, 28d, 75d) por duplicado 4 reserva
7 cilíndricas (150 x 300mm)		Rc (6d, 28d) por duplicado 3 reserva
4 cúbicas (150 x 150 x 150mm)	Cal remanente	Rc después de hervir, lupa, US, etc.
2 puntos	Calorimetría	Temperatura medida a -6, -12 y -18cm de la superficie

Tabla A2. 9 – Descripción de los ensayos realizados en la reparación del socavón

En total se realizaron 23 probetas cilíndricas que se ensayaron a compresión, 16 para el primer camión y 7 para el segundo. El ensayo de cal remanente se realizó únicamente para el hormigón del primer camión. Finalmente se introdujeron dos elementos de plásticos instrumentados con tres sondas de temperatura, cada uno de ellos, en dos puntos de la losa para contemplar la influencia de las condiciones de contorno.

- **Ensayos mecánicos (RC)**

Las probetas necesarias para la realización de los ensayos a compresión se moldearon según se describe en la norma UNE-EN 12390-2 (AENOR, 2009a) y se les cubrió la parte superior con un plástico. En la figura A2.23 se muestra las 16 probetas del primer camión. Las probetas se dejaron 24h en obra y se transportaron al día siguiente al laboratorio de la Escuela de Edificación para proceder con su almacenamiento y conservación hasta la fecha del ensayo correspondiente. Como excepción, ese mismo día, se llevaron 4 probetas para realizar el ensayo a compresión a 6 y 8 horas de edad del hormigón.



Figura A2. 23 – Fabricación de probetas cilíndricas de 150x300mm (primer camión)

En la figura A2.24 se muestran los resultados obtenidos para los dos hormigones y el valor teórico calculado según el Artículo 31.3 de la EHE-08 (Ministerio de Fomento, 2008). El ensayo se llevó a cabo según se describe en la norma UNE-EN 12390-3 (AENOR, 2009b), usándose el refrentado con azufre como método de preparación de las superficies de las probetas. Mediante la resistencia del hormigón a 28 días se determinó el valor para el resto de edades aplicando la formulación del Artículo 31.3 de la EHE anteriormente mencionado.

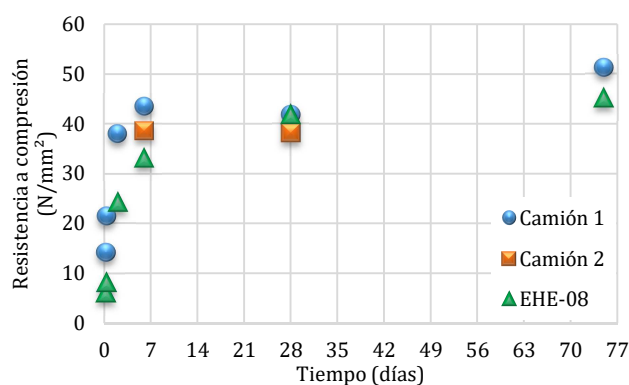


Figura A2. 24 – Valores de resistencia a compresión

En primer lugar, se observa que para todas las edades los hormigones presentan un valor de resistencia superior al calculado mediante el modelo de la EHE. Se observa que a los 75 días de edad el hormigón es un 13% más resistente al valor de cálculo. Por otra parte, al comparar ambos hormigones, se observa un leve descenso de la resistencia en el segundo camión con respecto al primero. Finalmente, se observa que ninguno de los dos hormigones alcanza la resistencia característica establecida en la dosificación a los 28 días, siendo esta un 17% inferior a la establecida (50MPa). Esto puede ser debido a la cantidad de agua libre presente en la mezcla, que al evaporarse ha generado una mayor porosidad.

- **Ensayo para la determinación de cal remanente**

Este ensayo se basa en la realización de un curado acelerado del hormigón para conseguir la hidratación de la cal libre del hormigón. Mediante este procedimiento, y a sabiendas que la hidratación del CaO genera  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  y que expande, se planteó determinar la presencia de cal libre remanente. Al igual que las probetas cilíndricas, estas se moldearon siguiendo la norma UNE-EN 12390-2. En la figura A2.25 se muestran las 4 probetas moldeadas en obra para este ensayo (Nº 1, 2, 3 y 4) correspondientes al hormigón del primer camión.

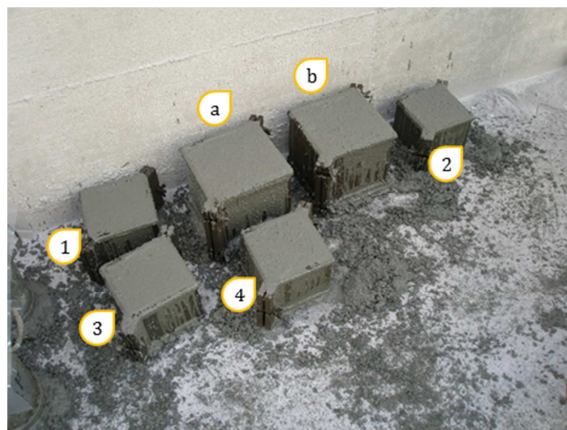


Figura A2.25 – Probetas cúbicas moldeadas en obra

Como se ve en la figura A2.25 se moldearon además 2 probetas cúbicas de tamaño mayor (a y b) para realizar un ensayo de expansión. Los resultados de este ensayo no se tuvieron en cuenta ya que únicamente sirvieron como prueba de medición para futuros ensayos. Las probetas 1, 2, 3 y 4 se agruparon en dos grupos que fueron ensayados de manera distinta tal como se muestra en la figura A2.26.

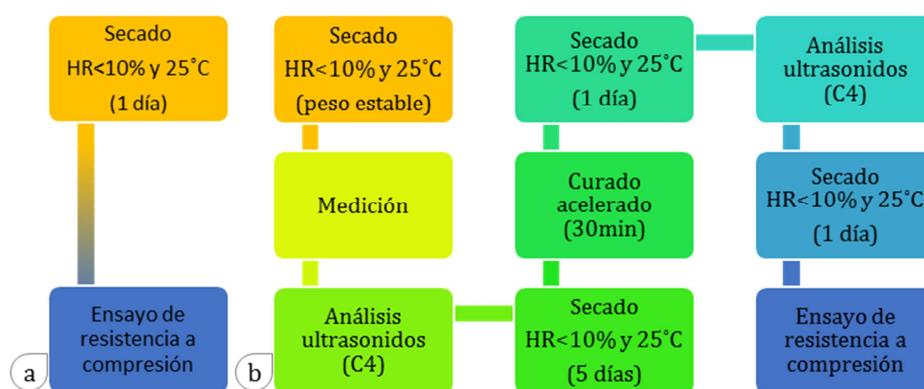


Figura A2.26 – Procedimiento de ensayo; a) probetas 1 y 2; b) probeta 4

En la citada figura A2.26 se muestran los procedimientos que se siguieron para cada uno de los grupos de probetas, siendo el procedimiento “a” el que corresponde a las probetas 1 y 2; y el “b” el que corresponde a la 4. La probeta 3 fue sometida al mismo procedimiento de ensayo que la 4 pero sin la realización de los ensayos de ultrasonidos. Tal como se observa en el esquema, las probetas 1 y 2 solo se secaron durante un día, previo al ensayo a compresión, y durante todo el tiempo anterior estuvieron almacenadas en el laboratorio (temperatura y humedad ambiente). Por el contrario, las probetas 3 y 4 se sometieron a un procedimiento distinto que contemplaba el curado acelerado.

Para poder entender mejor los procesos descritos, en la figura A2.27 y A2.28 se muestran las imágenes pertenecientes a los ensayos realizados a las probetas 3 y 4. Así, en la figura A2.27a se muestran las probetas en el interior de la campana, dónde se introdujo gel de sílice para conseguir desecarlas; mientras que en la figura A2.27b se muestra la probeta 4 con las marcas de medición para poder observar desperfectos una vez realizado el ensayo. Los dos últimos procesos descritos en el esquema se muestran en la figura A2.28.

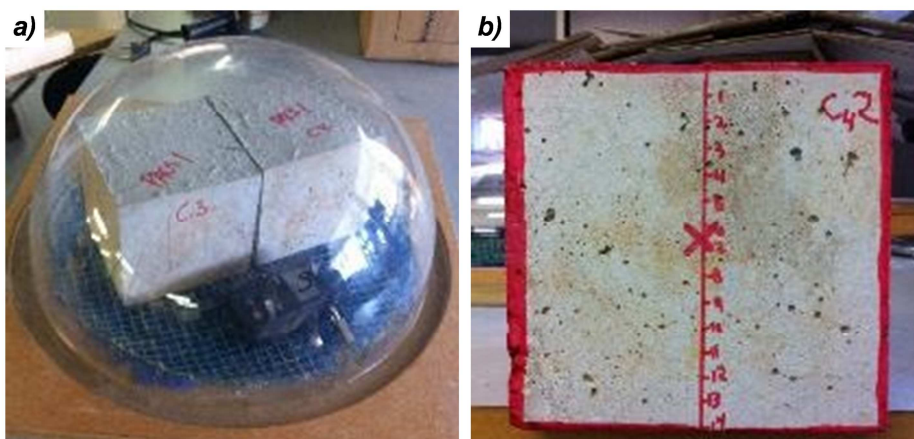


Figura A2. 27 – Ensayo de cal remanente; a) secado de las probetas; b) dimensiones y marcado

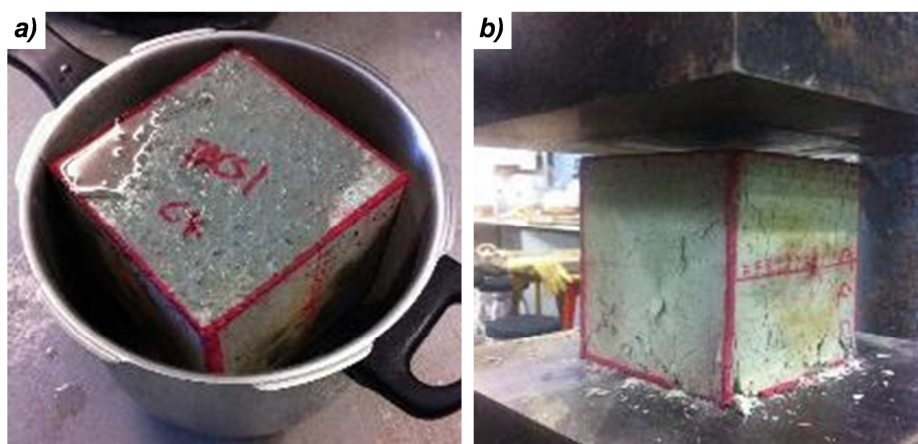



Figura A2. 28 – Ensayo de cal remanente; a) curado acelerado; b) ensayo de resistencia a compresión

En la imagen de la izquierda, que corresponde a la figura A2.28a, se muestra el ensayo de curado acelerado. Este consistió en introducir cada una de las probetas en una olla a presión durante 30 minutos. Ambas probetas se introdujeron en la campana de desecado durante 24 horas y posteriormente se realizó el ensayo de ultrasonidos de la probeta 4. Una vez finalizado el ensayo y secada la probeta 4 durante 24 horas más se procedió a realizar el ensayo de resistencia a compresión con las 4 probetas. La probeta 3 permaneció dentro de la campana durante los ensayos de ultrasonidos de la probeta 4. El ensayo de resistencia es el que se muestra en la figura A2.28b.

Los resultados obtenidos para el ensayo de ultrasonidos de la probeta 4, se muestran en la tabla A2.10. Estos resultados corresponden, tanto a la mediana de los valores ( $\bar{x}$ ) como a la desviación estándar ( $\sigma$ ). El proceso de medición consistió en 4 mediciones por cara, dos en la parte superior y dos en la parte inferior de cada una de ellas, con un total de 8 mediciones. En la figura A2.29 se muestra el proceso de medición que se siguió para cada una de las caras. Se inició la medición en la zona 1 y realizando una “U” se llegó a la zona 4. En la tabla A2.10 se ha diferenciado entre las mediciones superiores e inferiores mediante una trama.

Probeta ensayada (150x150x150mm)	Tiempo ( $\mu$ s)		Diferencia (a-b)	
	Pre-hervido (a)	Post-hervido (b)		
	Car a 4	38,50	33,30	5,20

		33,40	32,40	1,00
		32,60	32,10	0,50
		37,00	33,40	3,60
		38,40	33,30	5,10
	Cara 4-C2	33,80	33,50	0,30
		33,50	33,00	0,50
		37,80	33,40	4,40
Mediana	$\bar{x}$	35,40	33,30	2,30
Desviación Estándar	$\sigma$	2,52	0,52	2,20

Tabla A2. 10 – Resultados del ensayo de ultrasonidos realizado a la probeta 4

En dicha tabla se observa que, una vez hervida, el tiempo que tarda la onda en atravesar el elemento decrece. Esto significa que la velocidad de la onda es mayor, lo que implica que hay más material rellenando los poros ya existentes. En este punto se pueden plantear dos hipótesis, la primera es que la cal ha hidratado dentro de los poros, por lo que la porosidad del material se ha visto reducida, o que el agua procedente del ensayo de curado acelerado no ha sido totalmente evaporada y sigue rellenando los poros.

De los análisis de la mediana y de la desviación estándar calculados, se observa cómo, en la primera columna, se obtiene una desviación de los resultados mayor que para el caso de la segunda columna. Esta dispersión puede asociarse a las zonas de medición de cada una de las caras mencionadas en el párrafo anterior, como se verá a continuación. Al observar los valores más detalladamente se observa que para cada una de las caras, en los valores de la zona superior (1 y 4), la reducción del tiempo es notablemente mayor que en los dos inferiores (2 y 3). Estos resultados se han agrupado por zonas, en la tabla A2.11, para así poder conocer la mediana y la desviación estándar a partir de los valores obtenidos.

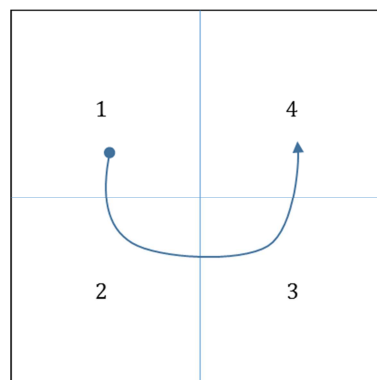


Figura A2. 29 – Proceso de medición de los ultrasonidos en las caras

En primer lugar se observa una reducción de la desviación estándar de estos grupos de datos, confirmándose las diferencias en la velocidad de los ultrasonidos en cada una de las zonas de división. También se observa que, para todos los casos este valor es inferior a cero, lo que significa que los valores obtenidos son más similares entre sí y que se concentran en un rango menor de dispersión. En cuanto a la diferencia entre los dos valores de ultrasonidos de ambas zonas (columnas “a-b”), se observa que para la zona superior el valor medio es de 4,75 mientras que para la inferior es de 0,5. En base a estos datos se plantea la hipótesis siguiente.



Tabla A2. 10	Zona superior (1 y 4)			Zona inferior (2 y 3)			
	(a)	(b)	(a-b)	(a)	(b)	(a-b)	
Cara 4-C1	38,5	33,3	5,2	33,4	32,4	1,0	
	37,0	33,4	3,6	32,6	32,1	0,5	
Cara 4-C2	38,4	33,3	5,1	33,8	33,5	0,3	
	37,8	33,4	4,4	33,5	33,0	0,5	
Mediana	$\bar{x}$	38,1	33,35	4,75	33,45	32,7	0,5
Desviación estándar	$\sigma$	0,69	0,06	0,74	0,51	0,62	0,30

Tabla A2. 11 – Valores de ultrasonidos separados por zonas

Las zonas 1 y 4 corresponden a la parte superior de la probeta moldeada, mientras que la 2 y 3 corresponden a la zona inferior. Durante el moldeo, se da la evaporación del agua por la zona superior de la probeta, mientras que la parte inferior permanece más protegida de este fenómeno. Por otro lado, la gravedad mejora el curado de la zona inferior de la probeta mientras que la falta de agua progresiva de la parte superior no permite que se dé el mismo efecto en la superficie. En base a estas observaciones puede decirse que la diferencia es mayor en la parte superior debido a que el curado acelerado ha permitido la hidratación del CaO hasta el mismo nivel que el de la parte inferior. Por otra parte, podría argumentarse que ha sido el agua retenida en esta parte superior la que ha mejorado las propiedades de ultrasonidos de la probeta debido a la mayor porosidad de esta zona.

Finalmente, y en base a todos los resultados mostrados, se ha observado un descenso en el tiempo del ensayo. El descenso del tiempo puede estar relacionado con que no se han generado microfisuras debidas a la hidratación y expansión de la cal remanente, ya que, de haberse hidratado este componente, el tiempo de la onda aumentaría porque el medio no sería continuo debido a las fisuras. Por otra parte, ha de contemplarse la posibilidad que el tiempo de secado de la probeta no fuera suficiente y, por consiguiente, que si se hayan generado las microfisuras pero que se encuentren rellenas de agua.

Con respecto al ensayo de la resistencia a compresión de las 4 probetas, en la tabla A2.12 se presentan los resultados obtenidos, tanto de la mediana, como de la desviación estándar. Estos resultados no son concluyentes para verificar la existencia o no de cal remanente, ya que no se observan diferencias de las resistencias entre las probetas hervidas y las que no han sufrido este proceso. En otras palabras, si la cal remanente se hubiera hidratado se hubieran generado expansiones, y consecuentemente, la rotura del hormigón que conlleva a una reducción de la resistencia.

Nº probeta	RC (MPa)	Procedimiento	Media (MPa)	Desviación estándar (MPa)
1	50,21	Secada durante 1 día	51,73	2,50
2	53,24	Secada durante 1 día		
3	49,82	Secada y hervida		
4	55,04	Secada, ultrasonidos y hervida		

Tabla A2. 12 – Resultados del ensayo de resistencia a compresión.

- **Calorimetría in situ**

Durante la ejecución, en las primeras 24 horas, se registró la temperatura del hormigón en distintos lugares de la losa para tener en cuenta las condiciones de contorno. Para ello, se colocó un conjunto de termopares en una zona cercana al perímetro y el otro conjunto se colocó en una zona más céntrica. En cada punto de medida, se dispusieron 3 termopares a una distancia de 6 centímetros entre sí en línea vertical. La figura A2.30 muestra el primer prototipo realizado que debía introducirse en el hormigón fresco y la localización de ambas sondas dentro de la losa. El sistema de adquisición de datos era portátil del tipo Squirrel Data Logger.

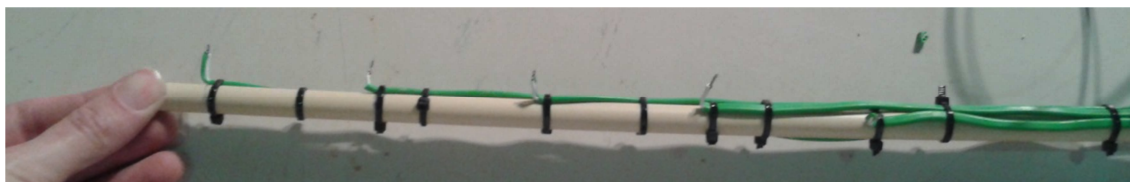


Figura A2.30 – Sistema de soporte de los termopares en cada

En la figura A2.31 se muestra una vista general de la zona de ensayo, pudiéndose observar la zona donde se dispusieron los dos puntos de medida: uno más próximo al a un borde de contacto (perimetral) con la losa antigua y otro en una zona de interior (centro).

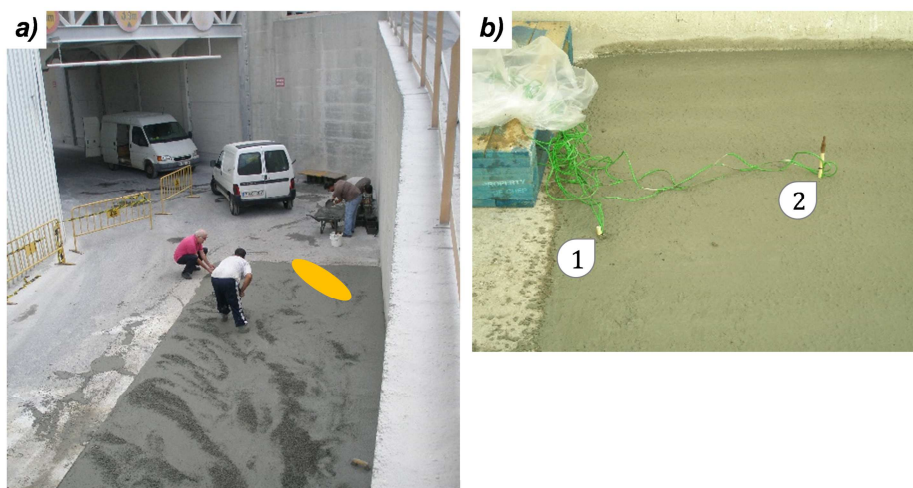


Figura A2.31 – Sondas termopares; a) localización de los puntos de medición; b) puntos de medición (1) perimetral y (2) centro

Los datos de temperatura obtenidos en cada uno de los puntos de medición son los que se muestran en los gráficos de la figura A2.32.

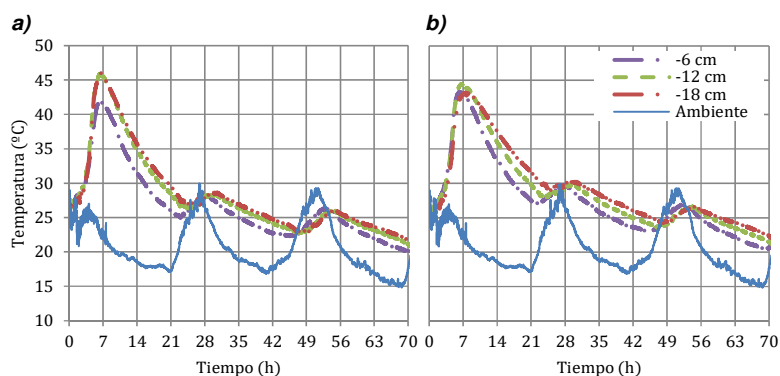


Figura A2.32 – Análisis de las temperaturas en la losa; a) perímetro (1); b) zona céntrica (2)

En ellos se observa la influencia de la profundidad de la sonda en los valores de temperatura. Al comparar las tres curvas se observa que es la que se encuentra a menor profundidad la que menor temperatura alcanza en ambos casos. Este fenómeno se debe a la disipación de temperatura con el ambiente exterior, lo que impide que la temperatura aumente en la misma proporción que a mayor profundidad. Este fenómeno se repite para el resto de curvas, siendo las que más temperatura alcanzan las que se encuentran a mayor profundidad.

#### d) Análisis de resultados

En los subapartados anteriores se han descrito los ensayos realizados, así como los resultados obtenidos para cada uno de ellos. En total se realizaron cinco ensayos distintos para el hormigón de la losa, que recordemos son:

- Ensayos de resistencia a compresión ( $R_c$ ) en probetas cilíndricas de 150 x 300mm
- Ensayos de cal remanente en probetas cúbicas de 150 x 150 x 150 mm
- Ensayos de ultrasonidos en la probeta cúbica 4 de 150 x 150 x 150 mm
- Ensayos de resistencia a compresión en las probetas cúbicas de 150 x 150 x 150 mm
- Adquisición de la temperatura de hidratación *in situ* de la losa

Mediante los análisis que ya se han hecho en cada apartado puede llegarse a las siguientes conclusiones:

Este hormigón obtiene valores de resistencia a compresión superiores a los esperados al aplicar la formulación del Artículo 31.4 de la EHE-08. Por el contrario, y teniendo en cuenta la resistencia característica de diseño, a los 28 días no se había alcanzado aún dicho valor teniendo en cuenta que el hormigón contenía fibras plásticas como armadura. Esto puede deberse a la cantidad de agua presente durante el amasado y al hecho de ser de las primeras veces que se dosificaba con CaO.

El ensayo de cal remanente no fue concluyente, pudiéndose plantear dos conclusiones posibles. La primera conclusión es que no existe cal remanente, ya que no se observaron microfisuras en el hormigón debidas a la expansión que genera la hidratación del CaO. Esto queda corroborado con otros ensayos paralelos realizados como es el de resistencia. La segunda posible

conclusión es que, si se generara la expansión de la cal, pero en tan pequeña cantidad que el  $\text{Ca(OH)}_2$  cristalizara en los poros. El no haber podido determinar si existía o no cal remanente, se considera necesario mejorar este método o aplicar otros.

Los ultrasonidos determinaron un decrecimiento de la velocidad de la onda después de realizar el curado acelerado (cal remanente). Esto puede significar dos cosas. Primero: el método de secado usado no es el más idóneo, ya que no permite la total evaporación del agua, que queda en los poros y genera un medio continuo. Es por esto que es necesario establecer otros procedimientos de secado. Segundo: la expansión del CaO se ha generado y ha rellenado los poros del hormigón, por lo que tendríamos un medio más continuo que el inicial y por consiguiente la velocidad de la onda se reduciría. Se ha podido definir una clara diferencia entre la parte superior de la probeta y la parte inferior de esta en cuanto a la variación en la velocidad de la onda.

La resistencia a compresión de estas probetas determinó que no existía una diferencia clara entre las que habían sido curadas y las que no. Por lo que no puede concluirse que exista cal remanente ni que haya sido hidratada durante el curado acelerado.

Al comparar los resultados de estos tres ensayos puede decirse que no hay presencia de cal remanente en las probetas cúbicas.

El ensayo de temperatura de hidratación del hormigón determinó la existencia de distintas temperaturas a diferentes profundidades. Además, se pudo observar como las condiciones de contorno afectan en los valores de temperatura interna, siendo algo más alta en las zonas perimetrales

### **A.2.3. Objetivo 2: calorimetrías cuasiadiabática en disoluciones de cao y cemento**

Durante la realización de la losa se trabajó paralelamente en el laboratorio de la empresa Cales de Pachs S.A. para realizar unos ensayos de calorimetría. Estos consistían en observar la influencia del cemento al ser añadido en distintos porcentajes a una disolución de agua y CaO (Link EVR) preestablecida.

#### a) Procedimiento de ensayo

El procedimiento seguido es el que se usa en el control de calidad de las cales que esta empresa fabrica, de acuerdo con los siguientes pasos:

- Se pesan 600 ml de agua destilada que ha de estar a  $20\text{ }^\circ\text{C} \pm 0,5$ ,
- Paralelamente se pesan 150 gr de CaO, en este caso del tipo Link EVR
- Una vez pesados los materiales, se vierte el agua en el calorímetro y se pone en marcha el agitador.
- Cuando la temperatura se estabilice dentro del recipiente se vierte el CaO y simultáneamente se pone en marcha el programa de adquisición de datos.

Los datos se guardan cada minuto, y para este ensayo el tiempo suele ser aproximadamente de 20 minutos. En la figura A2.33 se muestra el laboratorio de Cales de Pachs S.A. dónde se realizaron los ensayos de calorimetría adiabática descritos, pudiéndose ver el calorímetro

cuasi adiabático tipo Dewar (figura A2.33a) y el sistema de adquisición de datos (figura A2.33b). El ensayo que se llevó a cabo sirvió para determinar la influencia del cemento en la mezcla base, para ello no se modificaron los pesos de los materiales del ensayo descrito en el párrafo anterior. El ensayo modificado se realizó añadiendo cemento al ensayo base en 4 porcentajes distintos con respecto al peso del CaO. Las dosificaciones usadas para dicho ensayo contemplan los pesos de cemento en las proporciones 1 % (1,5 gr), 5 % (7,5 gr), 10 % (15 gr) y 20 % (30 gr).

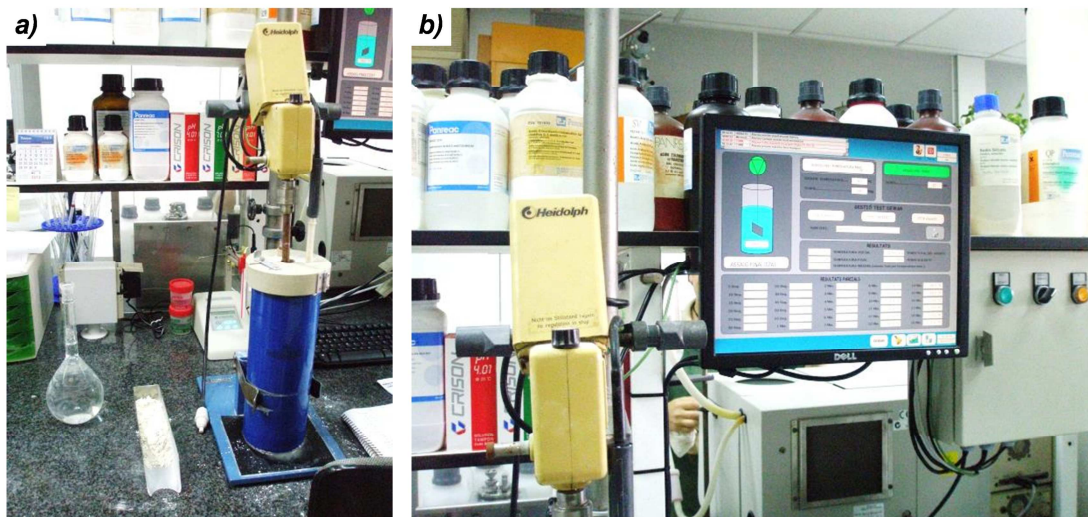


Figura A2. 33 – a) calorímetro adiabático y b) sistema de adquisición de datos

El procedimiento de ensayo en estos cuatro casos fue el mismo que para el ensayo base de agua y CaO con una pequeña modificación. En este ensayo se siguió el mismo procedimiento para el agua pero el cemento y la cal se introdujeron al mismo tiempo en el calorímetro. Para ello, se pesó primeramente los 150 gr de CaO en el recipiente y, después de tararlo, se pesó el cemento en el mismo recipiente. De esta manera ambos estaban en las mismas condiciones. Una vez realizados los 4 ensayos se graficaron los resultados que son los que se muestran en la figura A2.34a, juntamente con la calorimetría de la cal sin adiciones.

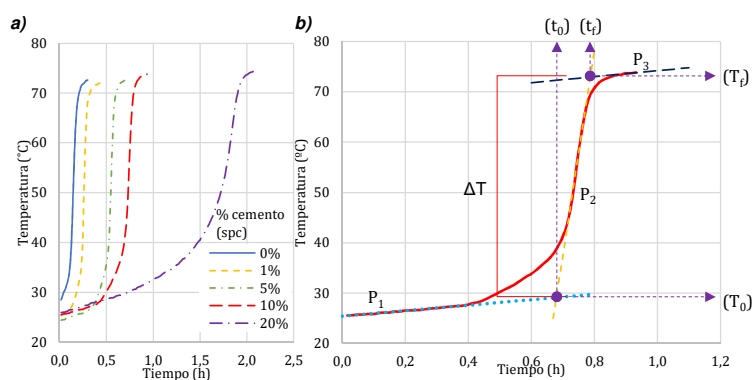


Figura A2. 34 – a) Evolución de la temperatura; b) esquema para los valores de la tabla A2.13

En primera vista se observa que el cemento retarda la evolución de la temperatura de hidratación (figura A2.34a), pero no tanto la cinética de las curvas, sobre todo las primeras cuatro. Se observa también que la temperatura final es muy parecida en todas ellas, lo que implica que esta se debe principalmente al CaO y no tanto al cemento. Para evaluar los resultados se ha realizado un

esquema (figura A2.34b) que describe la localización de los parámetros que se muestran en la tabla A2.13.

Dosificación	Cemento gr (%)	P1	P2	P3	T0 (°C)	t0 (h)	Tf (°C)	tf (h)	$\Delta T$ (°C)	$\Delta t$ (h)
1	0 (0)	56,6	508,2	6,0	33,8	0,11	71,9	0,19	38,1	0,07
2	1,5 (1)	11,5	584,4	6,0	27,8	0,22	71,2	0,30	43,4	0,07
3	7,5 (5)	6,8	482,4	12,0	27,6	0,50	71,0	0,59	43,4	0,09
4	15 (10)	5,5	409,2	6,0	29,1	0,68	73,6	0,79	44,6	0,11
5	30 (20)	5,8	127,2	12,0	35,3	1,63	72,5	1,92	37,3	0,29
Mediana	$\bar{x}$	6,8	482,4	6,0	29,1	0,50	71,9	0,59	43,4	0,09
Desviación estándar	$\sigma$	22,1	176,4	3,3	3,6	0,6	1,1	0,7	3,4	0,1

Tabla A2. 13 – Datos extraídos de los resultados de calorimetrías (figura A2.34)

Del análisis de la tabla anterior se pueden extraer los siguientes datos. En los valores de P1 que corresponden a la pendiente del primer tramo, se observa que esta decrece a medida que aumenta en contenido de cemento, el mismo comportamiento se da para P2. En el caso de P3, que corresponde al último tramo, no se observan muchas variaciones entre los resultados, puede decirse que el proceso de estabilización es muy similar. Ha de mencionarse que los datos de la dosificación 1 no pueden ser comparados con el resto debido a que la temperatura inicial del ensayo es mayor a la del resto. Esto se debe a que el ensayo no se realizó el mismo día y fue facilitado por la empresa para poder obtener la tendencia de la curva sin adición de cemento.

En cuanto a los puntos de intersección de las pendientes ( $t_0, T_0$ ) y ( $t_f, T_f$ ) se observan diferencias más importantes. En primer lugar, el tiempo del primer punto aumenta a medida que lo hace el porcentaje de cemento, lo que está relacionado con la pendiente del primer tramo y la longitud de este. En el caso de la temperatura para este primer punto, los valores son algo más dispersos ( $\sigma = 3,6$ ). Para el segundo punto se dan resultados similares a los del primero en cuanto a la variación de los valores, es decir, tiempos parecidos, pero temperaturas más dispersas que aumentan a medida que lo hace el contenido de cemento.

Finalmente, la variación de temperatura, tomada entre los dos puntos de intersección anteriores tiene un valor medio de 43,4 °C, con una variación de los valores de 3,4. Hay que mencionar que dentro de estos rangos se obtienen variaciones menores con el 20 % de cemento y sin cemento, mientras que, para los valores de 1, 5 y 10 % la diferencia es mayor.

#### b) Análisis de resultados

Los resultados de calorimetría muestran claramente la influencia del cemento al ser hidratado junto con el CaO. La adición de cemento se traduce en un aumento de temperatura en el calor de hidratación y un aumento en el tiempo en que se da. Este aumento de temperatura se debe, principalmente, al aumento de material para hidratar en la disolución.

#### A.2.4. Conclusiones

Las conclusiones pueden orientarse a la propia experiencia o bien a los resultados de laboratorio del hormigón utilizado.

- Con respecto a la *propia experiencia* cabe señalar que se han introducido numerosas incertidumbres en su ejecución, para poder ser concluyente al respecto, recomendándose ampliar el ámbito de experiencias. Con respecto a los *resultados de los ensayos* pueden extraerse las siguientes conclusiones:
- En primer lugar, se observa que los valores de resistencia para este hormigón son superiores a los esperados para uno convencional. Por otra parte, se ha observado que a los 28 días aún no han alcanzado la resistencia determinada en el proyecto teniendo en cuenta que el hormigón contenía fibras. Esto puede deberse a los problemas en la dosificación y homogeneidad del material y al aumento de agua de amasado en los camiones.
- En segundo lugar, no ha podido determinarse con veracidad la existencia o no de cal remanente en el hormigón. Esto se ha podido ver mediante los ensayos de ultrasonidos y de resistencia de las probetas cúbicas ensayadas, las cuales no han mostrado variaciones pre/post ensayo. Por lo tanto cabe la posibilidad que no exista cal remanente y que por ello no se hayan dado procesos de expansión durante el curado acelerado. No obstante, podría haberse dado esta expansión dentro de los poros del hormigón y no haberse producido microfisuras. Así pues, es necesario mejorar este procedimiento para poder dar por válidos los resultados obtenidos.
- La medición de la temperatura en distintas zonas de la losa puede verse que las condiciones de contorno influyen, a pequeña escala, en la temperatura máxima alcanzada, tal como se ha mostrado en la figura A2.14.
- Finalmente, por lo que se refiere a los ensayos realizados en el laboratorio con pastas, cabe destacar el comportamiento que se obtiene para la hidratación de óxido de cal y cemento. Se ha visto que la adición de cemento hace aumentar la temperatura y el tiempo en que se alcanza el valor máximo de esta. Otro dato importante es la diferencia en las pendientes de las rectas de regresión de cada uno de los modelos. Puede verse en ambas ecuaciones que el aumento de la temperatura es mayor que el del tiempo.

#### A.2.5. Enseñanzas adquiridas de esta experiencia

Para finalizar con este informe, a continuación, se enumerarán los datos a tener en cuenta para mejorar las propiedades de una losa de HRC.

- Importancia de la dosificación del hormigón. Es necesario hacer un control del agua de amasado para no modificar las propiedades del hormigón, así como evitar la segregación y el arrastre de las fibras.
- No se ha podido determinar la presencia de cal libre mediante el proceso de curado acelerado que se llevó a cabo. Es necesario investigar más en este aspecto o aplicar otros métodos de ensayo.

- Influencia de cemento y cal en cuanto a temperatura de hidratación. Se ha visto que el cemento aumenta el tiempo en que se da la hidratación total y aumenta en algún grado la temperatura final de la mezcla. Por otro lado, es la reacción de la cal la que genera en mayor medida la mayor parte de temperatura.



## A2.3. LOSAS DEL APARCAMIENTO EN EL RECINTO DE CALES DE PACHS

### A.2.1. Introducción

Los objetivos de este documento son el seguimiento de la experiencia de ejecución de las losas con HRC del aparcamiento de la empresa Cales de Pachs S.A y las observaciones realizadas en visitas posteriores. Para el primer objetivo se expondrá el proceso de hormigonado, así como los ensayos de laboratorio que se llevaron a cabo. Igualmente se definirán las características de los materiales y su proceso de fabricación. Para el segundo objetivo se mostrarán las imágenes obtenidas y se describirá el estado de ambos elementos.

### A.2.2. Objetivo 1: ejecución de las losas

Las losas se ejecutaron el día 31 de octubre de 2013 a las 9 de la mañana aproximadamente. Esta se localiza dentro del recinto de la empresa Cales de Pachs S.A. que se encuentra situada a 4km al Noroeste de Vilafranca del Penedès. Dentro del recinto de la empresa, ambas losas están situadas en la zona de aparcamiento y giro de los camiones que usan la báscula. En la figura A2.35 se muestra la localización de la losa. La losa de 32m<sup>2</sup> se encuentra en contacto con dos losas de hormigón que corresponden a un aparcamiento y al pasillo que bordea la edificación, otro de sus lados está en contacto con el carril de la báscula y, finalmente, el último lateral se encuentra en contacto con la losa de 380m<sup>2</sup>. La losa de 380m<sup>2</sup> en sus lados largos está en contacto con el carril de la báscula y con el muro de contención de tierras, y en sus lados cortos, con el mismo muro, por un lado, y por el otro con la losa del aparcamiento y la losa de 32m<sup>2</sup>.



Figura A2. 35 – Localización de las losas

Datos medidos 2013	Octubre	Noviembre
Temperatura media mensual	17,6 °C	10,6 °C
Amplitud térmica media mensual	11,7 °C	10,6 °C
Precipitación mensual	13,3 mm	129,2 mm
Humedad relativa media mensual	71 %	61 %
Irradiación solar global diaria mensual	13 MJ/m <sup>2</sup>	9,2 MJ/m <sup>2</sup>

Tabla A2. 14 – Datos meteorológicos de la zona (Servei Meteorològic de Catalunya, 2013)

Los datos meteorológicos del mes de octubre en esta zona se han tomado de la estación meteorológica situada en Sant Martí Sarroca que se encuentra a unos 7km al Noroeste de la zona de hormigonado. Los datos registrados de este período se especifican en la tabla A2.14.

c) Confección del hormigón

El hormigón fue suministrado por la empresa Beton Catalan S.A. situado en el polígono industrial de Sant Pere Molanta a una distancia de aproximadamente 7 km (10 min) del punto de hormigonado. Dicha central es una planta dosificadora de hormigón, lo que significa que los materiales se mezclan en las cubas de los camiones directamente. En la tabla A2.15 se muestran las dosificaciones de cada uno de los hormigones usados en las losas.

<b>Características del hormigón</b>	<b>Ud.</b>	<b>Datos (a) Losa 32 m<sup>2</sup></b>	<b>Datos (b) Losa 380 m<sup>2</sup></b>
Tipificación del hormigón	-	HM-50/15/B	HM-35/12/B
Cemento	kg/m <sup>3</sup>	450	350
Óxido de calcio (CaO) - Link EVR	kg/m <sup>3</sup> (%spc)	30,2 (6,7)	24,9 (7,1)
Relación a/c	-	0,33	0,43
Tipo de curado	-	Con aspersores durante 4 días	
Fibras	gr/m <sup>3</sup>	900 (microfibras de polipropileno)	
Dimensiones	m <sup>2</sup>	32	380

*Tabla A2. 15 – Características del hormigón*

d) Puesta en obra y acabado superficial

La ubicación de la losa dentro del recinto, así como las condiciones de contorno existentes determinaron el sistema de vertido más adecuado. En este caso fue un vertido directo mediante el canalón orientable.

e) Ensayos realizados

En relación con el comportamiento del HRC que se menciona en el apartado anterior, es necesario también llevar a cabo ensayos de laboratorio para poder dar explicación al comportamiento de la losa. En este apartado se describirán los ensayos que se llevaron a cabo, así como los resultados obtenidos para cada uno de ellos.

Para caracterizar el hormigón de ambas losas se procedió a realizar los ensayos que se especifican en la tabla A2.16. Estos permitieron obtener datos de resistencia y de expansión, usando para este último caso dos condiciones de curado distintas. En la primera se procedió a dejar la probeta sin cubrir, permitiendo la libre evaporación del agua, mientras que la segunda se cubrió con un plástico para evitar dicho proceso. Seguidamente se describen los resultados de los ensayos.

Tipo / cantidad	Ensayo	Especificaciones de los ensayos
<b>(a) Losa de 32 m<sup>2</sup></b>		
10 cilíndricas	Ensayos a compresión	Rc (6h, 4d, 7d, 28d) 3 reserva
1 prismática (15 x 15 x 60 cm)	Térmico	Temperatura, Expansión (LVDT)
	Expansión / retracción	Condiciones de curado: tapada con plástico
1 prismática (15 x 15 x 60 cm)	Térmico	Temperatura, Expansión (LVDT)
	Expansión / retracción	Condiciones de curado: sin tapar
<b>(b) Losa de 380 m<sup>2</sup></b>		
4 cilíndricas	Ensayos a compresión	Rc (7d, 28d) 1 reserva
1 prismática (15 x 15 x 60 cm)	Térmico	Temperatura, Expansión (LVDT)
	Expansión / retracción	Condiciones de curado: sin tapar
1 prismática (15 x 15 x 60 cm)	Térmico	Temperatura, Expansión (LVDT)
	Expansión / retracción	Condiciones de curado: tapada con plástico

Tabla A2. 16 – Descripción de los ensayos realizados

- **Ensayos a compresión (Rc)**

Las probetas necesarias para la realización de los ensayos a compresión se moldearon según se describe en la norma UNE-EN 12390-2 (AENOR, 2009a) y se cubrió la parte superior con un plástico (figura A2.36). Las probetas se dejaron 24h en obra y se transportaron al día siguiente al laboratorio para proceder con su almacenamiento.



Figura A2. 36 –Probetas cilíndricas de 150x300mm

Las probetas se clasificaron y se conservaron en el laboratorio hasta la fecha del ensayo correspondiente. En la figura A2.37 se muestran los resultados obtenidos para los dos hormigones y el valor teórico calculado según el Artículo 31 de la EHE-08 (Ministerio de Fomento, 2008). El ensayo se llevó a cabo según se describe en la norma UNE-EN 12390-3 (AENOR, 2009b), usándose el refrentado con azufre como método de preparación de las superficies de las probetas.

Mediante la resistencia característica del hormigón a 28 días se determinó el valor para el resto de edades aplicando la formulación del Artículo de la EHE anteriormente mencionado. En ambos casos se observa que a los 7 días ambos hormigones ya han alcanzado el 70% de la resistencia correspondiente a 28 días, lo que es un valor normal comparado con hormigones convencionales.

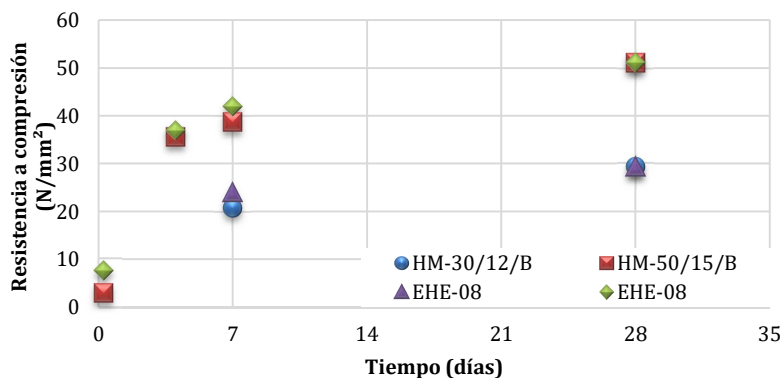


Figura A2. 37 – Valores de resistencia a compresión de ambas losas

En la citada figura A2.37 se observa en primer lugar el aumento de resistencia de ambos hormigones hasta llegar a la resistencia característica de diseño a los 28 días. Por otra parte, al comparar los resultados con los obtenidos mediante el modelo de cálculo de la EHE-08 se observan algunas diferencias. Hay que mencionar que únicamente se rompió una probeta por ensayo, por lo que, el hecho que se encuentren estas pequeñas diferencias entre los valores obtenidos no es relevante. Finalmente, en base a los resultados obtenidos se puede determinar que, en esta experiencia, el comportamiento a compresión del HRC es igual que el de un hormigón convencional.

- **Ensayos de expansión**

El otro ensayo que se llevó a cabo fue el de deformación del hormigón desde las 7 horas hasta los dos días de edad. La figura A2.37 muestra los componentes que intervienen en este ensayo. El molde es metálico de dimensiones 150x150x600mm y en sus extremos dispone de dos placas donde se fijan cuatro varillas roscadas que quedarán embebidas en la probeta. Uno de estos extremos es de un material plástico que a su vez facilita el desplazamiento a través del molde, lo que permite medir la deformación mediante un LVDT que se encuentra en contacto directo.

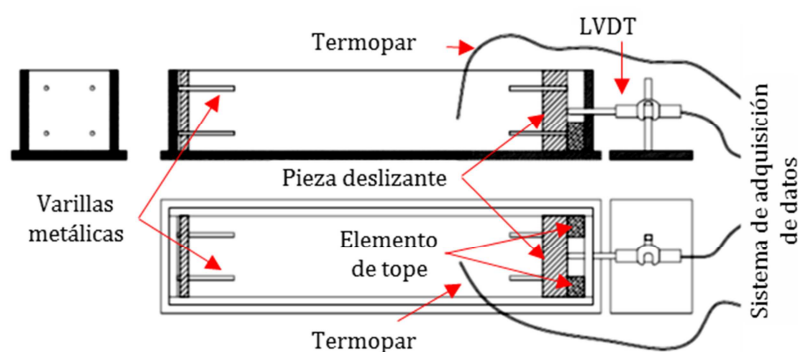


Figura A2. 38 – Diseño del molde del ensayo de expansión

En primer lugar se recubre el molde metálico con un plástico antiadherente (teflón) para evitar que exista algún tipo de fricción entre el hormigón y el metal que afecte a los resultados (figura A2.39). El proceso de este ensayo es relativamente simple de ejecutar y se describe de la siguiente manera. Se vierte el hormigón en dos capas compactándolas con 3 golpes del molde contra el suelo cada una de ellas y, una vez lleno, se enrasa la superficie. Se coloca el molde en un lugar dónde no existan vibraciones o golpes que puedan alterar los datos y se adapta el LVDT a la pieza corredera de plástico. Finalmente se introduce el termopar en el hormigón para medir los

datos de temperatura. A las 7 horas del inicio del moldeo se extraen los elementos de tope (figura A2.39a) y se empieza a caracterizar la expansión del hormigón. Durante las primeras 7 horas se mide la deformación del hormigón que se caracteriza por la medición de retracciones.

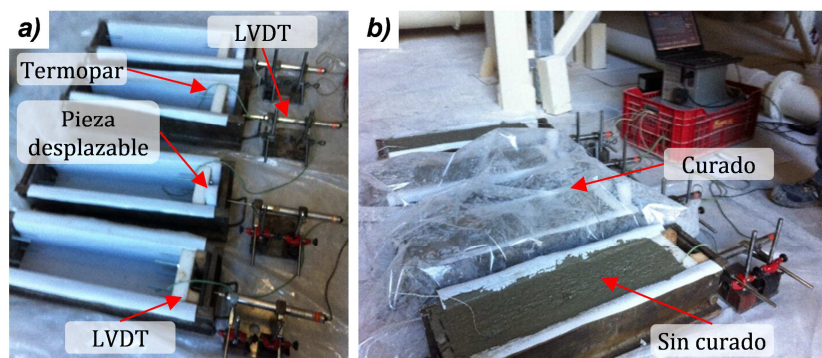


Figura A2.39 - a) elementos intervinientes en el ensayo; b) sistema de curado de las probetas

Los resultados obtenidos para esta experiencia se muestran en la figura A2.40. Estos resultados corresponden a las probetas realizadas con el hormigón HM-50/15/B (losa 32 m<sup>2</sup>). En el gráfico se observa claramente la diferencia entre el hormigón curado y el que no lo está. Se observa que, mientras que el hormigón curado su expansión alcanza valores de 0,6 mm/m, el que no está curado permanece en la zona de retracción.

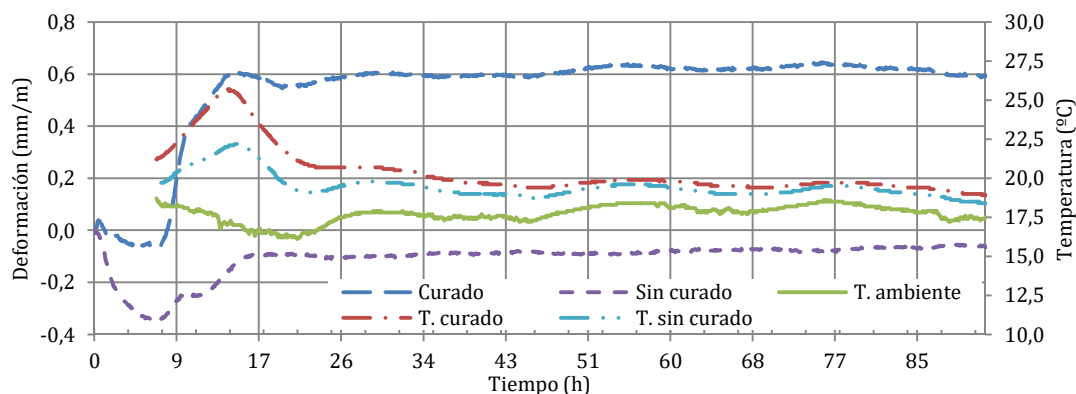


Figura A2.40 - Resultado ensayo de deformación

De la citada figura A2.40 hay que destacar el comportamiento de las curvas de temperatura y expansión de cada una de las probetas. En ambos casos la expansión se da durante el período en que aumenta la temperatura de hidratación y una vez esta ha alcanzado su máximo, la expansión se estabiliza. Este comportamiento es idéntico en ambas probetas independientemente del tipo de curado realizado.

En los subpartados anteriores se han descrito los ensayos realizados, así como los resultados obtenidos para cada uno de ellos. En ambos hormigones se realizaron ensayos de resistencia y de expansión. Los gráficos de los resultados de resistencia y expansión/temperatura se han mostrado en la figura A2.37 y en la figura A2.40, respectivamente.

### A.2.3. Objetivo 2: visitas posteriores

#### a) Estado de las losas

En visitas posteriores realizadas los días 28 de Noviembre de 2013 y el 24 de Abril y 27 de Mayo de 2014 se observaron fisuras en toda la superficie de las losas. La edad de la losa en dichas visitas es la que se muestra en la tabla A2.17.

Visita	Edad de la losa	Motivo visita
28.11.2013	28 días	Hormigonado de losa contigua
24.04.2014	144 días (5 meses)	Visita de control
27.05.2014	177 días (6 meses)	Levantamiento de lesiones

Tabla A2. 17 – Edades de la losa en las visitas realizadas

En la primera visita ya se evidenciaron una serie de fisuras que fueron incrementando su tamaño y cantidad a medida que pasaba el tiempo. La primera visita, que correspondía con la fecha de hormigonado del carril de la báscula evidenció la aparición de pequeñas fisuras en toda la superficie de las losas y que atravesaban el canto de esta. Estas fisuras son las que se observan en la figura A2.41, que corresponden al canto de la losa (a) y a su extensión por la superficie (b).

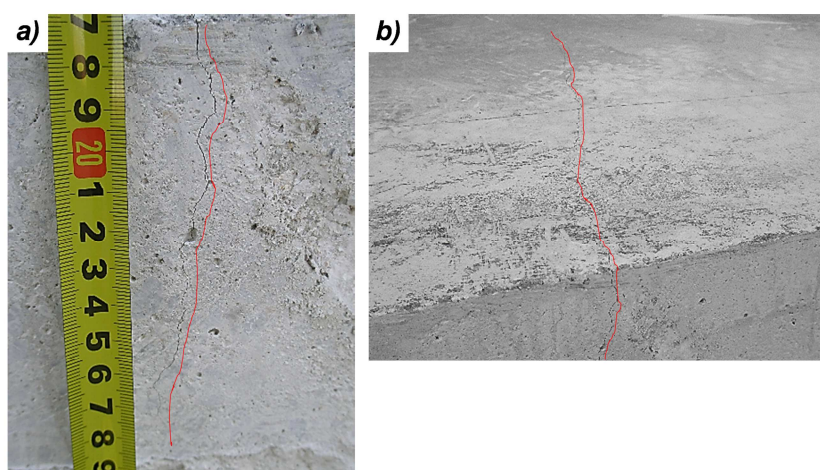


Figura A2. 41 – 28.11.2013 - Lesiones aparecidas en la losa 380m<sup>2</sup>

En la superficie pudo verse el patrón de fisuras que se muestra en la figura A2.42. En ambas puede verse como las fisuras se entrecruzan. Hay que tener en cuenta que la losa está asentada sobre un terreno de arcillas expansivas, lo que explicaría este fenómeno de fisuración.

En la visita realizada el día 24 de abril de 2014 se observó la evolución de abertura de algunas fisuras, tal como demuestra la figura A2.43a. También se observó el fenómeno que se muestra en la figura A2.43b que corresponde a un nido de fibras en la superficie del hormigón. Este nido no se había descubierto hasta la fecha, ya que estaba cubierto por una fina capa de hormigón, que al presionarla se deformaba. Finalmente, se pudo ver una gran cantidad de fibras en su interior que es la que se recoge en la imagen. En esta visita se observó también unas fisuras en piel de cocodrilo en la zona de la losa de 380 m<sup>2</sup> que se encuentra en contacto con la losa del aparcamiento y el muro perimetral.

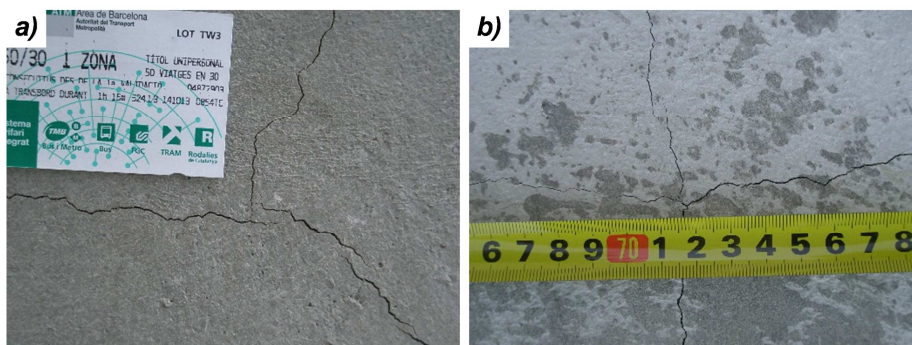


Figura A2. 42 – 28.11.2013 - Lesiones en la losa de 32m<sup>2</sup>

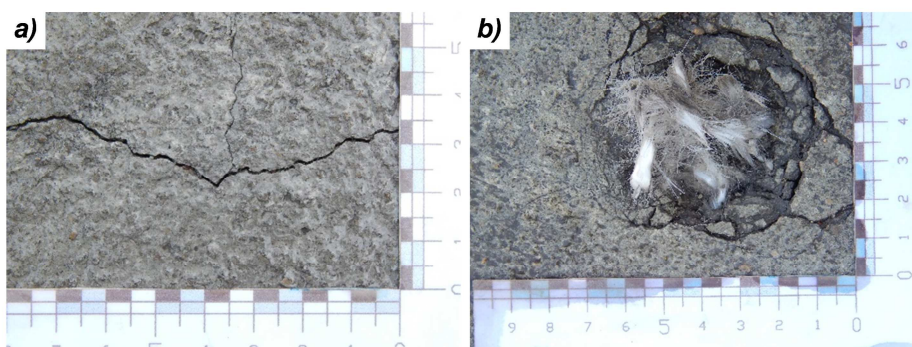


Figura A2. 43 – 24.04.2014 - a) fisura en superficie; b) nido de fibras en superficie

La última visita realizada hasta la fecha corresponde a la que se realizó el levantamiento de lesiones de las fisuras. En el siguiente apartado se muestra el mapa de fisuración de estas dos losas y las existentes también en el carril de la báscula hormigonado el 28 de Noviembre.

En la figura A2.44 se muestra la extracción del testigo en un cruce de fisuras que determinó que estas atravesaban todo el espesor de la losa. Tal como se observa en la figura A2.44b el espesor de la fisura aumenta a medida que esta se acerca a la superficie, lo que puede determinar responder a un fenómeno global externo. Esta deducción es acorde al hecho de tener arcillas expansivas en la base, lo que generaría este empuje en el momento en que una fuente de agua llegara a ellas. En conclusión, no puede decirse que estas fisuras sean puramente de retracción al existir este fenómeno asociado a las condiciones de contorno.

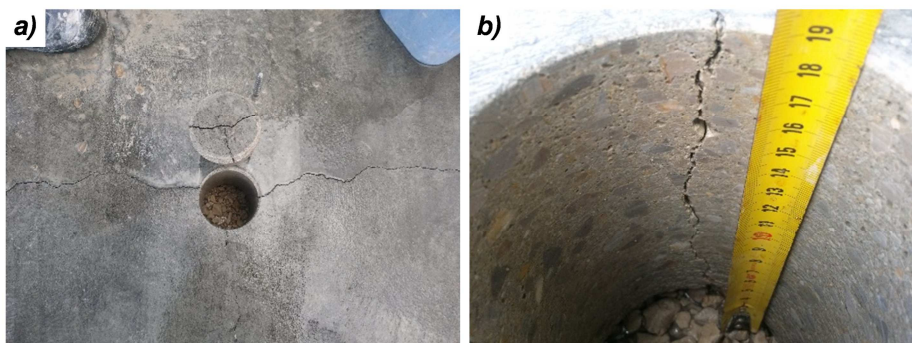


Figura A2. 44 – 27.05.2014 - Extracción de testigo en losa de 380 m<sup>2</sup>

b) Plano de levantamiento de lesiones en las losas (27.05.2014 - adjunto)

Las lesiones que han aparecido en ambas losas, así como en el carril hormigonado posteriormente, se grafican a continuación en el plano. En dicho plano se ha especificado el punto de extracción del testigo de la figura A2.45.

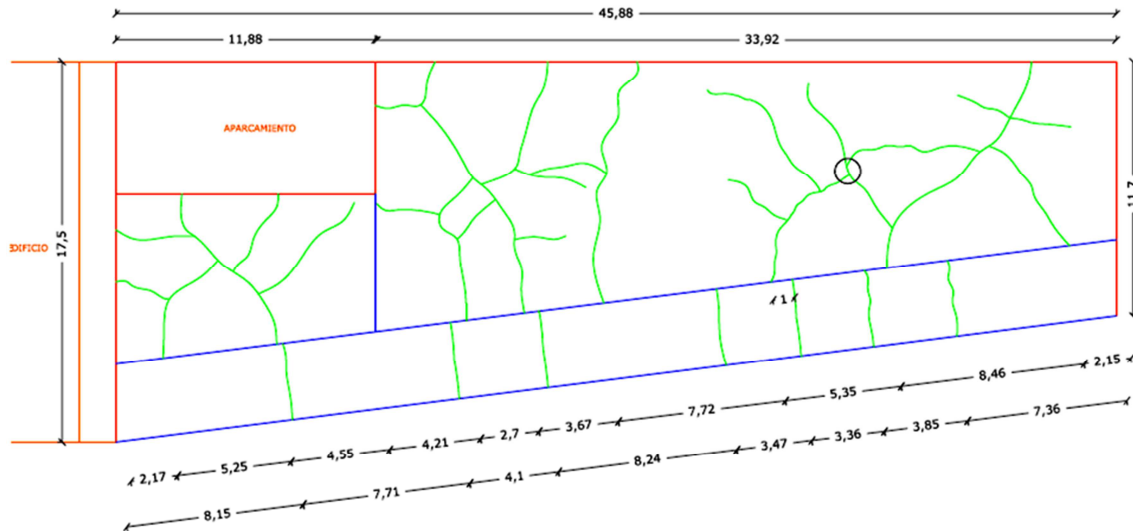


Figura A2. 45 –Levantamiento plano de fisuras en losa de 380 m<sup>2</sup> (Fecha:27.05.2014)

En el plano adjunto se observa que las fisuras aparecidas en la losa del aparcamiento no siguen un patrón determinado de fisuración, sino que se presenta como una configuración irregular. Hay que tener en cuenta que la base de esta losa está formada por arcillas expansivas que habrían podido ser la causa de estas, tal como se ha mencionado para la figura A2.45.

#### A.2.4. Conclusiones

Mediante los análisis que ya se han hecho en los apartados anteriores puede llegarse a las siguientes conclusiones.

En cuanto a los ensayos de resistencia no se han obtenido resultados distintos a los esperados para un hormigón convencional. En ambos casos la curva de aumento de resistencia es muy similar y prácticamente igual a la teórica calculada mediante el modelo de la EHE-08. En este caso no se ha observado el aumento de resistencia que si se dio para el hormigón de la experiencia anterior (R.O.3).

Los ensayos de expansión han demostrado la importancia del curado para este tipo de hormigones. Se ha observado como este fenómeno consigue mejores resultados para el caso en que la probeta ha sido curada, dándose solo el fenómeno de expansión en este caso. Otro dato a remarcar es la relación entre la expansión y la temperatura. En ambos casos la expansión se da durante el período de aumento de temperatura y se estabiliza en el momento en que esta alcanza el máximo.

El aumento de temperatura hasta el pico máximo del cemento está relacionado con la rápida hidratación del C<sub>3</sub>S y el inicio de la reacción del C<sub>2</sub>S, lo que conlleva a la generación de gel C-S-H. Este último es el que aporta la resistencia a la pasta. En esta etapa sigue la precipitación del



hidróxido de cal o Portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) (Hewlett et al., 1988). La formación de estos compuestos es la que se representa en la figura A2.46, en la que se observa la intensidad de formación del C-S-H a partir de las 6-8 horas.

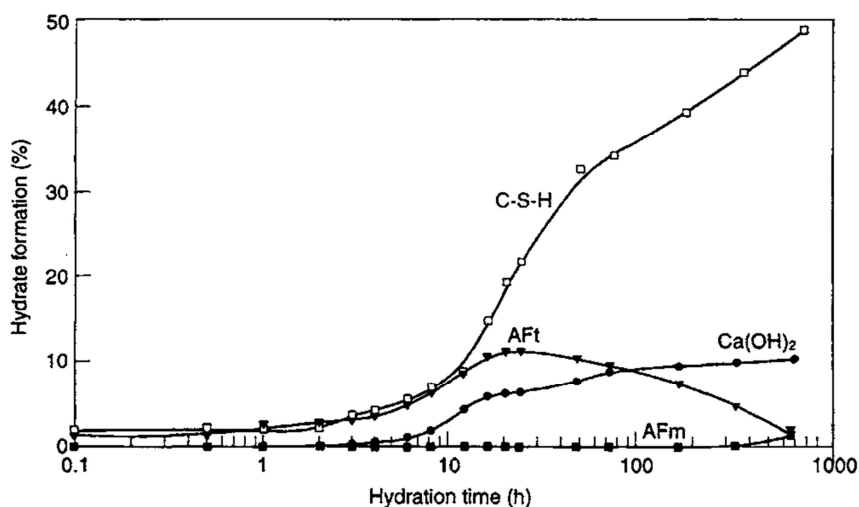


Figura A2. 46 – Cinética de hidratación del cemento Portland. Formación de las fases hidratadas (Hewlett et al., 1988)

En conclusión, el endurecimiento del hormigón está relacionado directamente con la formación del gel C-S-H, con pequeñas variaciones para cada tipo de cemento. Por consiguiente, la hidratación del óxido de cal en este período generará cristales que introducirán tensiones entre las distintas capas de este gel. Como el hormigón aún está en una fase no endurecida, es capaz de absorber estas tensiones, pero al mismo tiempo, deberá deformarse para dar cabida a los cristales de hidróxido que se están formando. En el caso que no exista agua suficiente para hidratar el CaO (Link EVR), estos cristales serán menores y, por consiguiente, no se generará la deformación deseada.

Finalmente, para el caso de las fisuras aparecidas en las losas del aparcamiento hay que contemplar el posible efecto de las arcillas expansivas de la base, ya que tal como se ha visto de la extracción del testigo las fisuras se abrían hacia la superficie de la losa. En este caso las lesiones no se derivan de la retracción del hormigón. Otro dato a remarcar es la aparición de pelotas de fibras que debilitan el elemento, lo que debería plantearse el sistema de mezclado de estas o el momento en que se añaden al hormigón.



## A2.4. LOSA DE LA ENTRADA EN EL RECINTO DE LA FARINERA VILAFRANQUINA

### A.2.1. Introducción

Los objetivos de este documento son: la experiencia de ejecución de una losa con HRC y el estado de esta al cabo de aproximadamente 6 meses desde su ejecución.

Para el primer objetivo (losa) se expondrá el proceso de hormigonado, así como los ensayos de laboratorio que se llevaron a cabo. Igualmente se definirán las características de los materiales y su proceso de fabricación. Durante la experiencia intervinieron las siguientes personas.

### A.2.2. Objetivo 1: ejecución de la losa

La losa se ejecutó el día 14 de noviembre de 2013 a las 9 de la mañana aproximadamente. Esta se localiza dentro del recinto de la empresa Farinera Vilafranquina que se encuentra situada a 5km al Suroeste de Vilafranca del Penedès. Dentro del recinto de la empresa, esta se sitúa en la entrada de acceso entre la báscula y la caseta de control. En la figura A2.47 se muestra la localización de la losa.

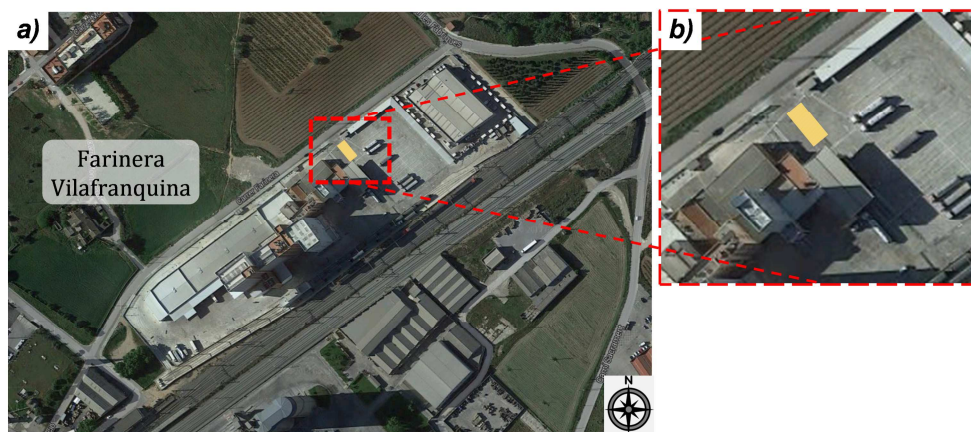


Figura A2. 47 -Localización de la losa

Los datos meteorológicos del mes de noviembre y diciembre en esta zona se han tomado de la estación meteorológica situada en La Granada que se encuentra a unos 8 km al Noreste de la zona de hormigonado. Los datos registrados de este período se especifican en la tabla A2.18.

Datos medidos 2013	Noviembre	Diciembre
Temperatura media mensual	10,8 °C	7,2 °C
Amplitud térmica media mensual	10,4 °C	10,3 °C
Precipitación mensual	163,2 mm	16,3 mm
Humedad relativa media mensual	66 %	76 %
Irradiación solar global diaria mensual	9,3 MJ/m <sup>2</sup>	7,5 MJ/m <sup>2</sup>

Tabla A2. 18 - Datos meteorológicos de la zona (Servei Meteorològic de Catalunya, 2013)

### c) Confección del hormigón

El hormigón fue suministrado por la empresa Betón Catalán S.A. situado en el polígono industrial de Sant Pere Molanta a una distancia de aproximadamente 10 km (13 min) del punto de hormigonado. Dicha central es una planta dosificadora de hormigón, lo que significa que los materiales se mezclan en las cubas de los camiones directamente. En la tabla A2.19 se muestran los datos del hormigón facilitados por la empresa.

Características del hormigón	Ud.	Datos
Tipificación del hormigón	-	HM-30/20/F
Cemento	kg/m <sup>3</sup>	350
Óxido de calcio (CaO) - Link EVR	kg/m <sup>3</sup> (%spc)	24,85 (7,1)
Aditivo Viscocrete	kg/m <sup>3</sup>	1,1
Aditivo Sika 500HE	kg/m <sup>3</sup>	2,7
Relación a/c	-	0,43
Tipo de curado	-	1r día: con agua 2º día: con líquido de curado
Armado	gr/m <sup>3</sup>	600 (microfibras de polipropileno)
	-	Ø8 a 15cm desde la base (malla electrosoldada)
Dimensiones	m (m <sup>2</sup> )	25 x 5 (125)

Tabla A2. 19 – Características del hormigón

### d) Puesta en obra y acabado superficial

La ubicación de la losa dentro del recinto, así como las condiciones de contorno existentes determinaron el sistema de vertido más adecuado. En este caso fue un vertido directo mediante el canalón orientable tal como se puede ver en la figura A2.48. La losa a hormigonar tenía unas dimensiones de 25 x 5m.

Se realizó una nueva base con material compactado dejando un canto para la nueva losa de 25 cm. Se colocó un mallazo de Ø8 a 15 cm desde la base, tal y como puede verse en la figura A2.48. Se vio que el mallazo del antiguo pavimento (3 años) tenía el mallazo en la base de la losa y se observaron también corrosiones puntuales.

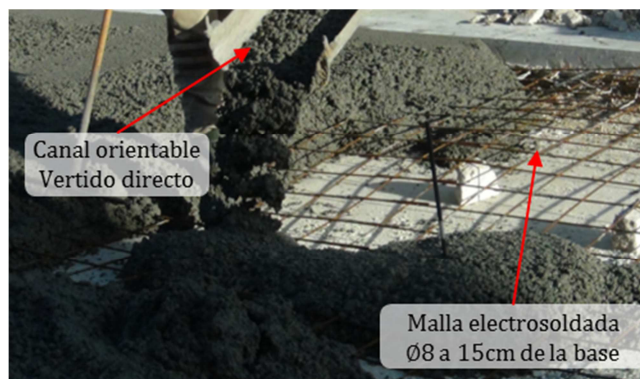


Figura A2. 48 – Hormigonado de la losa

A las 08:15h salió el primer camión de la planta de Betón de Vilafranca con una temperatura ambiente de 16 °C. A las 4 horas de la primera entrega, sobre las 12:30 h, se realizó un primer fratasado para abrir el poro del hormigón. A continuación se espolvoreó 1,2 Kg/m<sup>2</sup> de endurecedor de la zona de rodadura (Paviland Industrial de la casa Puma con cuarzo) y se realizó un fratasado fino que terminó sobre las 17:30 h (figura A2.49) . A las 18:30h se realizó un riego con agua de la losa y sobre las 22 h se volvió a regar. Al día siguiente se barrió el polvo de toda la losa y se aplicó el líquido de curado (09:30 h). En la figura A2.50 se muestra la superficie del hormigón en estado fresco y endurecido después del tratamiento superficial.



Figura A2. 49 – Primer fratasado

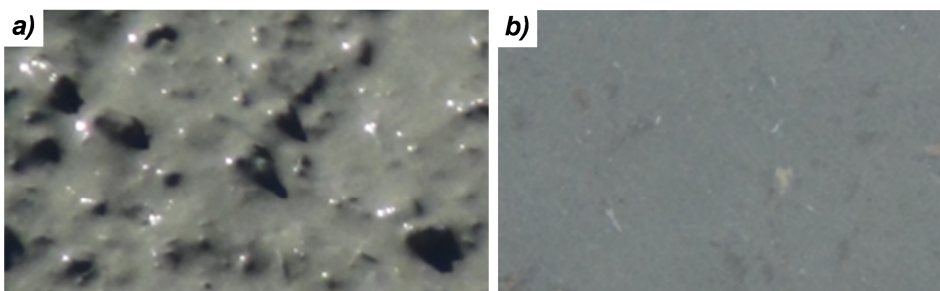


Figura A2. 50 – a) aspecto superficial después del primer fratasado; b) aspecto superficial final

#### e) Ensayos realizados

Para esta experiencia únicamente se llevaron a cabo ensayos de resistencia que realizó la propia empresa que distribuyó el hormigón, en este caso, Betón Catalán S.A. Los ensayos se realizaron a los 4, 7 y 28 días, obteniéndose los resultados que se presentan en la figura A2.51. Además de los datos de resistencia, se ha graficado también los resultados de resistencia calculados mediante el modelo de la EHE-08.

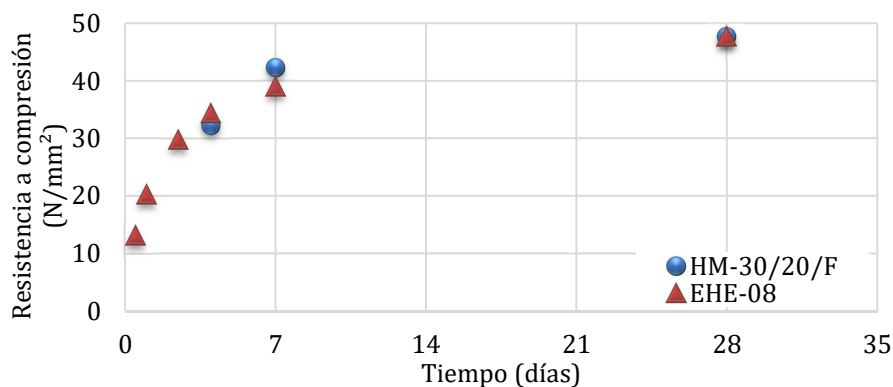


Figura A2. 51 – Valores de resistencia a compresión

Se ve que a los 4 días ya ha superado los 30 MPa de resistencia y a los 7 supera el 80 % de la resistencia final. Como dato importante hay que remarcar que a los 28 días aún no ha alcanzado la resistencia máxima. Al comparar los resultados con los del modelo de la EHE-08 se observa que ambos resultados se encuentran muy próximos y que ambos hormigones siguen la misma tendencia de aumento de la resistencia.

### A.2.3. Objetivo 2: visita posterior

#### a) Estado de la losa

En visitas posteriores realizadas los días 24 de abril y 30 de julio de 2014 se observó la aparición de fisuras y otras patologías. La edad de la losa en dichas visitas es la que se muestra en la tabla A2.20.

Visita	Edad de la losa	Motivo visita
24.04.2014	161 días ( $\approx$ 5,5 meses)	Visita de control
30.07.2014	256 días ( $\approx$ 8,6 meses)	Visita de control

Tabla A2. 20 – Edades de la losa en las visitas realizadas

#### b) 161 días (5,5 meses)

En la visita posterior realizada el día 24 de abril de 2014, aproximadamente unos 5 meses y medio después de la ejecución de esta se evidenciaron una serie de fisuras. En la figura A2.52 se observa que dicha losa soporta gran tráfico por las marcas de los neumáticos existentes. Además, dicha losa es una zona de paso obligatorio para todos los vehículos que acceden al recinto ya que se encuentra a la entrada de este y muy próxima a la salida de la báscula.

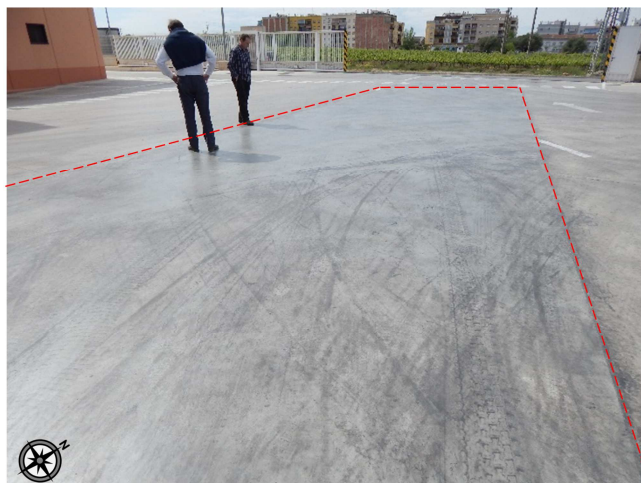


Figura A2. 52 – Losa a los 161 días de edad

En la figura A2.53 se muestran dos imágenes en las que en su parte inferior puede observarse la junta de retracción de la losa de hormigón adyacente. En ambos casos existe una fisura que empieza en una zona cercana a esta y que atraviesa la losa en todo su ancho. No puede atribuirse esta fisura a esfuerzos mecánicos de las losas contiguas debido a la discontinuidad entre el punto de inicio de la fisura y la junta ya existente. En ambas imágenes se muestra con flechas las juntas de retracción de las losas adyacentes. En base a esto y a que las fisuras son equidistantes podrían atribuirse a un fenómeno de retracción.

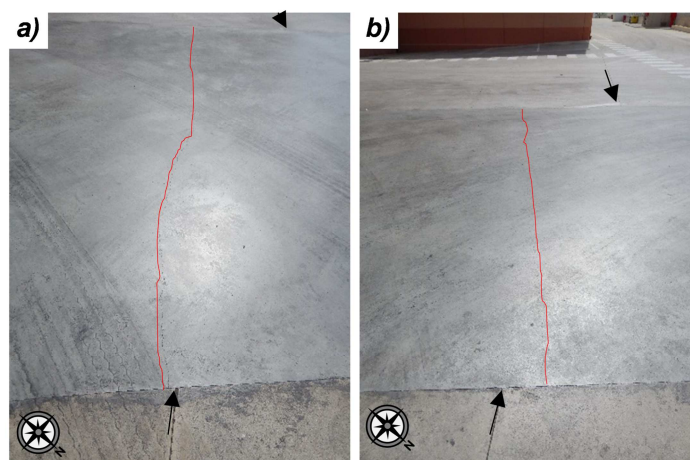


Figura A2. 53 – Fisuración observada y localización de las juntas adyacentes

c) 258 días (8,6 meses)

El día 30 de julio de 2014 se realizó una segunda visita para constatar la evolución del estado del pavimento así como de las fisuras que se observaron en la primera visita. En la figura A2.54 se muestra la lesión más característica que se observó para dicha visita. Esta se basa en el levantamiento de la losa en ciertas zonas, principalmente en esquinas y algún lateral.

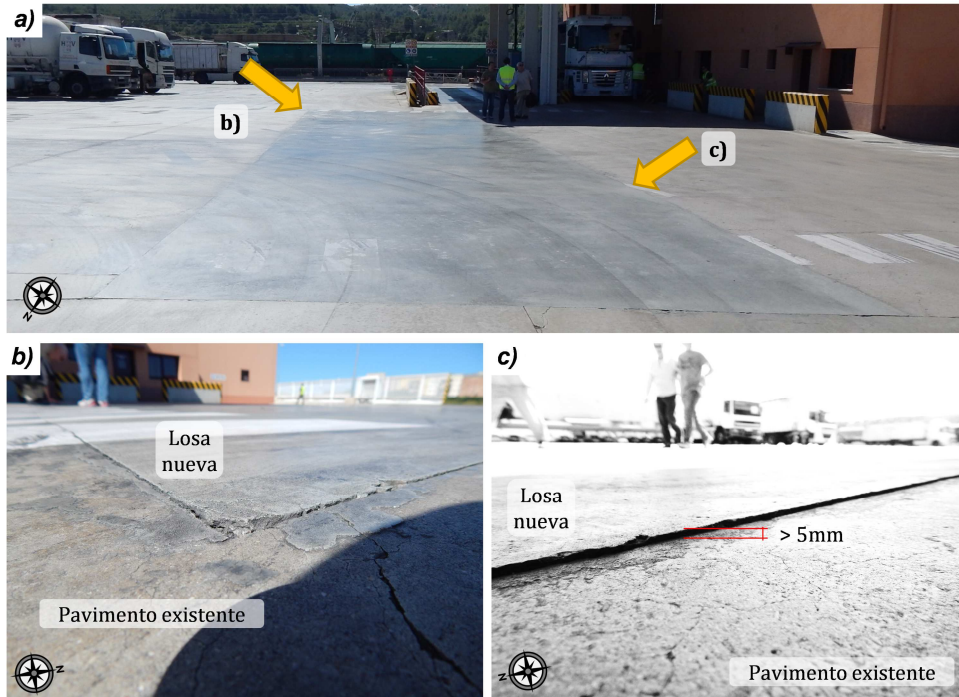


Figura A2. 54 – Estado de la losa; a) vista general; b) levantamiento del extremo sur; levantamiento del lateral oeste

El levantamiento de los cantos de la losa es el que se muestra en la figura A2.54b y en la figura A2.54c. En ellas se muestra el levantamiento de una de las esquinas de la losa y el cambio de nivel en uno de los laterales respectivamente. En ambos casos pudo verse que esta diferencia de nivel era superior a 5mm con respecto al pavimento existente y que no se daba para todas las juntas.

Otra lesión observada es la aparición de fisuras a continuación de las ya existentes en las losas colindantes y que no se observaron en la primera visita. Por lo que a las dos fisuras perpendiculares al lado largo de la losa se le suman ahora otras de carácter mecánico. La continuidad entre las fisuras en ambos pavimentos es la que se muestra en la figura A2.55.



Figura A2. 55 – Fisura continua entre pavimento nuevo y existente



#### **A.2.4. Conclusiones**

A partir del estudio de esta losa puede llegarse a las siguientes conclusiones:

Se ha podido observar que las fisuras derivadas del efecto de la retracción han terminado por aparecer, aunque más tarde de lo que se dan para un hormigón convencional. En este caso podría ser que la cantidad de cal no fuera suficiente para contrarrestar el fenómeno o que fuera el curado el que no se realizó de una manera óptima. En el caso del curado se ha observado que únicamente se realizó durante 2 días lo que podría considerarse insuficiente para obtener el máximo rendimiento del material.

En el caso del armado podría darse que las microfibras de polipropileno no sean adecuadas para contrarrestar la retracción para este tipo de material. Por otra parte, ni las fibras ni el armado convencional han evitado la aparición de fisuras mecánicas en el pavimento.

Finalmente, el efecto de levantamiento (o alabeo) de algunos de los lados o esquinas de la losa puede deberse a diferencias en el gradiente térmico diario. La situación de la losa que se encuentra anexa al edificio y a la báscula le da sombra en la zona afectada por el alabeo, mientras que el resto no ha variado su nivel. Es necesario determinar el efecto de los cambios de temperatura diarios a largo plazo en losas con distintas exposiciones sol/sombras diarias.



## A2.5. LOSA DEL CARRIL DE LA BÁSCULA DEL RECINTO DE CALES DE PACHS

### A.2.1. Introducción

Los objetivos de este documento son la experiencia de ejecución de las losas con hormigón de retracción compensada (HRC) del aparcamiento de la empresa Cales de Pachs S.A y las observaciones realizadas en visitas posteriores. Para el primer objetivo se expondrá el proceso de hormigonado, así como los ensayos de laboratorio que se llevaron a cabo. Igualmente se definirán las características de los materiales y su proceso de fabricación. Para el segundo objetivo se mostrarán las imágenes obtenidas y se describirá el estado de ambos elementos. Durante la ejecución de la losa intervinieron las siguientes personas.

### A.2.2. Objetivo 1: ejecución de la losa

La losa se ejecutó el día 20 de noviembre de 2013 por la mañana. Esta losa se localiza dentro del recinto de la empresa Cales de Pachs S.A. que se encuentra situada a 4 km al Noroeste de Vilafranca del Penedès. En la figura A2.56 se muestra la localización de la losa.



Figura A2. 56 – Localización de la losa

En la figura A2.56a se muestra una vista aérea del recinto de la empresa y se enmarca la zona donde se localiza la losa. En la figura A2.56b se marca la localización exacta de esta, la carretera y las losas del aparcamiento (RO.4/5). Como información adicional, se muestra en la tabla A2.21 los datos ambientales del período de hormigonado y del mes siguiente. Los datos meteorológicos se han tomado de la estación meteorológica situada en Sant Martí Sarroca que se encuentra a unos 7 km al Noroeste de la zona de hormigonado.

Datos medidos 2013	Noviembre	Diciembre
Temperatura media mensual	10,6 °C	6,7 °C
Amplitud térmica media mensual	10,6 °C	11,8 °C
Precipitación mensual	129,2 mm	14,1 mm
Humedad relativa media mensual	61 %	71 %
Irradiación solar global diaria mensual	9,2 MJ/m <sup>2</sup>	7,3 MJ/m <sup>2</sup>

Tabla A2. 21 – Datos meteorológicos de la zona (Servei Meteorològic de Catalunya, 2013)

d) Confección del hormigón

El hormigón fue suministrado por la empresa Betón Catalán S.A. situado en el polígono industrial de Sant Pere Molanta a una distancia de aproximadamente 7 km ( $\approx 10$  min) del punto de hormigonado. La dosificación que se estableció para la realización de la losa es la que se describe en la tabla A2.22.

Características del hormigón	Ud.	Datos
Tipificación del hormigón	-	HM-50/15/F
Cemento	kg/m <sup>3</sup>	450
Óxido de calcio (CaO) - Link EVR	kg/m <sup>3</sup> (%spc)	37,5 (8,33)
Relación a/c	-	0,33
Tipo de curado	-	Con agua
Armado	kg/m <sup>3</sup>	1,2 (Fibras metálicas estructurales de 45 mm)
Dimensiones	m	66 x 2,5 (165 m <sup>2</sup> )

Tabla A2. 22 – Características del hormigón

e) Puesta en obra y acabado superficial

La ubicación de la losa dentro del recinto, así como las condiciones de contorno existentes determinaron el sistema de vertido más adecuado. En este caso fue un vertido directo mediante el canalón orientable tal como se puede ver en la figura A2.57.

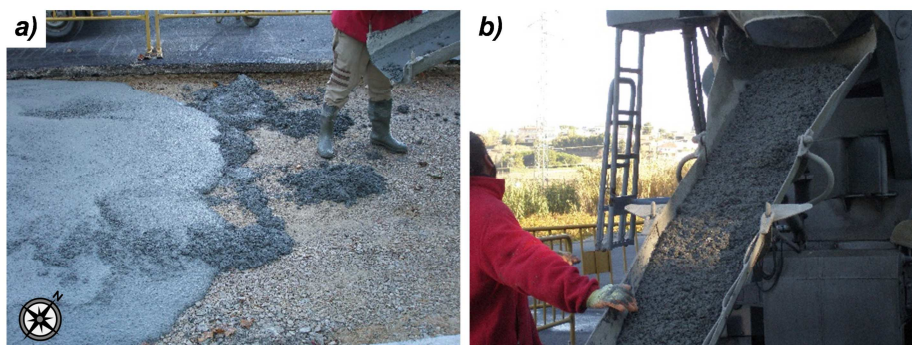


Figura A2. 57 – a) puesta en obra y; b) proceso de hormigonado

En la figura A2.57b se observa como el operario vierte el material y en la figura A2.57a se puede ver el sistema de vertido usado. La losa a hormigonar tenía unas dimensiones de 66 x 2,5m. Para el hormigonado de esta losa fue requerido el volumen de hormigón de tres camiones. El tiempo de mezclado del primer camión desde que se introdujeron los materiales hasta el vertido fue de 40 minutos. Se observó un hormigón muy fluido en el que aparecían burbujas como las que se muestran en la figura A2.58a. El segundo y el tercer camión se mezclaron durante 90 minutos antes de proceder con el vertido. El segundo camión presentaba la misma dosificación que el camión 1 pero la mezcla vertida era más seca y se observaban restos de CaO sin mezclar (figura A2.58b). Para el tercer camión se varió la dosificación corrigiendo el aditivo. La consistencia era la misma que para el segundo y en este también se observaron restos de CaO durante el vertido.

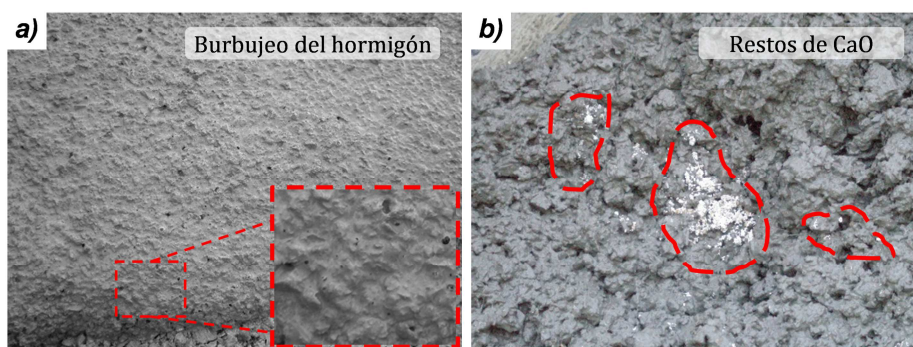


Figura A2. 58 – a) burbujas en el hormigón del camión 1; b) restos de cal en el camión 2 y 3

En la figura A2.58a se muestran el burbujeo que se observó en el primer camión, una vez el hormigón había sido vertido. En la figura A2.58b se muestra algunos de los restos de CaO sin hidratar que aparecieron durante el vertido del material. En algunos casos se observaban pequeñas pelotas de cemento y arena manchadas de CaO en su superficie.

#### f) Ensayos realizados

En relación con el comportamiento del hormigón que se ha definido en el apartado anterior, es necesario también llevar a cabo ensayos de laboratorio para poder dar explicación al comportamiento del material. En este apartado se describirán los ensayos que se llevaron a cabo, así como los resultados obtenidos para cada uno de ellos.

En la tabla A2.23 se muestran los ensayos que se llevaron a cabo para el hormigón vertido en obra y para un hormigón de las mismas características pero sin adición de cal (Link EVR). Para el primer hormigón, el que contiene la adición de cal, se usará la denominación CC y para el de referencia o sin cal, SC.

Tipo / Cantidad	Ensayo	Especificaciones de los ensayos
8 cilíndricas (CC) (150 x 300 mm)	Ensayos a compresión	Rc (20h, 7d, 47d) por duplicado
4 cilíndricas (SC) (150 x 300 mm)		2 reserva Rc (cuando RcP5=20 MPa (20h), 7d, 47d) 1 reserva T, LVDT
2 prismáticas (CC) (150 x 150 x 550 mm)	Térmico Expansión/ retracción	Condiciones de curado: con agua durante el día y tapado por la noche) Ensayo realizado en Cales de Pachs (1semana) T, LVDT
2 prismáticas (SC) (150 x 150 x 550 mm)		Condiciones de curado: con agua durante el día y tapado por la noche) Ensayo realizado en Cales de Pachs (1semana)

Tabla A2. 23 – Descripción de los ensayos realizados en la reparación del socavón en el recinto de Cales de Pachs S.A.

En total se realizaron 12 probetas cilíndricas que se ensayaron a compresión, 8 para el hormigón con CaO (CC) y 4 para el que no contenía dicha adición (SC). Se realizaron también ensayos de deformación para cada uno de los hormigones, contemplando las mismas condiciones de curado. A continuación se define el procedimiento de cada uno de estos ensayos.

- **Ensayos mecánicos (RC)**

Las probetas necesarias para la realización de los ensayos a compresión se moldearon según se describe en la norma UNE-EN 12390-2 (AENOR, 2009a). Las probetas se dejaron en obra y se transportaron al día siguiente al laboratorio de la Escuela de Edificación para proceder con el primero de los ensayos. Las probetas se clasificaron y se conservaron en el laboratorio hasta la fecha del ensayo correspondiente.

Los resultados obtenidos para los dos hormigones son los que se muestran en el gráfico de la figura A2.59. El ensayo se llevó a cabo según se describe en la norma UNE-EN 12390-3 (AENOR, 2009b), usándose el refrentado con azufre como método de preparación de las superficies de las probetas.

El resultado mostrado en el gráfico de la figura A2.59 es interesante desde el punto de vista de comparación entre la existencia o no de la adición de CaO. A diferencia de lo que se ha observado en otras experiencias, en este caso ambos hormigones presentan los mismos valores de resistencia en las mismas edades. A pequeña escala se observa un valor de resistencia algo superior en el hormigón con CaO, pero hay que tener en cuenta que para este hormigón se realizó el ensayo por duplicado, y para el SC solamente se ensayó una probeta. Es por ello que ha de asumirse un margen en el caso del hormigón SC.

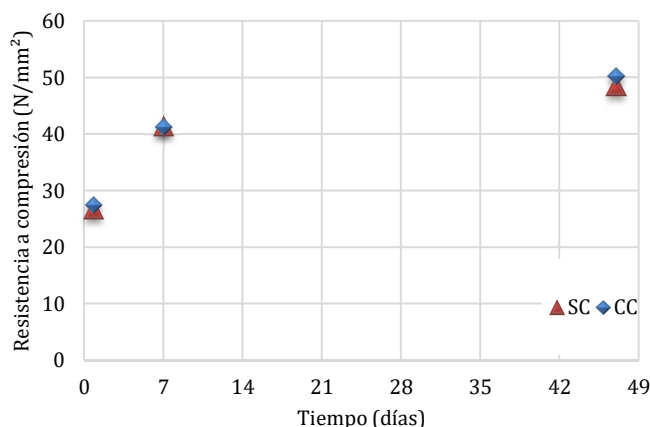


Figura A2. 59 – Valores de resistencia a compresión

- **Ensayos de expansión**

El otro ensayo que se llevó a cabo fue el de deformación del hormigón desde las 7 horas hasta los nueve días de edad. La figura A2.60a muestra los componentes que intervienen en este ensayo. El molde es metálico de dimensiones 150x150x550mm y en sus extremos dispone de dos placas donde se fijan cuatro varillas roscadas que quedarán embebidas en la probeta. Uno de estos extremos es de un material plástico que a su vez facilita el desplazamiento a través del molde, lo que permite medir la deformación mediante un LVDT que se encuentra en contacto directo.

En primer lugar se recubre el molde metálico con un plástico antiadherente (teflón) para evitar que exista algún tipo de fricción entre el hormigón y el metal que falsifique los resultados (figura A2.61). El proceso de este ensayo es relativamente simple de ejecutar y se describe de la siguiente manera. Se vierte el hormigón en dos capas compactándolas con 3 golpes en el suelo y, una vez lleno, se enrasa la superficie y se vuelve a compactar. Se coloca el molde en un lugar dónde no existan vibraciones o golpes que puedan alterar los datos y se adapta el LVDT a la pieza

corredera de plástico. Finalmente se introduce el termopar en el hormigón para medir los datos de temperatura. A las 7 horas del inicio del moldeo se extraen los elementos de tope (figura A2.61) y se empieza a caracterizar la deformación del hormigón.

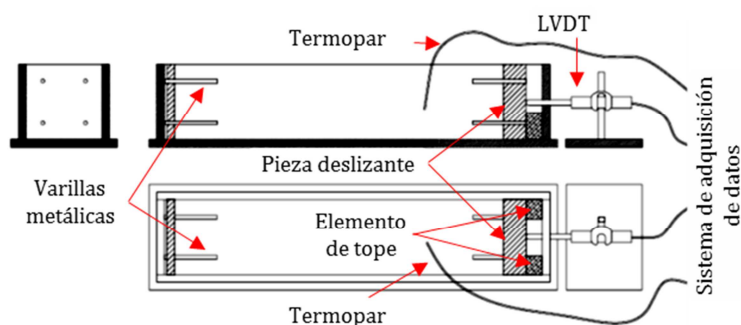


Figura A2. 60 – Diseño del molde del ensayo de expansión

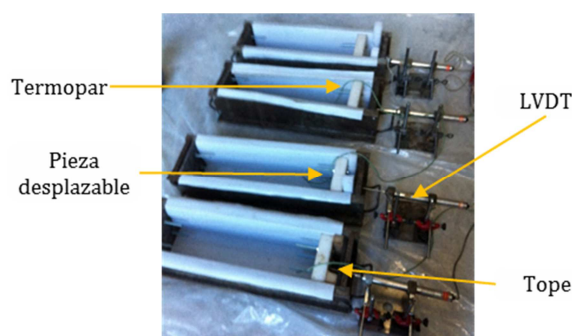


Figura A2. 61 – Elementos intervinientes en el ensayo de deformación

Los resultados obtenidos para esta experiencia se muestran en la figura A2.62 y corresponden a las probetas realizadas con ambos hormigones.

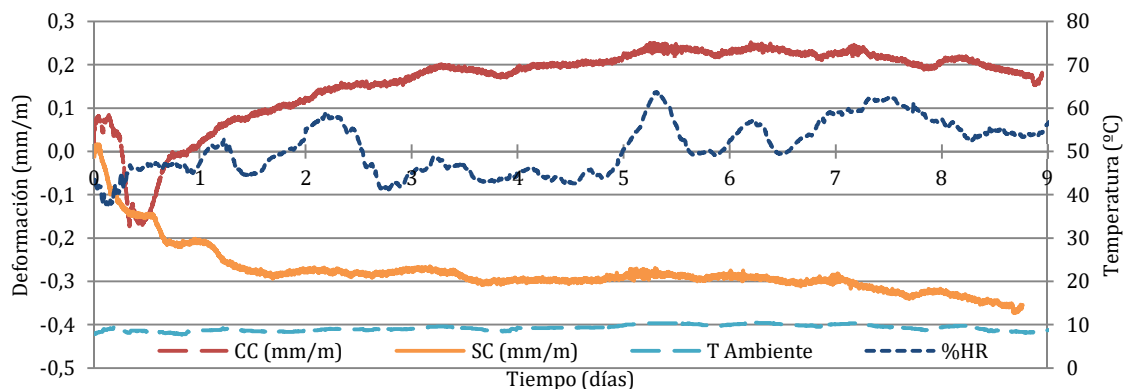


Figura A2. 62 – Resultado ensayo de deformación

En el gráfico anterior hay que destacar la gran diferencia entre el comportamiento del hormigón con CaO (CC) y el de referencia que no contiene dicha adición (SC). Mientras que el hormigón SC se retrae a medida que pierde el agua libre, el hormigón CC genera una expansión suficiente para mantener al material en un estado de expansión. En las primeras 12 horas de medición se observa, en ambos hormigones, una leve expansión seguida de una retracción de igual valor para ambos hormigones. A partir de este momento cada hormigón sigue un comportamiento

distinto. Mientras que el hormigón SC se retrae a valores de  $-0,30$  mm/m el hormigón CC alcanza valores de expansiones de  $0,23$  mm/m, con un incremento total de aproximadamente  $0,40$  mm/m, siendo esta expansión suficiente para contrarrestar la retracción inicial del hormigón.

g) Análisis de resultados

En los subapartados anteriores se han descrito los ensayos realizados, así como los resultados obtenidos para cada uno de ellos. En total se realizaron dos ensayos distintos para el hormigón de la losa, que son:

- Ensayos de resistencia a compresión ( $R_c$ ) en probetas cilíndricas de  $150 \times 300$  mm
- Ensayos de deformación en hormigones con CaO y sin esta adición

Mediante los análisis que ya se han hecho en cada apartado puede llegarse a las siguientes conclusiones:

En primer lugar, y a diferencia de experiencias anteriores, no se ha observado ninguna variación de resistencias entre el hormigón con CaO y el que no la contenía. En ambos casos siguen la misma tendencia con valores muy similares. Podría ser que un mal curado de las probetas hubiera impedido la correcta hidratación del CaO y, por consiguiente, que esta no hubiera cristalizado en  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , lo que le hubiera generado un material menos compacto y resistente.

En segundo lugar, las probetas del ensayo de deformación, al sí haber sido curadas correctamente, se ha generado el efecto expansivo esperado. Se observa al final del gráfico del hormigón CC que aparece un leve descenso de la expansión (7 días) que podría atribuirse al final del curado e inicio del secado del hormigón o a la variación de temperatura.

### **A.2.3. Conclusiones**

Seguidamente se exponen las conclusiones más importantes que se han extraído de los resultados de los ensayos.

La conservación de las probetas realizadas en cámara húmeda es totalmente necesaria para poder apreciar el efecto del aumento de resistencia del hormigón al contener CaO. Como se ha visto en el gráfico, ambos materiales dan valores muy similares debido a esto.

En cuanto al ensayo de deformación resulta necesario alargar el tiempo de ensayo. Se ha observado que el hormigón con CaO genera una deformación inicial suficiente para contrarrestar la retracción, pero es necesario determinar el comportamiento una vez finalizado el curado. En el gráfico se ha observado el pequeño descenso en la deformación a partir del momento del final de este proceso, por lo que resulta necesario poder determinar la expansión remanente a más largo plazo. De esta manera se puede determinar si se llega a una fase de deformación negativa, y de los valores a los que se estabiliza el proceso.



## A2.6. LOSA NORTE Y LOSA SUR EN CIUTAT MERIDIANA

### A.2.1. Introducció

Los objetivos de este documento son: la experiencia de ejecución de dos losas con hormigón de retracción compensada (HRC) en Nou Barris (Ciutat Meridiana, Barcelona) y la visita realizada a los 7 y a los 110 días de edad.

Para el primer objetivo (losa) se expondrá el proceso de hormigonado, así como los ensayos de laboratorio que se llevaron a cabo. Igualmente se definirán las características de los materiales y su proceso de fabricación. Durante la experiencia intervinieron las siguientes personas.

Para el segundo objetivo (visitas posteriores) se mostraran las imágenes realizadas para cada fecha y se describirá el estado de ambos elementos. Finalmente, se expondrán las conclusiones obtenidas, tanto para los ensayos, como para las observaciones posteriores.

### A.2.2. Objetivo 1: ejecución de las losas

Las losas se ejecutaron el día 12 de diciembre de 2013 durante la mañana. Las referencias de las losas son: HM-20/20/B y HM-30/20/B, correspondientes a las obras 8 y 9, respectivamente. Estas se localizan dentro del recinto deportivo de este distrito, ubicado a la altura del número 70 de la Avinguda dels Rasos de Peguera. Dentro del recinto ambas losas se encuentran situadas en la parte oeste, en contacto con el muro de delimitación. En la figura A2.63 se muestra la localización de las losas de las referencias de obras 8 y 9.

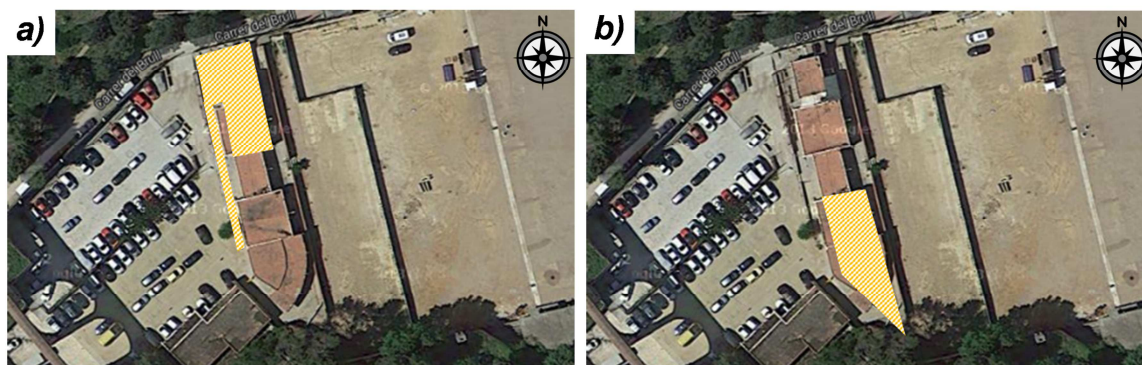


Figura A2. 63 – a) Losa con hormigón HM-20/20/B; b) Losa con hormigón HM-30/20/B

Los datos meteorológicos del mes de diciembre en esta zona se han tomado de la estación meteorológica situada en el Observatori Fabra (BCN) que se encuentra a unos 7 km al Sudoeste de la zona de hormigonado. Los datos registrados de este período se especifican en la tabla A2.24.

Datos medidos 2013	Diciembre
Temperatura media mensual	9 °C
Amplitud térmica media mensual	6,7 °C
Precipitación mensual	16,5 mm
Humedad relativa media mensual	60 %
Irradiación solar global diaria mensual	7,2 MJ/m <sup>2</sup>

Tabla A2. 24 – Datos meteorológicos de la zona (Servei Meteorològic de Catalunya, 2013)

a) Confección del hormigón

El hormigón fue suministrado por la empresa Betón Catalán S.A. situado en el polígono industrial Can Magí situado a Cerdanyola del Vallès a una distancia de aproximadamente 14 km (20 min) del punto de hormigonado. La dosificación que se estableció para la realización de las losas es la que se describe en la tabla A2.25.

Características del hormigón	Ud.	Datos – R.O.: 8	Datos – R.O.: 9
Tipificación del hormigón	-	HM-20/20/B	HM-30/20/B
Cemento	kg/m <sup>3</sup>	235	330
Óxido de calcio (CaO) - Link EVR	kg/m <sup>3</sup> (%spc)	16,6 (7,06)	21 (6,36)
Relación a/c	-	0,58	0,47
Tipo de curado	-	Agua (primeras 12 horas)	
Armado	gr/m <sup>3</sup>	900 (microfibras de polipropileno)	
Dimensiones	m <sup>2</sup>	340	80

Tabla A2. 25 – Características del hormigón

Hay que mencionar que inicialmente ambas losas iban a realizarse con el mismo tipo de hormigón pero las necesidades de puesta en obra de la losa carril requirieron de ciertas modificaciones. El hormigón de la losa carril no podía ser bombeado, por lo que un camión hormigonera debía de pasar por encima de la losa sur a los 7 días. Esto hizo que los técnicos aumentaran la resistencia característica del hormigón de esta losa para evitar posibles desperfectos en el elemento.

b) Puesta en obra y acabado superficial

La ubicación de la losa dentro del recinto, así como las condiciones de contorno existentes determinaron el sistema de vertido más adecuado. En este caso, y para ambas losas, fue un vertido mediante bomba tal como se puede ver en la figura A2.64.

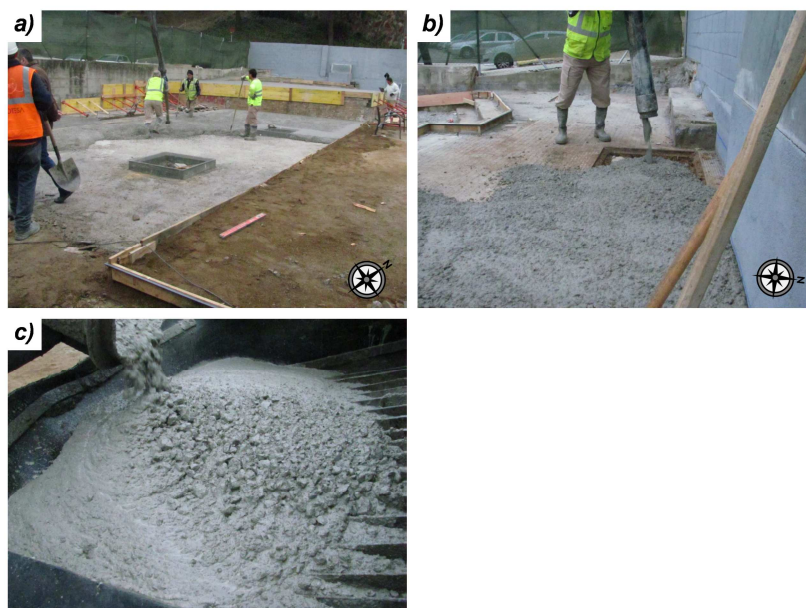


Figura A2. 64 – a) vertido mediante bomba en losa norte; b) vertido en losa norte superior; c) hormigón

#### c) Estado de la base de la losa

La zona en la que se iba a ejecutar las losas había estado edificada, por lo que hubo que eliminar los restos del pavimento de terrazo que aún existían. De igual manera hubo que eliminar restos de losetas de las aceras. Los restos de pavimento pueden verse en la figura A2.65b que son los que corresponden a la parte superior de la losa Norte.

Una vez eliminados estos pavimentos se realizó una subbase con hormigón pobre por tal de uniformizar las irregularidades del suelo. En la figura A2.65a y en la figura A2.65c muestra la uniformización de los pavimentos de la losa Sur y de la losa Norte, respectivamente.

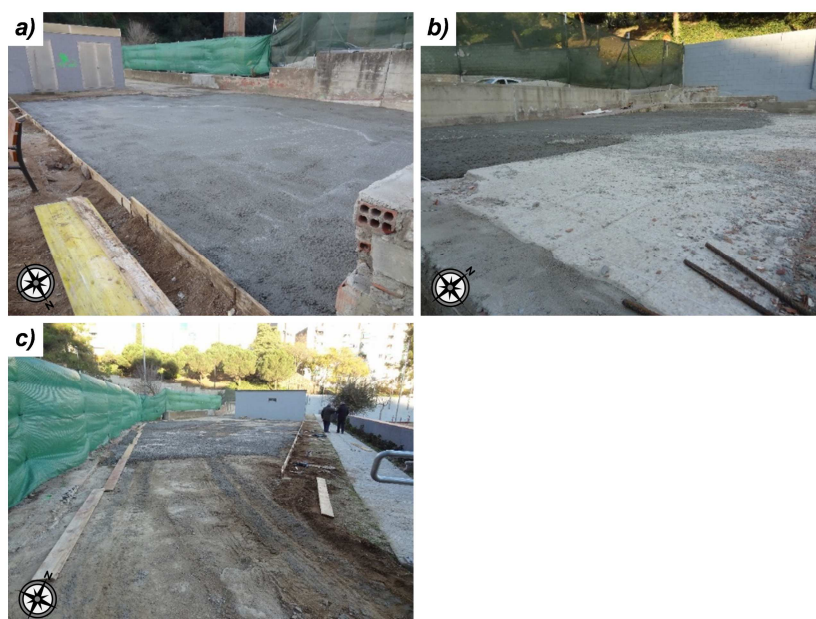


Figura A2. 65 – a) losa norte (inferior); b) losa norte (superior); c) losa sur

#### d) Ensayos realizados

Para esta experiencia únicamente se realizaron ensayos de resistencia llevados a cabo por la propia empresa que facilitaba el hormigón, que era Betón Catalán S.A. Los resultados de las resistencias a 1, 7 y 28 días para ambos hormigones se muestran en la figura A2.66. Las especificaciones “-1” y “-2” corresponden a cada uno de los dos camiones ensayados. El dato más relevante a tener en cuenta en los resultados de ambos hormigones es la resistencia a los 28 días.

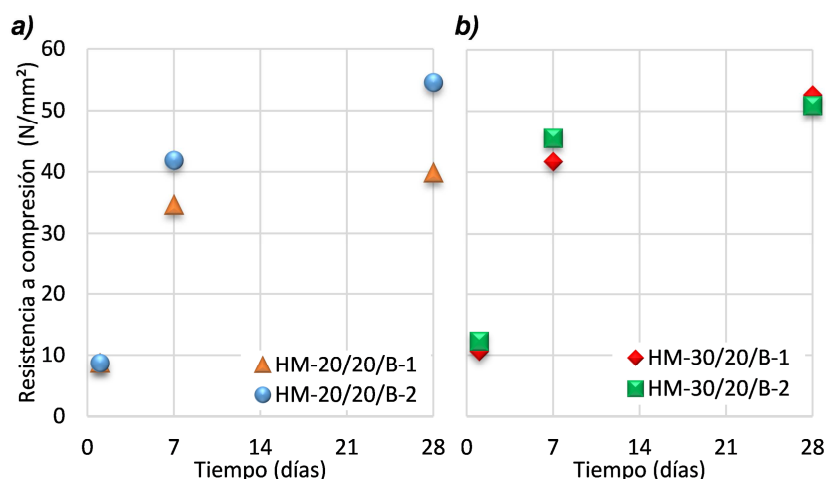


Figura A2. 66 – Resultados de resistencia a compresión; a) losa norte; b) losa sur

Se observa en la figura A2.66a que el hormigón HM-20/20/B alcanza una resistencia superior a la característica a los 28 días de edad. Este es un dato relevante ya que el hormigón usado para dicha losa tenía una resistencia característica de 20 MPa y las fibras que contenía no eran de tipo estructural. Otro dato a remarcar es la diferencia de resistencia entre dos de los camiones hormigonera, siendo esta de casi 15MPa.

Los ensayos realizados al hormigón HM-30/20/B son los mismos que los realizados para el hormigón de la losa Norte y se muestran en la figura A2.66b. Al igual que para el caso anterior la resistencia máxima supera el valor característico del hormigón dosificado, siendo este un HM-30 y la resistencia a 28 días algo superior a los 50MPa.

#### e) Análisis de resultados

Para esta experiencia únicamente se realizaron ensayos de resistencia a compresión a las 24h, a los 7 y a los 28 días. Los resultados de los cuatro camiones estudiados se han mostrado en la figura A2.66 dividiéndolos en función de la losa hormigonada.

De ambos gráficos puede sacarse una conclusión común, que es que se observa un aumento de resistencia en ambos hormigones con respecto a la resistencia de proyecto. En el caso del hormigón de 20MPa el aumento de resistencia es superior al doble de la proyectada, y para el hormigón de 30MPa es un 66% mayor. Esto puede deberse a las fibras incluidas en la mezcla además del hecho que el CaO aumenta la resistencia del hormigón.

### A.2.3. Objetivo 2: visitas posteriores

#### a) Estado de las losas

En visitas posteriores realizadas los días 18 de diciembre de 2013 y el 1 de abril y 16 de junio de 2014 se observó, principalmente en las dos últimas fechas, la aparición de fisuras en distintas zonas de las losas. La edad de la losa en dichas visitas es la que se muestra en la tabla A2.26.

Visita	Edad de la losa	Motivo visita
18.12.2013	7 días	Hormigonado de losa contigua
01.04.2014	110 días ( $\approx 4$ meses)	Visita de control
16.06.2014	186 días ( $\approx 6$ meses)	Levantamiento de lesiones

Tabla A2. 26 – Edades de la losa en las visitas realizadas

#### b) 7 días de edad

El día 18 de diciembre se procedió con el hormigonado de la losa Oeste o Carril y pudo hacerse una valoración de la experiencia de ambas losas que ya tenían 7 días de edad. Seguidamente se muestran una serie de imágenes del estado en que se encontraron ambos pavimentos. En primer lugar se muestran los alcorques de los árboles, en los que no se observó ninguna fisura en las esquinas (figura A2.67).

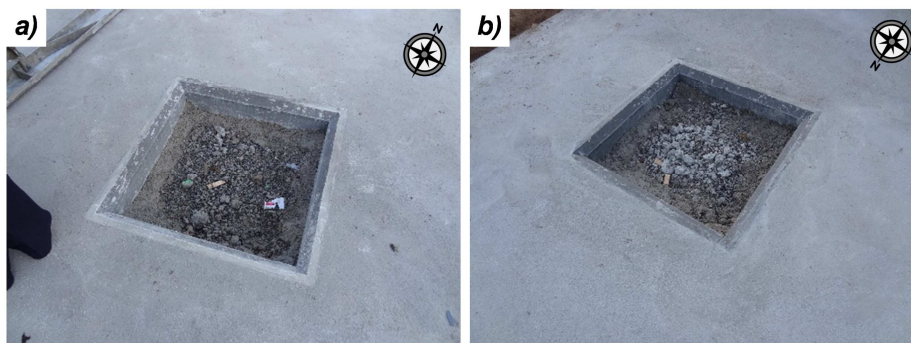


Figura A2. 67 – Alcorques situados en la losa con hormigón tipo HM-20/20/B

La introducción de alcorques en ambas losas no generó patologías en el pavimento. No se observaron fisuras en las esquinas de estos, en ninguna de las losas realizadas con distintos hormigones. La figura A2.68 muestra el mobiliario urbano que ya se había colocado en ambas losas, en este caso se muestra el mobiliario de la losa Norte.

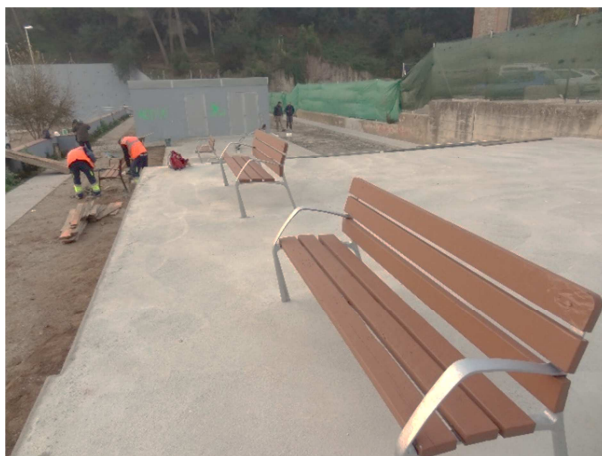


Figura A2. 68 – Mobiliario urbano colocado en la losa Norte

En ninguno de los orificios realizados para la colocación del mobiliario se observó ninguna patología. Finalmente, en la figura A2.69 se observa el paso del camión hormigonera por encima de la losa Sur realizada con hormigón HM-30/20/B a los 7 días de la ejecución de esta.

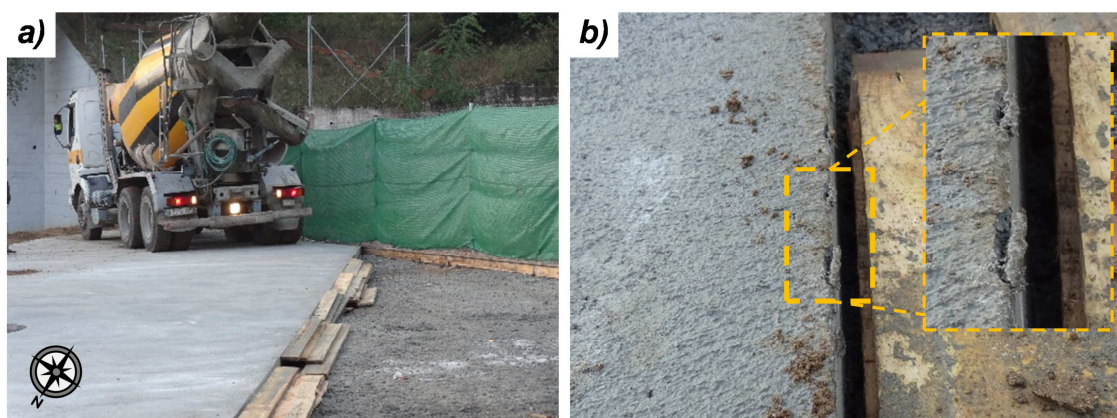


Figura A2. 69 – Paso de camión por la losa con hormigón tipo HM-30/20/B a los 7 días del hormigonado de esta

Tras el paso del vehículo, únicamente se observó una mínima rotura del canto de la losa en contacto con el carril a hormigonar (figura A2.69b). Como se observa los pequeños trozos de hormigón que se desprenden no son relevantes para el conjunto de la losa.

c) 110 días de edad ( $\approx$  4 meses)

La segunda visita realizada fue el día 1 de abril de 2014 después de un aviso de que habían aparecido fisuras en alguna de las losas. Después de la inspección visual de estas se identificaron las fisuras que se mostraran a continuación. La primera fisura que se observó estaba situada en la losa Norte, en contacto con la rampa, que es la que se muestra en la figura A2.70. El resto de esta losa estaba en perfecto estado, al igual que la losa sur.

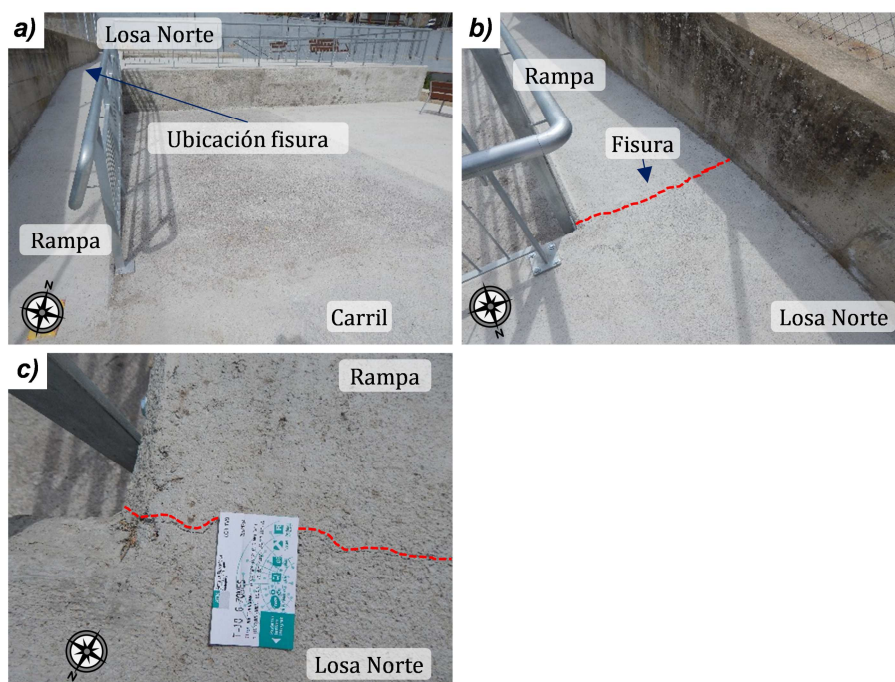


Figura A2. 70 – a) Vista general; b) Localización de la fisura entre la losa norte y la rampa; c) Detalle de fisura

Por otra parte, en el pasillo lateral que discurre a continuación de la rampa y paralelo al carril, se observaron dos fisuras que travesaban ambos elementos. Estas dos fisuras se localizan en la losa en contacto con los extremos de la caseta, lo que hace pensar que las distintas condiciones de contorno han propiciado su aparición. Se cree que la fisura tiene su inicio en el carril y que se desplaza en dirección al pasillo lateral. En la figura A2.71 se muestran las dos fisuras mencionadas y su geometría. Puede observarse que ambas losas son paralelas entre sí y perpendiculares a la dirección del pasillo.

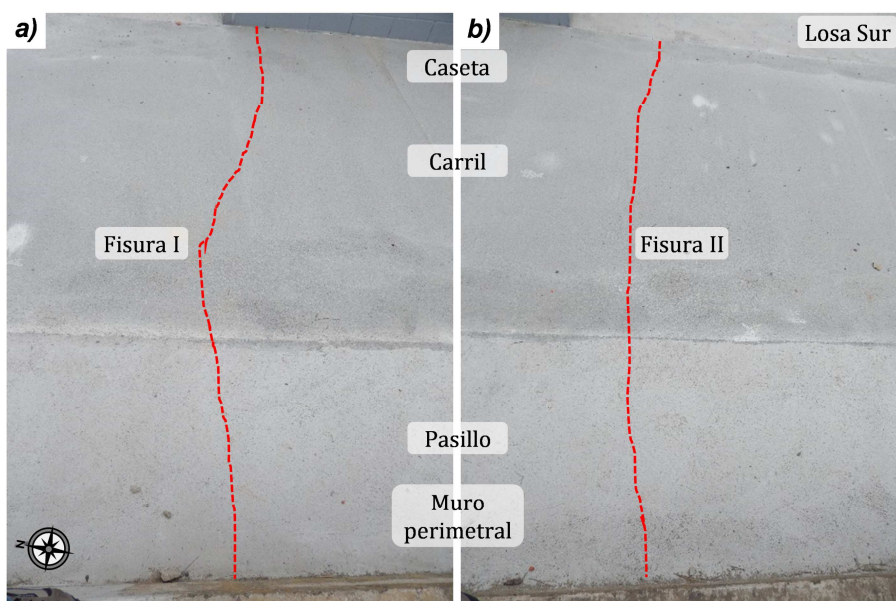


Figura A2. 71 – Fisuras en el pasillo lateral

d) 186 días de edad ( $\approx$  6 meses)

En la visita realizada a estas losas el día 16 de junio de 2014, aproximadamente unos 6 meses de edad, se observa un aumento considerable de la fisuración en ambas losas, siendo estas fisuras las típicas para pavimentos sin juntas. Seguidamente se mostraran las imágenes hechas en dicha fecha y su descripción.

La figura A2.72 muestra las fisuras aparecidas en las esquinas a  $90^\circ$ . En este caso la fisura aparece en ambos extremos del alcorque (figura A2.72a) y su continuidad por todo el hormigón (figura A2.72b). Además se evidencia la retracción del hormigón, ya que este se ha “despegado” del marco del alcorque.

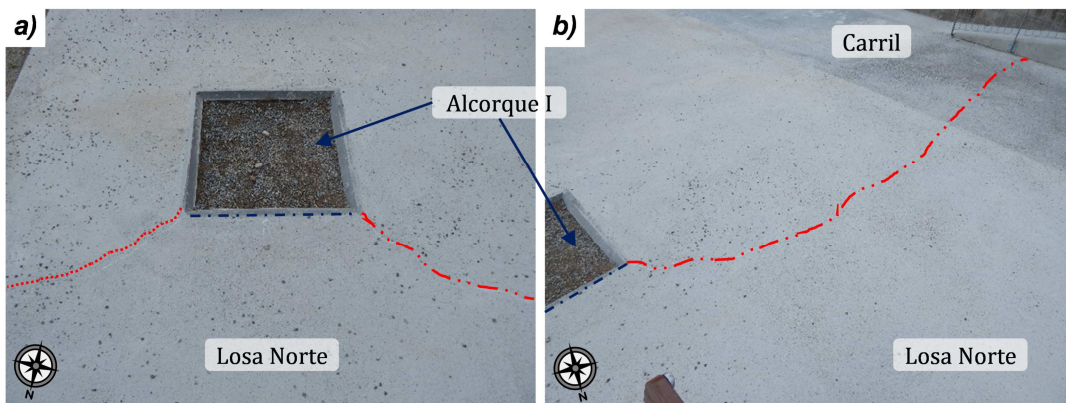


Figura A2. 72 – Fisura a  $45^\circ$  en alcorque de losa Norte (parte inferior)

La figura A2.73 evidencia la aparición de fisuras en la losa Norte (parte superior). Aunque en la imagen se ha graficado principalmente la fisura longitudinal, existe otra más fina (figura A2.73a) que divide la losa en el sentido transversal. En el conjunto de este elemento se ha observado que se han generado 4 superficies divididas por las fisuras de aproximadamente igual dimensión.

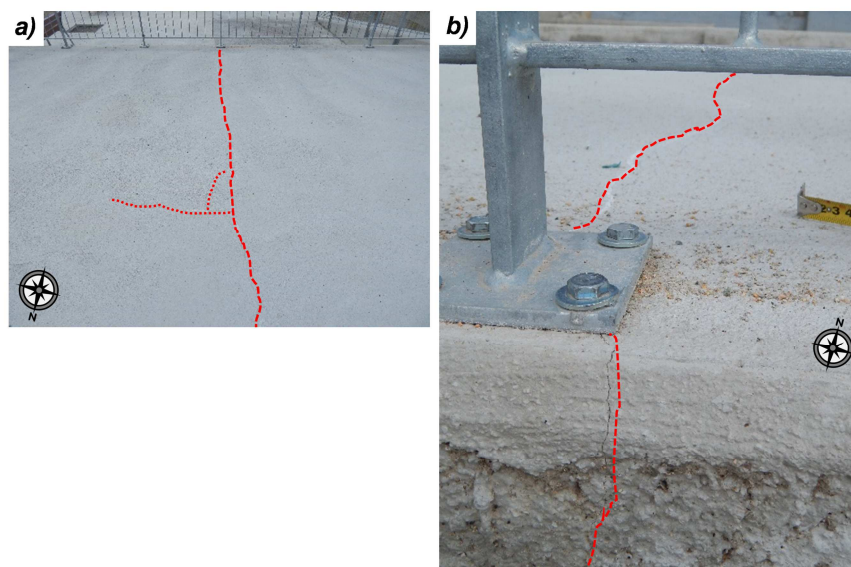


Figura A2. 73 – Fisura longitudinal y transversal en losa Norte (parte superior)



En la figura A2.74 muestra dos fisuras, también situadas en la losa Norte superior. En la primera imagen (figura A2.74a) se muestran dos fisuras aparecidas al inicio y al final de la rampa. La fisura superior es la misma que ya se observó en la otra rampa en la segunda visita. En la figura A2.74b se observa el mismo fenómeno que en los alcorques anteriores, que son las fisuras a 45°.

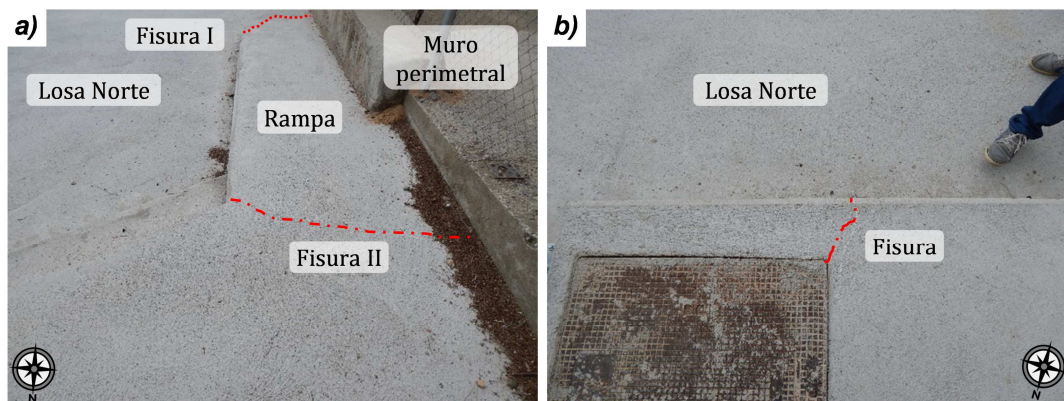


Figura A2. 74 – Losa Norte superior; a) fisuras en la rampa; b) fisuras a 45°

Para finalizar, en la figura A2.75 se muestran las fisuras de la losa Sur. Las más significativas son la rotura del extremo sur de la losa (terminado en punta, tipo triángulo) mediante una fisura de lado a lado (figura A2.75a). En la imagen contigua (figura A2.75b) se muestra la aparición de fisuras entre alcorques circulares. En este caso, aparecen fisuras entre alcorques pero además existen otras que dividen la losa en su ancho, atravesando estos elementos.

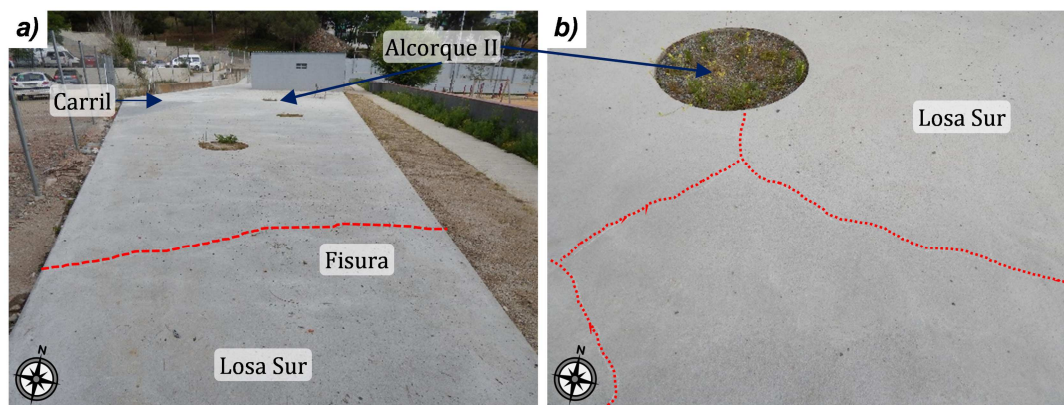


Figura A2. 75 – Losa Sur; a) fisura de rotura de punta; b) fisuras de unión entre alcorques

#### A.2.4. Conclusiones

Seguidamente se expondrán las conclusiones más importantes que se han extraído tanto de los resultados de los ensayos como de la visión organoléptica de los asistentes.

En primer lugar, los resultados de resistencia muestran un aumento considerable de la característica a los 28 días de edad. Eso se puede deber a la presencia de fibras y a la adición de CaO. Como dato importante hay que remarcar que aunque la resistencia característica inicial es distinta en ambos hormigones, a los 28 días los valores son muy parecidos. Podría decirse entonces que el efecto del aumento de la resistencia está ligado a la presencia de fibras y de CaO.

En cuanto a las visitas de obra se ha observado un aumento de la fisuración a partir de los 4 meses de edad, que ha ido aumentando hasta observarse algunas fisuras que coinciden con las de un hormigón convencional. Puede decirse que con esta dosificación o cuidados posteriores no es posible permanecer en un estado de expansión permanente, sino que el hormigón termina por retraer. Otro dato importante es el confinamiento de estos elementos. Ambas losas no se encuentran en un estado de confinamiento total, ya que presentan lados libres y es posible que las fibras plásticas no sean suficientes para generar el confinamiento necesario. Debido a esto puede decirse que el CaO reduce la retracción inicial pero que la falta de confinamiento del material termina por permitir el fenómeno de la retracción y fisuración del elemento.

## A2.7. CARRIL PILOTO EN CIUTAT MERIDIANA Y PRUEBA DE HORMIGONADO PREVIA

### A.2.1. Introducción

Los objetivos de este documento son: la experiencia de ejecución del carril piloto con hormigón de retracción compensada (HRC) en Nou Barris (Ciutat Meridiana, Barcelona), la prueba de hormigonado previa a la ejecución de la losa y las visitas realizadas con posterioridad.

Para el primer objetivo (losa) se expondrá el proceso de hormigonado, así como los ensayos de laboratorio que se llevaron a cabo. Igualmente se definirán las características de los materiales y su proceso de fabricación. Durante la experiencia intervinieron las siguientes personas.

Para el segundo objetivo (visitas posteriores) se mostraran las imágenes realizadas para cada fecha y se describirá el estado de ambos elementos. Finalmente, se expondrán las conclusiones obtenidas, tanto para los ensayos, como para las observaciones posteriores.

### A.2.2. Objetivo 1: prueba de hormigonado

La prueba de hormigonado para el carril se realizó el día 12 de diciembre de 2013 en la planta de Betón Catalán (R.O. nº 10). Este ensayo permitió realizar los ensayos de caracterización del material, así como determinar la idoneidad de la puesta en obra prevista. En la figura A2.76 se muestran algunos de los procesos del desarrollo de la experiencia.

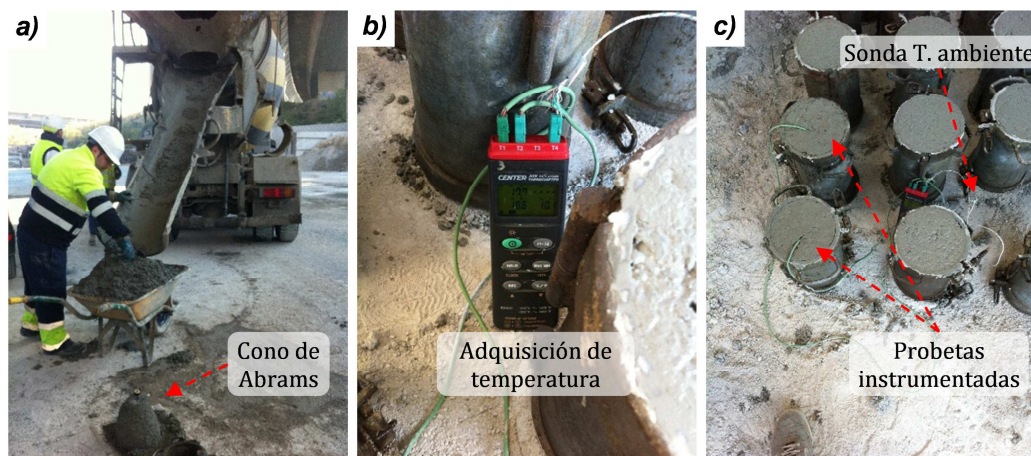


Figura A2. 76 – a) cono de Abrams; b) aparato adquisición temperatura; c) probetas instrumentadas

En la figura A2.76a se muestra como se realizó el ensayo de consistencia y puede apreciarse en la parte inferior el cono de Abrams. En la figura A2.76b y en la figura A2.76c se muestra el aparato de adquisición de la temperatura y las probetas ya instrumentadas, respectivamente. En total se realizaron los ensayos que se muestran en la tabla A2.27.

Tipo / cantidad	Ensayo	Especificaciones de los ensayos
16 cilíndricas (150x300mm)	Ensayos a compresión	Betón Catalán (empresa) UPC
4 prismáticas (150x150x600mm)	Térmico Expansión / retracción	T, LVDT Condiciones de curado: tapada con plástico
2 cilíndricas	Térmico	T

Tabla A2. 27 – Descripción de los ensayos realizados al hormigón de prueba.

Los ensayos de resistencia se llevaron a cabo por duplicado, unos por parte de la UPC y otros realizados por la central de hormigonado. Los resultados se muestran en la figura A2.77. Se observa que a partir de los 4 días los resultados obtenidos empiezan a diferir, dando resultados inferiores las probetas ensayadas en la UPC con una diferencia de un 8 % a los 7 días. Dichas diferencias pueden deberse a las condiciones de conservación de las probetas por parte de ambas instituciones.

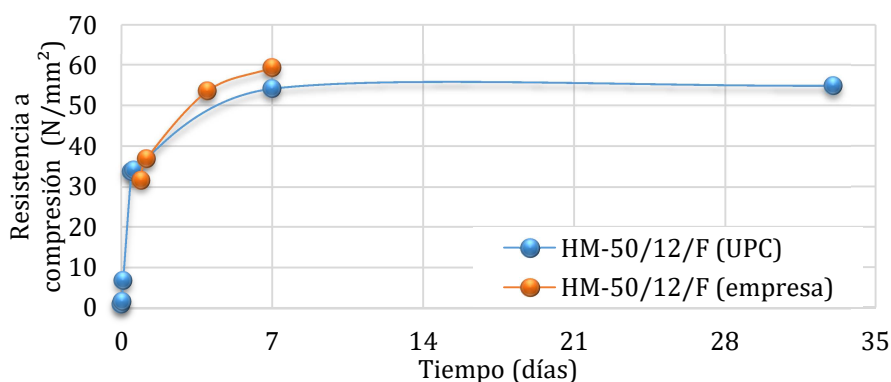


Figura A2. 77 – Valores de resistencia a compresión de las probetas realizadas para el hormigón de prueba

En la figura A2.78 se muestran los resultados de deformación obtenidos de las 4 probetas ensayadas en el laboratorio de materiales de la Escuela de Edificación. La tendencia que se reproduce en todos los casos es: ligera retracción hasta las 12 h y a partir de aquí las probetas expanden hasta valores comprendidos entre los 0,25 y los 0,50 mm/m. Para el caso de hormigones sin adición de cal se ha observado en estudios previos que a largo plazo se dan retracciones del orden de -0,35 mm/m.

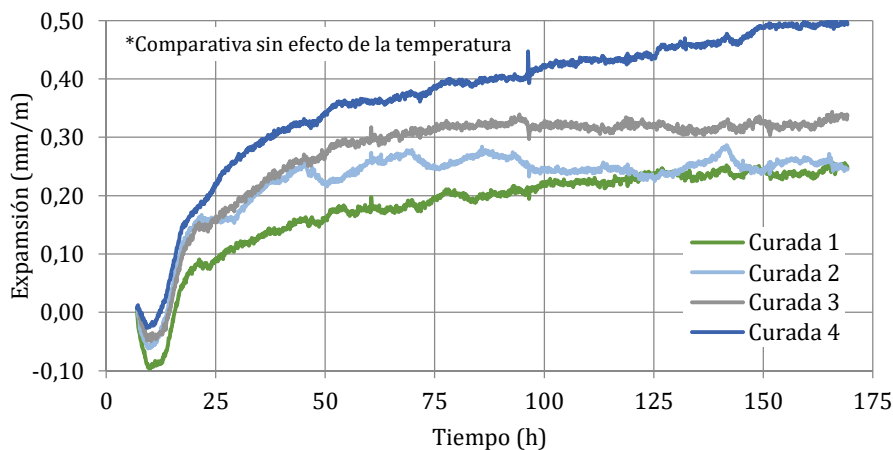


Figura A2. 78 – Comparativa de las expansiones de las 4 probetas analizadas

### A.2.3. Objetivo 2: ejecución del carril

El carril se ejecutó el día 18 de diciembre de 2013 durante la mañana (R.O.: nº 12). Este se localiza dentro del recinto deportivo de este distrito, ubicado a la altura del número 70 de la Avinguda dels Rasos de Peguera. Dentro del recinto la losa se encuentra situada en la parte oeste, entre las losas hormigonadas el día 12 de diciembre. En la figura A2.79 se muestra la localización de la losa.

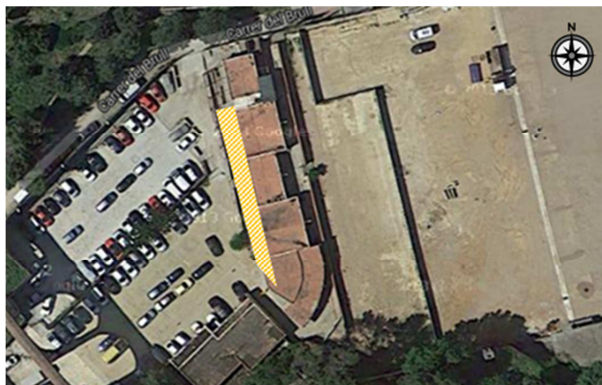


Figura A2. 79 – Localización del carril dentro del recinto

Los datos meteorológicos del mes de diciembre en esta zona se han tomado de la estación meteorológica situada en el Observatori Fabra (BCN) que se encuentra a unos 7 km al Sudoeste de la zona de hormigonado. Los datos registrados de este período se especifican en la tabla A2.28.

Datos medidos 2013	Diciembre
Temperatura media mensual	9 °C
Amplitud térmica media mensual	6,7 °C
Precipitación mensual	16,5 mm
Humedad relativa media mensual	60 %
Irradiación solar global diaria mensual	7,2 MJ/m <sup>2</sup>

Tabla A2. 28 – Datos meteorológicos de la zona (Servei Meteorològic de Catalunya, 2013)

#### a) Confeción del hormigón

El hormigón fue suministrado por la empresa Betón Catalán S.A. situado en el polígono industrial Can Magí situado a Cerdanyola del Vallès a una distancia de aproximadamente 14 km ( $\approx$  20 min) del punto de hormigonado. La dosificación que se estableció para la realización de la losa es la que se describe en la tabla A2.29.

Características del hormigón	Ud.	Datos – Losa Norte
Tipificación del hormigón	-	HM-50/15/F
Cemento	kg/m <sup>3</sup>	450
Óxido de calcio (CaO) - Link EVR	kg/m <sup>3</sup> (%spc)	37,5 (8,33)
Relación a/c	-	0,33
Tipo de curado	-	Con agua
Armado	kg/m <sup>3</sup>	1,2 (microfibras de polipropileno)
Dimensiones	m <sup>2</sup>	150

Tabla A2. 29 – Características del hormigón

#### b) Puesta en obra y acabado superficial

La ubicación de la losa dentro del recinto, así como las condiciones de contorno existentes determinaron el sistema de vertido más adecuado. En este caso fue un vertido directo mediante canalón orientable, tal como se puede ver en la figura A2.80. En la figura A2.80a se muestra el espacio disponible dentro del carril para el paso del camión y en la figura A2.80b se observa el proceso de vertido.

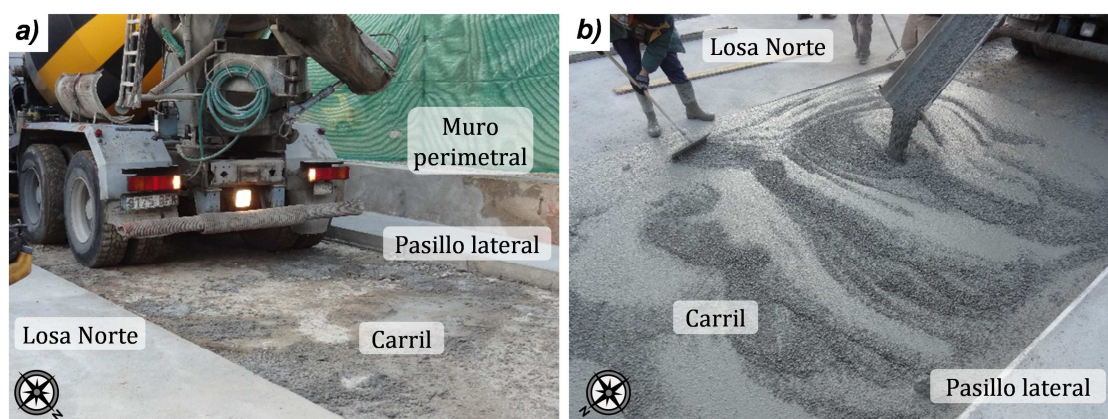


Figura A2. 80 – a) acceso de la hormigonera; b) hormigonado mediante canal orientable

El acceso del camión fue por encima de la losa Sur hormigonada el día 12 de diciembre, cuya dosificación era HM-30/20/B (figura A2.81). En ella puede verse como se realizó el acceso del camión para hormigonar el carril. Antes de la ejecución de dicha losa hubo que prever el paso de la hormigonera por lo que se aumentó la resistencia de un HM-20 a un HM-30. Una vez realizado el hormigonado del carril pudo comprobarse que la losa no sufrió ningún desperfecto.

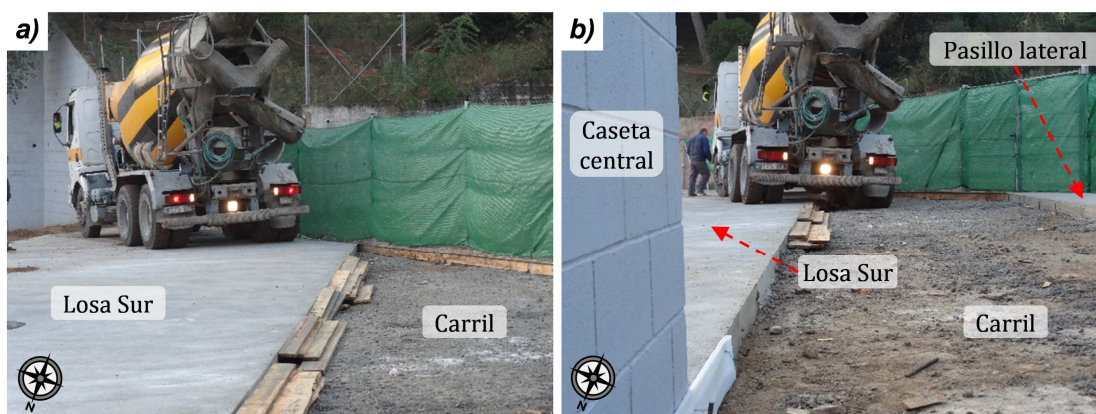


Figura A2. 81 – a) paso del camión por la losa Sur; b) acceso al carril a hormigonar

En la figura A2.82 se muestra el vertido del hormigón del primero de los camiones. Durante el vertido se observaron pelotas que al romperlas resultaron que eran de fibras, tal como se observa en la figura A2.83. Según los operarios resultaba complicado trabajar con dicho hormigón ya que parecía “chicle”. Las pelotas de fibras se extrajeron del hormigón y se tiraron en la zona del carril que aún no había sido hormigonada.

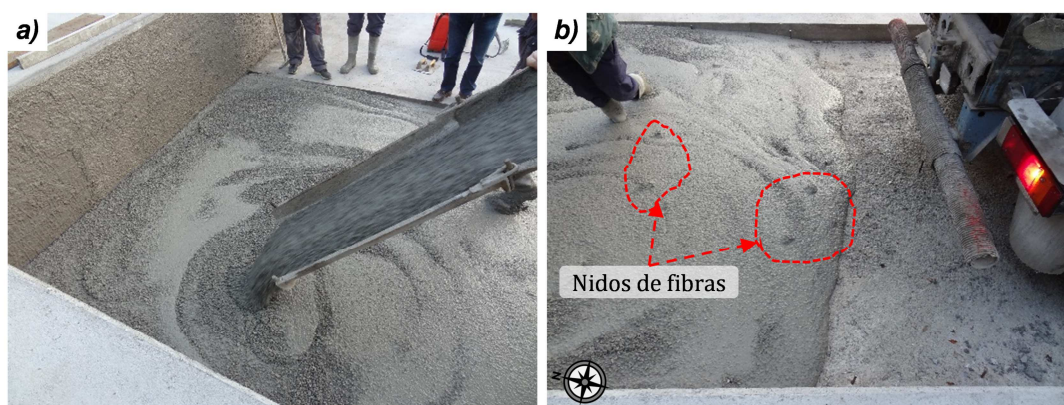


Figura A2. 82 – Vertido del primer camión

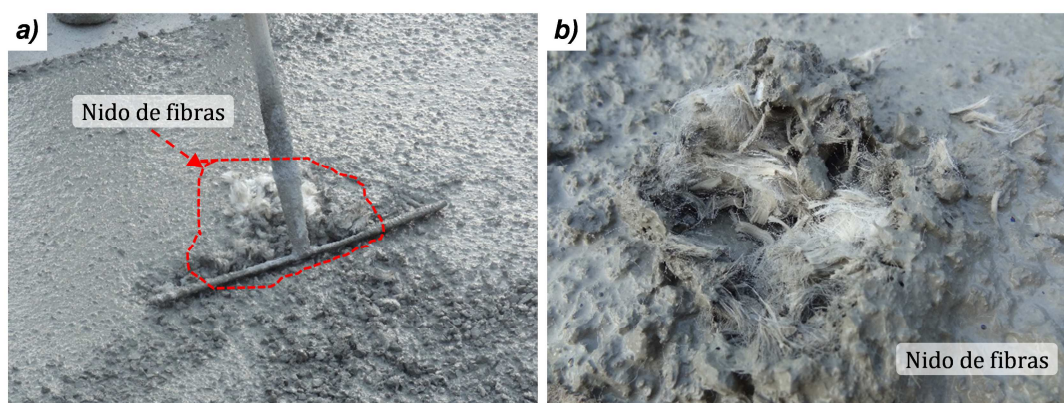


Figura A2. 83 – Pelotas de fibras de polipropileno durante el vertido del primer camión

Durante el vertido del segundo camión aparecieron igualmente pelotas, tal como se observa en la figura A2.84a. Dichas pelotas eran de áridos y cemento (figura A2.84b), por lo que se procedió a deshacerlas y mezclarlas con el hormigón.

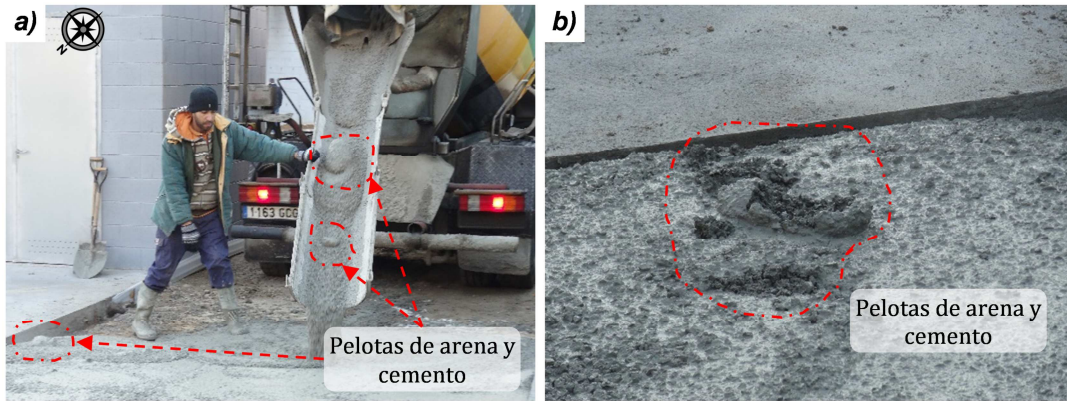


Figura A2. 84 – Vertido del segundo camión

Finalmente, y tal como se acordó en la primera visita de obra, se preparó una parte del carril para realizar un acabado superficial de prueba. A dicha sección se realizó un denudado, cuya finalidad es evitar el fraguado superficial del hormigón para que el árido quede visto. El proceso de preparación del hormigón, así como la ejecución del denudado, se muestran en la figura A2.85 y en la figura A2.86 respectivamente.



Figura A2. 85 – Acabado del carril manualmente

En las dos imágenes de la figura A2.85 se muestran dos etapas del acabado manual que realizó un solo operario. En la figura A2.85a se muestra la zona del inicio del carril y en la figura A2.85b se muestra una zona comprendida entre el final de la rampa y la caseta central; mientras que en la figura A2.86 se muestra el proceso de denudado que se realizó a la parte inicial del carril una vez esta había sido preparada. En la primera imagen (figura A2.86a) se muestra como el operario vierte el producto por encima del hormigón, y en la segunda imagen (figura A2.86b) se observa el proceso terminado, así como un detalle del aspecto superficial del hormigón.



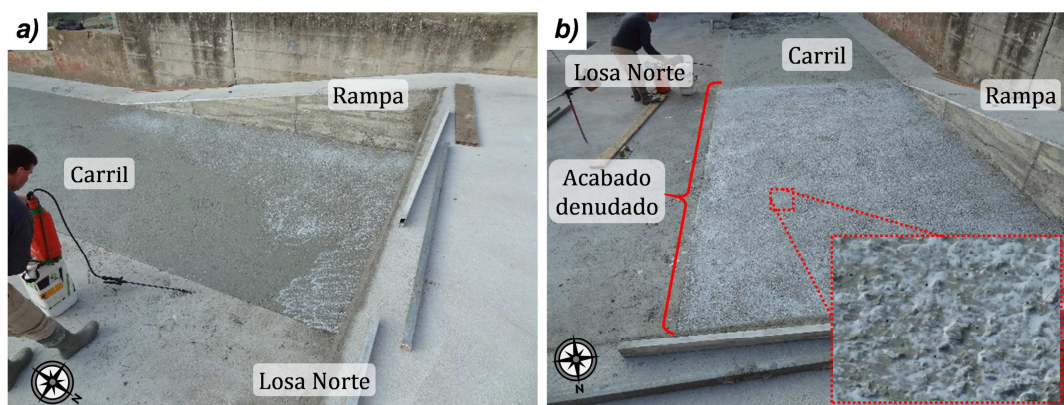


Figura A2. 86 – Zona con tratamiento denudado

c) Estado de la base de la losa

La zona en la que se iba a ejecutar la losa también había estado edificada, por lo que hubo que eliminar los restos del pavimento de terrazo que aún existían. De igual manera hubo que eliminar restos de losetas de las aceras. El aspecto final del pavimento una vez se habían terminado estos trabajos es el que se muestra en la figura A2.87.

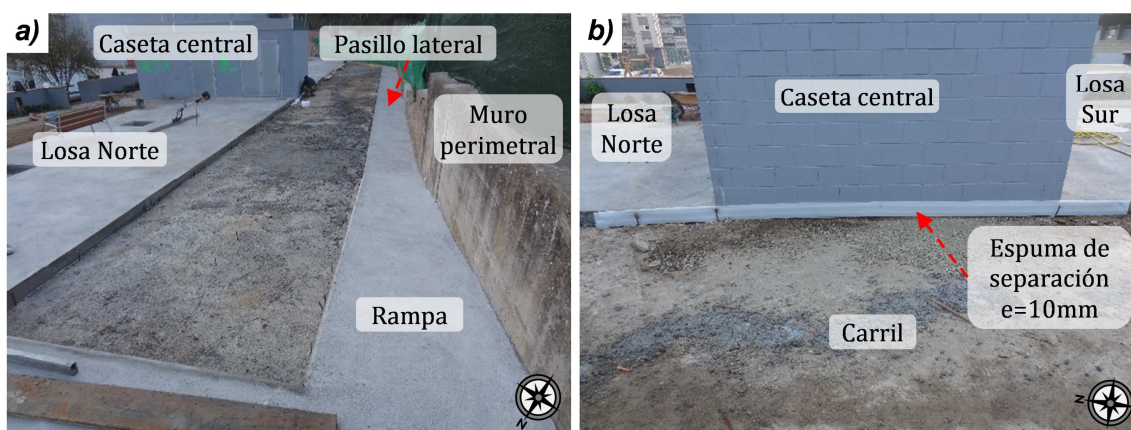


Figura A2. 87 – Aspecto de la base del carril; a) vista longitudinal; b) detalle del contacto con la caseta central

d) Ensayos realizados

Para esta experiencia no se realizaron ensayos en obra por haber sido caracterizado previamente en la prueba.

### A.2.4. Objetivo 3: visitas posteriores

a) Estado de las losas

En visitas posteriores realizadas los días 1 de abril y 16 de junio de 2014 se observó, la aparición de fisuras en distintas zonas de la losa. La edad de la losa en dichas visitas es la que se muestra en la tabla A2.30.

Visita	Edad de la losa	Motivo visita
01.04.2014	104 días ( $\approx 3,5$ meses)	Visita de control
16.06.2014	180 días (6 meses)	Visita de control

Tabla A2. 30 – Edades de la losa en las visitas realizadas

b) 104 días de edad ( $\approx 3.5$  meses)

Esta visita fue realizada el día 1 de abril de 2014 al haber aparecido fisuras en alguna de las losas. Después de la inspección visual se identificaron las fisuras que se mostraran a continuación y que ya se expusieron en el documento R.O. 8/9. La figura A2.88 corresponde a las fisuras aparecidas en el carril y continuas también a través del pasillo lateral.

En esta primera figura se cree que las fisuras se iniciaron en el carril, en contacto con la caseta o la losa Sur y que a partir de este punto avanzaron hasta el pasillo lateral.

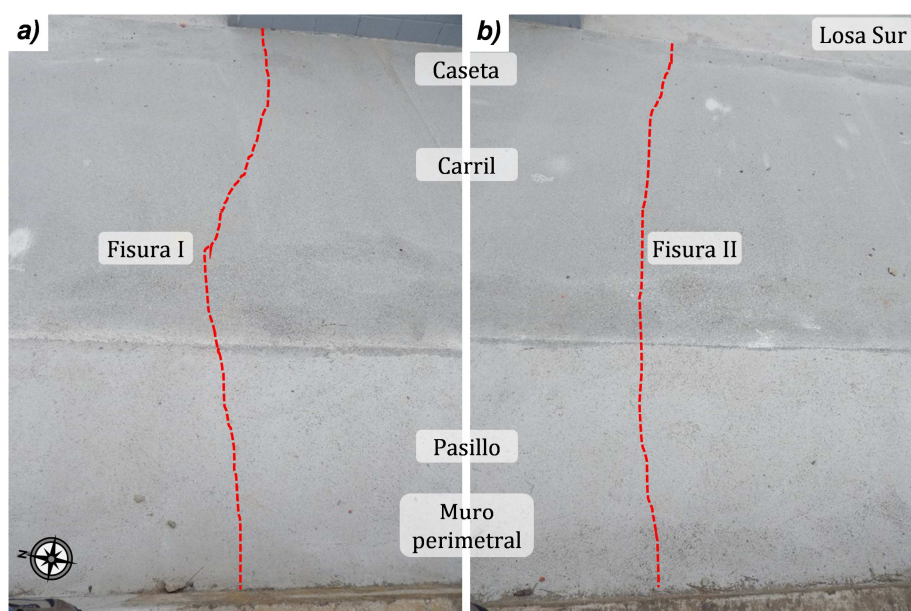


Figura A2. 88 – Fisuras en el pasillo lateral

En la figura A2.89 se muestra el inicio de las fisuras anteriores. La primera de ellas (figura A2.88a y figura A2.89a) se inicia en contacto con la caseta, a pocos centímetros del inicio de esta. A diferencia de esta primera, la segunda aparece a unos 50cm del final de la caseta, tal como muestra la figura A2.88b y figura A2.89b. Finalmente, en la figura A2.89c se muestra una vista general de la zona de aparición de las primeras fisuras.

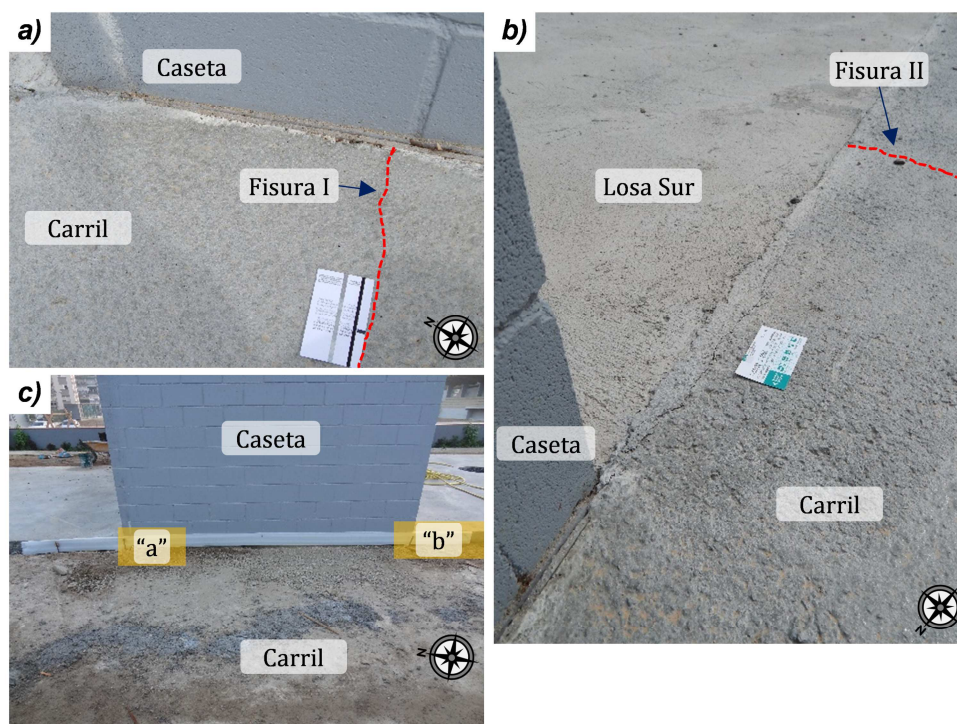


Figura A2. 89 – a) localización fisura I; b) localización fisura II; c) vista general

c) 180 días de edad (6 meses)

La última visita realizada a estas losas se realizó el día 16 de junio de 2014, cuando la losa tenía 6 meses de edad. En esta visita se observó un aumento considerable de la fisuración a lo largo del carril, y también en sentido transversal. Seguidamente se mostraran las imágenes hechas en dicha fecha y su descripción.

En la figura A2.90 se muestran dos zonas contiguas del pasillo, que corresponden a la zona de la caseta (figura A2.90a) y a una zona inmediatamente anterior a esta (figura A2.90b). La fisura transversal del carril de la figura A2.90a es la misma que se ha representado en las dos imágenes anteriores, mientras que la longitudinal es nueva. En la figura A2.90b se muestra la continuación de la fisura longitudinal y otra de transversal aparecida también para esa fecha. En todos los casos, las fisuras aparecidas en el carril continúan por el pasillo lateral.

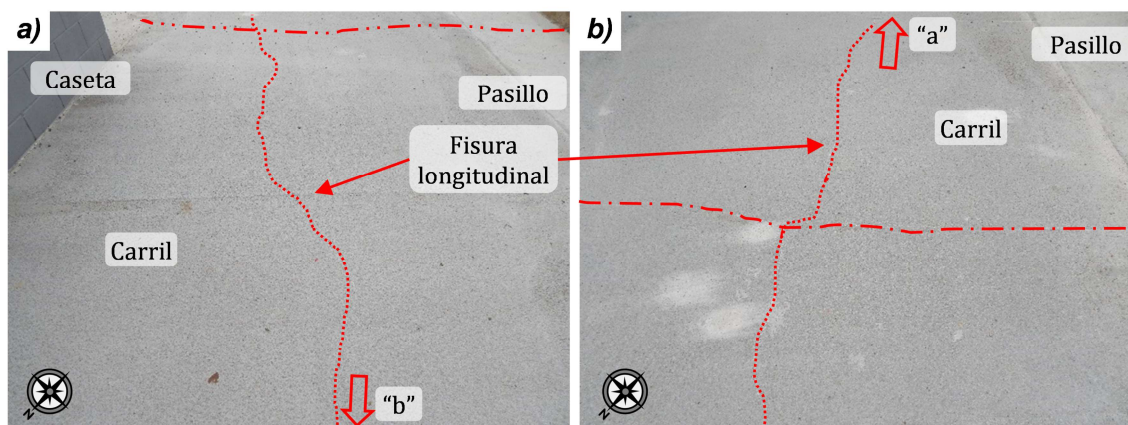


Figura A2. 90 – Fisuras aparecidas en el carril

### **A.2.5. Conclusiones**

Seguidamente se expondrán las conclusiones más importantes que se han extraído tanto de los resultados de los ensayos como de la visión organoléptica de los asistentes.

En primer lugar, los ensayos realizados para el hormigón muestran que la resistencia a los 28 días es muy cercana a la característica, por lo que el aporte del CaO y de las fibras es inferior a otros casos ya comentados. Otro dato importante es el de la pequeña variación entre los datos de la empresa y los de la UPC. Estas diferencias pueden deberse a la conservación de las probetas antes de proceder con los ensayos.

En cuanto al efecto del tiempo sobre este hormigón se observa como no se ha podido impedir la aparición de fisuras en el elemento. En primer lugar el material no podía considerarse completamente confinado, ya que en uno de sus extremos podía expandir libremente. Se ha observado también que la mayor parte de las fisuras de este carril son transversales y en algunos casos, con distancias parecidas entre sí, lo que explicaría una posible retracción del elemento. En los casos en que la fisura discurre a lo largo de todos los hormigones presentes, es probable que se deban a efectos mecánicos o de compatibilidad de movimiento entre ellos.

## A2.8. CARRILES DE LA NAVE INDUSTRIAL DE OCHOA EN CORNELLÀ DE LLOBREGAT

### A.2.1. Introducción

Los objetivos de este documento son dejar constancia de los resultados de la experiencia de la adición de fibras metálicas en el hormigón de retracción compensada (HRC) de los carriles interiores de la nave industrial de Ochoa y las observaciones realizadas en visitas posteriores. Para el primer objetivo se expondrá los ensayos de laboratorio que se llevaron a cabo. Igualmente se definirán las características de los materiales y su proceso de fabricación. Para el segundo objetivo se mostrarán las imágenes obtenidas y se describirá el estado de los elementos. Durante la ejecución de la losa intervinieron las siguientes personas.

### A.2.2. Objetivo 1: hormigonado de las losas

Las losas se ejecutaron el día 3 de abril de 2014 por la mañana. Estas losas se localizan dentro del recinto de la nave Ochoa que se encuentra situada en la Calle Silici número 83 de Cornellà de Llobregat.

#### a) Confección del hormigón

El hormigón fue suministrado por la empresa Betón Catalán S.A. La dosificación que se estableció para la realización es la que se describe en la tabla A2.31. Por tal de tener un patrón de referencia se realizó un hormigón de las mismas características sin fibras metálicas.

Características del hormigón	Ud.	Datos
Tipificación del hormigón	-	HM-20/20/B
Cemento (52,5R)	kg/m <sup>3</sup>	235
Óxido de calcio (CaO) - Link EVR	kg/m <sup>3</sup> (%spc)	15,6 (6,64)
Relación a/c	-	0,58
Tipo de curado	-	Líquido de curado
Armado	kg/m <sup>3</sup>	20 (Fibras metálicas)
Dimensiones	m	520x2,5 (1200 m <sup>2</sup> ) (grosor 0,09)

Tabla A2. 31 – Características del hormigón

#### b) Puesta en obra y acabado superficial

La ubicación de la losa dentro del recinto, así como las condiciones de contorno existentes determinaron el sistema de vertido más adecuado. En este caso fue en vertido directo mediante el canalón orientable (figura A2.91b). En la figura A2.91 se muestran imágenes del proceso de hormigonado y acabado de las losas.



*Figura A2. 91 – Puesta en obra y proceso de hormigonado*

En la figura A2.91a se observa el proceso de avance del hormigonado y la armadura que se dispuso. Puede verse que esta se encuentra prácticamente en contacto con el suelo. No se usaron separadores y simplemente, se alzaba la malla en el momento del hormigonado. En la figura A2.91b se observa el sistema de vertido mediante canalón orientable y la distribución del hormigón por parte de los operarios. En la figura A2.91c se muestra una vista general de la nave en la que se observa una losa ya hormigonada y la contigua preparada con la malla electrosoldada. El acabado superficial de la losa se realizó mediante un regleado mecánico (figura A2.91d) y posteriormente se realizó un acabado superficial en color verde mediante el espolvoreado del pigmento.

#### c) Ensayos realizados

En este apartado se describirán los ensayos que se llevaron a cabo, así como los resultados obtenidos para cada uno de ellos.

Para la ejecución del ensayo se recogió la muestra de los dos tipos de hormigón en la misma nave industrial. Este se transportó en estado fresco, con cubos de aproximadamente  $0,2\text{m}^3$ , desde la nave industrial hasta el Laboratorio de Materiales de la EPSEB. Lugar en el que se procedió a los pertinentes ensayos.

En la tabla A2.32 se muestran los ensayos que se llevaron a cabo para el hormigón vertido en obra con adición de cal (Link EVR), uno con fibras metálicas y otro sin fibras. Para el primer hormigón, el que contiene la adición de cal y fibras, se usará la denominación CF y para el de cal sin fibras, SF.

Tipo / Cantidad	Ensayo	Especificaciones de los ensayos
2 prismáticas (CF) (150 x 150 x 550 mm)	Térmico Expansión/ retracción	T, LVDT Condiciones de curado: sin curado Ensayo realizado en Laboratorio de Materiales EPSEB (1 semana)
2 prismáticas (SF) (150 x 150 x 550 mm)		T, LVDT Condiciones de curado: sin curado Ensayo realizado en Laboratorio de Materiales EPSEB (1 semana)

Tabla A2. 32 – Descripción de los ensayos realizados en el Laboratorio de Materiales de la EPSEB (UPC)

En total se realizaron 4 probetas prismáticas en las que se caracterizó la deformación (Expansión/retracción) así como la evolución de la temperatura. A continuación, se define el procedimiento del ensayo.

- **Ensayos de expansión**

El ensayo que se llevó a cabo fue el de deformación del hormigón desde las 2 horas hasta los siete días de edad. La figura A2.92 muestra los componentes que intervienen en este ensayo. El molde es metálico de dimensiones 150x150x550mm y en sus extremos dispone de dos placas donde se fijan cuatro varillas roscadas que quedarán embebidas en la probeta. Uno de estos extremos es de un material plástico que a su vez facilita el desplazamiento a través del molde, lo que permite medir la deformación mediante un LVDT que se encuentra en contacto directo.

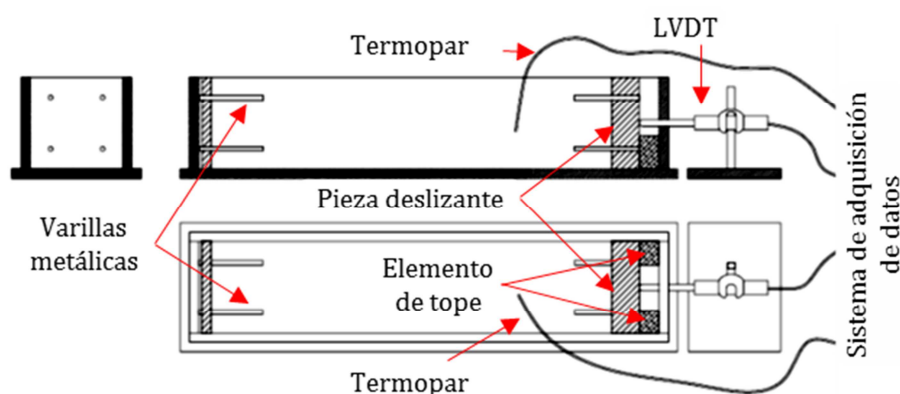


Figura A2. 92 – Diseño del molde del ensayo de expansión

En primer lugar se recubre el molde metálico con un plástico antiadherente (teflón) para evitar que exista algún tipo de fricción entre el hormigón y el metal que falsifique los resultados (figura A2.93). El proceso de este ensayo es relativamente simple de ejecutar y se describe de la siguiente manera. Se vierte el hormigón en dos capas compactándolas con 3 golpes en el suelo y, una vez lleno, se enrasa la superficie y se vuelve a compactar. Se coloca el molde en un lugar dónde no existan vibraciones o golpes que puedan alterar los datos y se adapta el LVDT a la pieza corredera de plástico. Finalmente se introduce el termopar en el hormigón para medir los datos de temperatura. A las 7 horas del inicio del moldeado se extraen los elementos de tope (figura A2.93) y se empieza a caracterizar la deformación del hormigón.

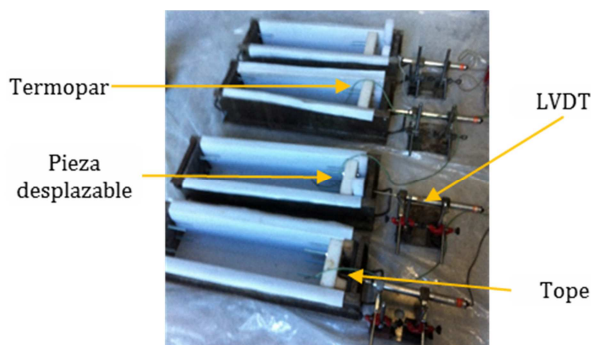


Figura A2. 93 – Elementos intervinientes en el ensayo de deformación

Los resultados obtenidos para esta experiencia se muestran en la figura A2.94 y corresponden a las probetas realizadas con ambos hormigones.

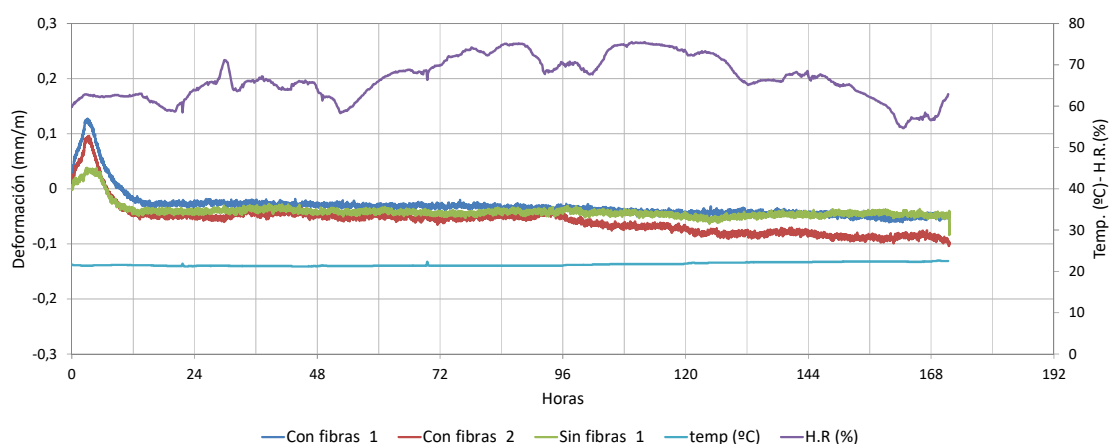


Figura A2. 94 – Resultado ensayo de deformación

En el gráfico anterior hay que destacar que no existe una gran diferencia entre el hormigón con fibras (CF) y sin fibras (SF). En las primeras 12 horas de medición se observa, en ambos hormigones, una leve expansión seguida de una retracción de menor valor.

#### d) Análisis de resultados

Mediante los resultados obtenidos a partir de la medición de la deformación en continuo de los hormigones en condiciones de no curado se observa que ambos se comportan igual. En esta condición de no curado puede argumentarse que la adición de cal no genera una expansión suficiente para contrarrestar la retracción del hormigón.

### A.2.3. Objetivo 2: visitas posteriores

El día 27 de julio, a los 115 días de edad (aproximadamente 4 meses), se realizó una visita de seguimiento del estado de las losas. En dicha visita se apreciaron zonas huecas bajo las losas (despegadas) así como fisuras transversales en algunas losas. También se pudo apreciar el fenómeno de la retracción entre losas contiguas.

Por otra parte se observó que, efectivamente, la armadura había quedado depositada en la base de la losa, tal como se ve durante el hormigonado. Como dato adicional, y mediante un análisis



organoléptico, se apreció un olor extraño en la masa del hormigón vertido en comparación con otros hormigones. Por tal de dejar constancia del estado de la losa, en la figura A2.95 se muestran algunas de las lesiones más comunes que se observaron.

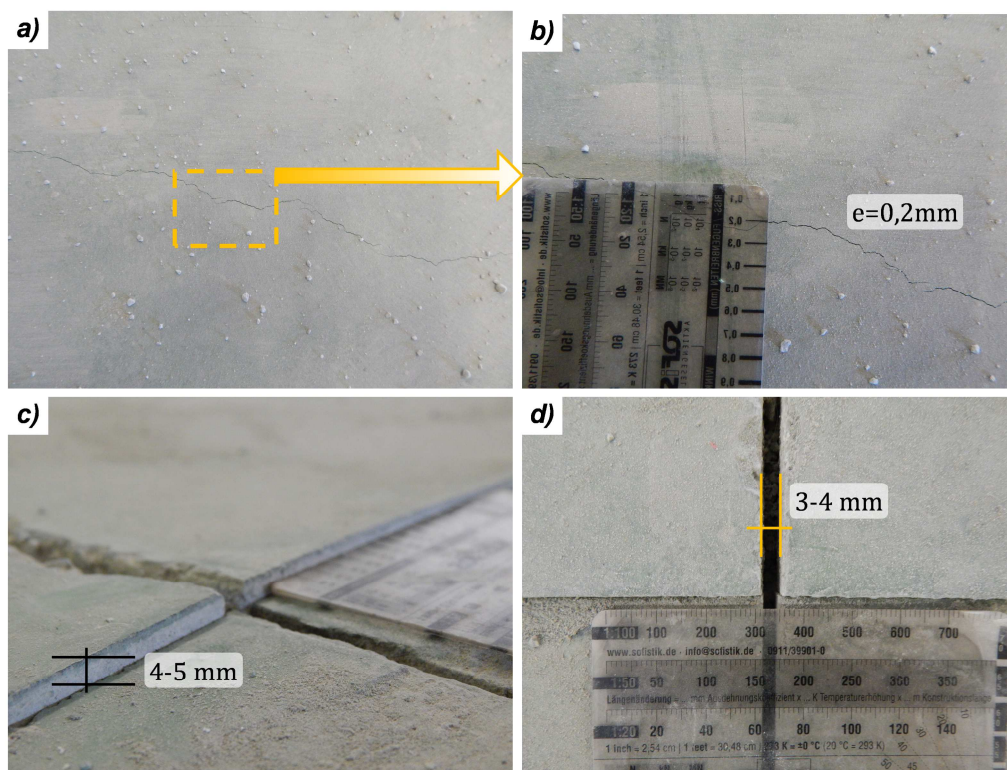


Figura A2. 95 – Lesiones; a) fisura de retracción; b) ampliación de la fisura en “a”; c) escalón entre losas contiguas; d) junta de corte transversal

En la figura A2.95a y A2.b se muestra una fisura de retracción observada en alguno de los elementos realizados. En la figura A2.95c se observa los desniveles aparecidos entre losas antiguas y nuevas, y en algunos casos también entre losas realizadas el mismo día. Finalmente, en la figura A2.95d se muestra la distancia entre la junta de corte trasversal de una de las losas realizadas.

Al observar las losas de manera general se observó la posible aparición del efecto del alabeo del perímetro de la losa (figura A2.96). Este fenómeno puede darse por un secado diferencial entre la superficie de la losa y la base. En otros casos se observó también un leve hinchamiento de la parte central de la losa, lo que podría deberse al efecto contrario de la figura A2.96, es decir, a un alabeo cóncavo.

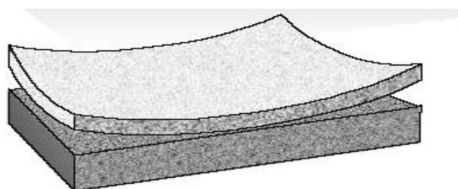


Figura A2. 96 – Alabeo de una losa de hormigón (convexo)

#### **A.2.4. Conclusiones**

Seguidamente se exponen las conclusiones más importantes que se han extraído del análisis de esta experiencia.

El ensayo de deformación en continuo del hormigón dejó patente que sin curado el efecto de la adición no se ve potenciado. En estos casos, aunque si se da una leve expansión inicial, no se da a un nivel suficiente para poder contrarrestar la retracción posterior del hormigón.

En el caso de las lesiones observadas en la visita posterior se observaron fisuras de retracción derivadas del no curado de las losas. La falta de curado durante el proceso de ejecución de las losas puede ser también la causa de la retracción de las distintas losas, así como de la excesiva abertura de las juntas de corte. En el caso del alabeo, el gradiente de humedad entre la superficie y la base de la losa debido al rápido secado de la superficie puede ser una de las causas de dicho fenómeno.

Como se ha comentado, la armadura electrosoldada se encontraba en la base de las losas, por lo que su presencia resulta infructuosa. Por otra parte, se ha podido observar que la cantidad de fibras añadidas no han permitido evitar la aparición de fisuras de retracción en los elementos.

## A2.9. LOSAS CON Y SIN CaO REALIZADAS EN EL RECINTO DE LES VINAGRERIES

### A.2.1. Introducción

Los objetivos de este documento son: la ejecución de una losa con hormigón de retracción compensada (HRC) en Les Vinagrieres del Penedès (Vilafranca del Penedès), la ejecución de una losa con hormigón convencional para usarla como patrón de comparación y las visitas realizadas con posterioridad.

Para los dos primeros objetivos (losas) se expondrá el proceso de hormigonado, así como los ensayos de laboratorio que se llevaron a cabo. Igualmente se definirán las características de los materiales y su proceso de fabricación. Durante la experiencia intervinieron las siguientes personas.

Para el segundo objetivo (visitas posteriores) se mostraran las imágenes realizadas y se describirá el estado de ambos elementos. Finalmente, se expondrán las conclusiones obtenidas, tanto para los ensayos, como para las observaciones posteriores.

### A.2.2. Objetivo 1: hormigonado de losas

La losa se realizó el día 29 de abril de 2014 durante la mañana. Esta se localiza dentro del recinto de Les Vinagrieres del Penedès. Concretamente, esta se localiza en lo que actualmente es la entrada al recinto, quedando fuera de la zona vallada. En la figura A2.97 se muestra la localización de la losa.

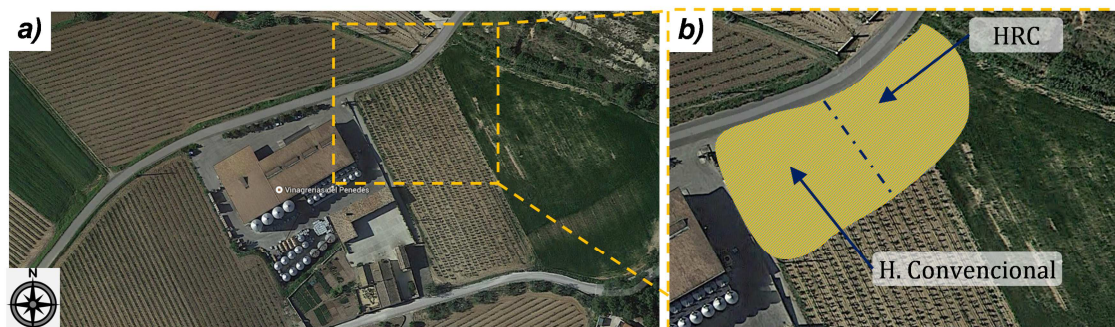


Figura A2. 97 – Localización de las losas dentro del recinto; a) imagen general; b) localización de cada losa

En la primera imagen (figura A2.97a) se muestra una vista aérea del recinto de la empresa y se enmarca la zona donde se localizan ambas las losas. En la figura A2.97b se marca la localización exacta de estas en contacto con la carretera y a continuación de la losa ya existente del recinto. En esta imagen se diferencia también que parte de la losa corresponde a cada tipo de hormigón, centrándonos en este apartado en la losa con HRC. Confección del hormigón

El hormigón fue suministrado por la empresa Uniland. La dosificación que se estableció para la realización de la losa con HRC se describe a continuación en la tabla A2.33.

Características del hormigón	Ud.	Datos del H. con cal (HRC)	Datos del H. Convencional
Tipificación del hormigón	-	HM-20/20/B	HM-20/20/B
Cemento	kg/m <sup>3</sup>	245 (42,5R)	245 (42,5R)
Óxido de calcio (CaO) - Link EVR	kg/m <sup>3</sup> (%spc)	25 (10,2)	-
Relación a/c	-	0,65 (modificada a 0,75)	0,65 (modificada a 0,75)
Tipo de curado	-	Sin curado	Sin curado
Armado	kg/m <sup>3</sup>	Mallazo	Mallazo
Dimensiones	m <sup>2</sup>	900	850

Tabla A2. 33 – Características del hormigón (HRC)

En ambas losas, y según los datos facilitados por Calés de Pachs, la mitad de ambos pavimentos se realizó con material ya caducado o con más de 1h de amasado desde la salida de planta. Además, se añadió agua para poder hacer el regleado y el fratasado del hormigón.

a) Puesta en obra y acabado superficial

La ubicación de la losa dentro del recinto, así como las condiciones de contorno existentes determinaron el sistema de vertido más adecuado. En este caso fue un vertido directo mediante canalón orientable, tal como se puede ver en la figura A2.98.

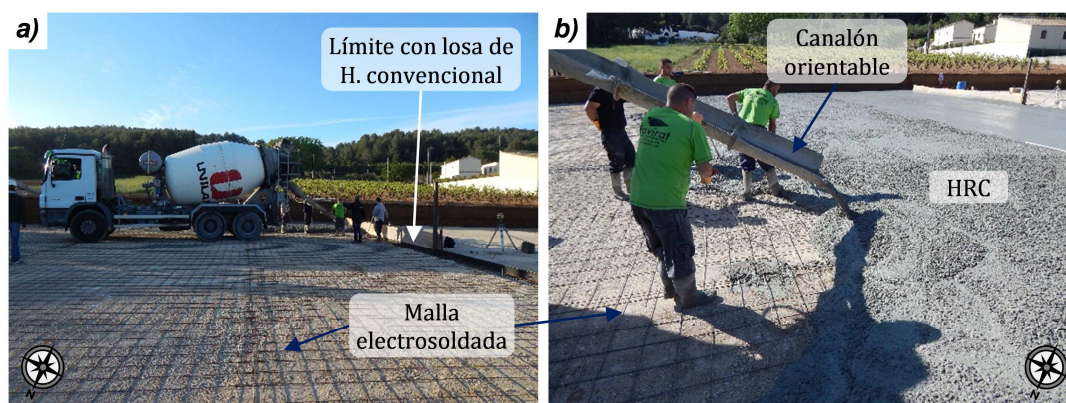


Figura A2. 98 – a) visión general del sistema de vertido; b) hormigonado mediante canalón

En la figura A2.98a se muestra una visión general del proceso de hormigonado de la losa y en la figura A2.98b se observa el proceso de vertido del HRC. En la figura A2.99 se muestra el vertido del hormigón. Durante el proceso los operarios vieron conveniente añadir agua para mejorar la trabajabilidad. Este aumento de agua en el hormigón se contabilizó como una relación a/c de 0,10 de más, pasando a una relación a/c final de 0,75. En la figura A2.99 se muestra el hormigón modificado, primeramente se muestra una vista general del vertido (figura A2.99a) y en la figura A2.99b se muestra un primer plano de la mezcla vertida

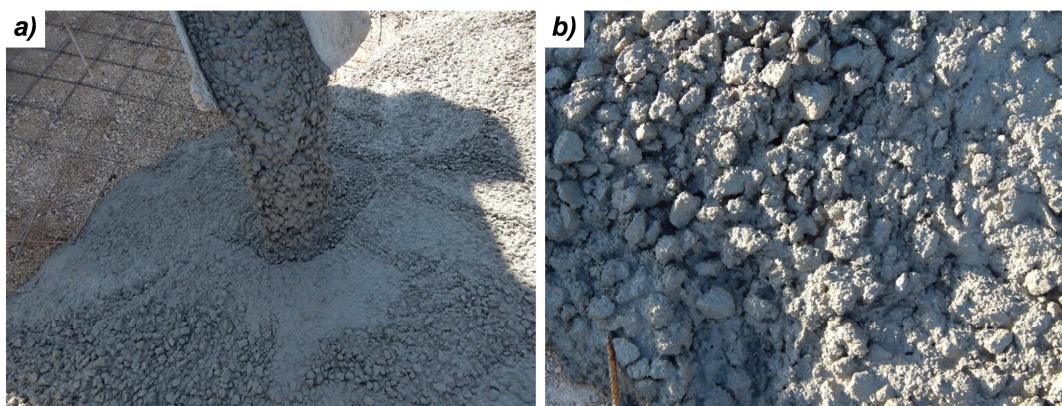


Figura A2. 99 – a) vertido del HRC; b) detalle de la mezcla vertida

Finalmente, se realizó el acabado del hormigón mediante un regleado manual, para posteriormente pasar el helicóptero. El proceso de nivelación del hormigón y el inicio del regleado es el que se muestra en la figura A2.100.

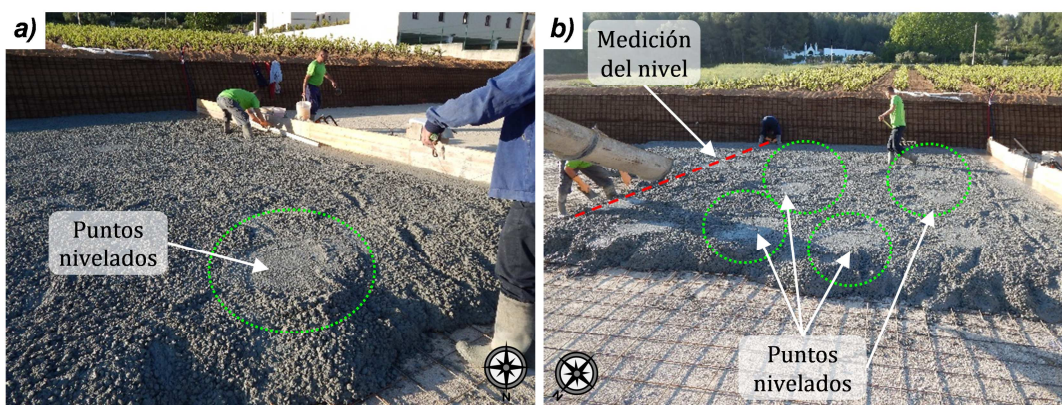


Figura A2. 100 – a) inicio del regleado; b) puntos de hormigón nivelados

En las dos imágenes de la figura A2.100 se muestran dos etapas del nivelado y regleado manual que se realizó al hormigón. En la figura A2.100a se muestra la zona de la losa que limitará con la del hormigón convencional, y puede observarse al operario nivelando la zona en contacto con el encofrado. En la figura A2.100b se muestra como se realizó la medición del nivel de la losa y los puntos de referencia marcados en la superficie del hormigón.

Hay que mencionar que el primer camión vertido el día 29 de abril no contenía CaO. Esto se planteó de este modo para tener los ensayos de resistencia a compresión del hormigón convencional a las 24 horas, ya que el día 1 de Mayo era festivo.

#### b) Estado de la base de la losa

El aspecto final de la base de la losa a hormigonar es la que se muestra en la figura A2.101a. La base de la losa está formada por arena y gravilla compactadas. En la figura A2.101b se muestra el sistema de contención de tierras del perímetro sudeste de la losa. Este consta de una malla geotextil aguantada mediante una malla electrosoldada fijada al talud.

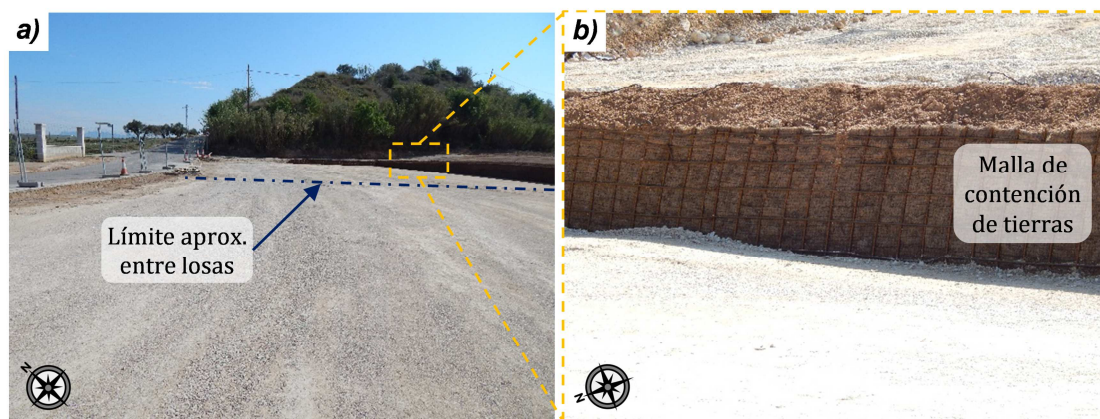


Figura A2. 101 – a) base de la losa; b) sistema de contención de tierras en la zona sudeste

c) Ensayos realizados

En relación con el comportamiento del HRC que se ha definido en el apartado anterior, es necesario también llevar a cabo ensayos de laboratorio para poder dar explicación al comportamiento del material. En este apartado se describirán los ensayos que se llevaron a cabo, así como los resultados obtenidos para cada uno de ellos. En la tabla A2.34 se muestran los ensayos que se realizaron para el volumen total del hormigón vertido.

Cantidad / Tipo de hormigón	Ensayo	Ensayos para Losa HRC	Ensayos para H. Convencional
15 cilíndricas (150 x 300 mm)		Rc (24h, 7d, 28d, 180d) 3 reserva	Rc (24h (P8), 48h, 7d, 28d, 180d) 3 reserva
4 testigos (100 x h. variable)	Ensayos a compresión	Rc 28 días 1 reserva	Rc 28 días 1 reserva
4 testigos (100 x h. variable)		Rc 180 días 1 reserva	Rc 180 días 1 reserva
2 prismáticas (150x150x550mm)	Ensayos flexotracción	Rf 28 días 1 ensayo	Rf 28 días 2 ensayos
2 prismáticas (150x150x550mm)		T, LVDT	T, LVDT
	Térmico	Condiciones de curado: tapada con plástico	Condiciones de curado: tapada con plástico
	Expansión/retracción		
3 cilíndricas (150 x 300 mm)	Expansión/retracción en cámara húmeda	Abril-Octubre 2014	Abril-Octubre 2014

Tabla A2. 34 – Descripción de los ensayos realizados

- **Ensayos mecánicos**

Las probetas necesarias para la realización de los ensayos a compresión se moldearon según se describe en la norma UNE-EN 12390-2 (AENOR, 2009a). Las probetas se dejaron en obra y se transportaron al siguiente día hábil (2 de mayo) al laboratorio de la Escuela de Caminos para proceder con los ensayos. Hay que mencionar que tres de las probetas de la losa con HRC y tres probetas moldeadas con el hormigón convencional se transportaron el primer día para poder ensayarlas a las 24 horas de edad. Las probetas se clasificaron y se conservaron en la cámara húmeda hasta la fecha de ensayo correspondiente.

Por otra parte, los testigos extraídos para el ensayo de resistencia a los 28 días presentaban dimensiones distintas por lo que hubo que ajustar los resultados para que pudieran ser comparables con las probetas normalizadas. Para este caso, y con la finalidad de hacer los resultados comparables, se aplicó la norma británica BS EN 12504-1:2009, en la cual, mediante la

ecuación [1] se obtiene la Fuerza asimilada para una probeta normalizada. En la tabla A2.35 se muestran los resultados obtenidos.

$$f_c = \frac{2}{1,5 + \frac{1}{\lambda}} f_{\lambda} \quad [1]$$

Hormigón	Nº testigo	Diámetro medio (mm)	Altura media (mm)	$\lambda$	F $\lambda$ (kN)	Fc (kN)	Área (mm <sup>2</sup> )	Rc (N/mm <sup>2</sup> )
T19	5	99,45	193,0	1,941	149,5	148,4	7.767,8	19,10
	6	99,45	153,6	1,544	148,9	138,7	7.767,8	17,85
	7	99,26	159,9	1,611	137,1	129,3	7.738,2	16,71
T20	7	99,45	158,3	1,592	200,6	188,6	7.767,8	24,28
	8	99,33	166,6	1,678	199,0	189,9	7.749,1	24,50
	9	95,85	160,2	1,671	193,5	184,5	7.215,6	25,56

Tabla A2. 35 – Resultados ensayo compresión de testigos de ambos hormigones

Los resultados obtenidos para los dos hormigones son los que se muestran en la figura A2.102. El ensayo se llevó a cabo según se describe en la norma UNE-EN 12390-3 (AENOR, 2009b), usándose el pulido como método de preparación de las superficies de las probetas.

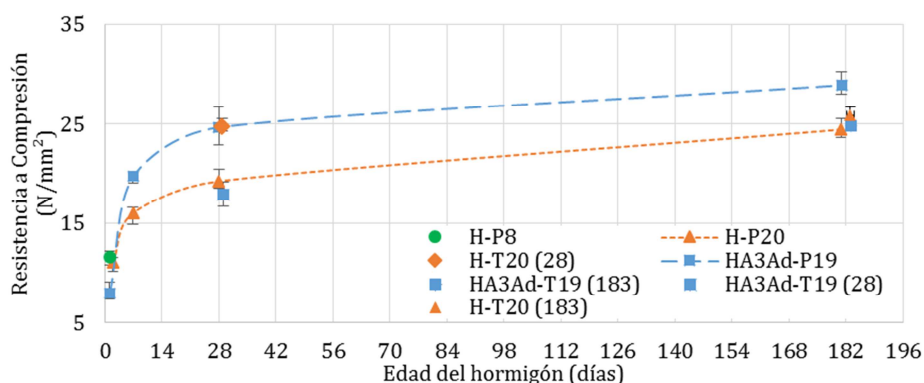


Figura A2. 102 – Evolución de la resistencia a compresión con el tiempo

Las nomenclaturas que se muestran en el gráfico se definen como: H-P8: probeta normalizada de hormigón convencional vertido el día 29 de abril para el ensayo a 24h; H-P20: probeta normalizada de hormigón convencional vertido el día 30 de abril; H-T20: testigo de hormigón convencional; HA3Ad-P19: probeta de HRC y, finalmente, HA3Ad-T19: testigo de HRC.

El gráfico muestra la evolución de la resistencia con el tiempo de probetas de hormigón convencional y de HRC conservadas en cámara húmeda hasta la fecha del ensayo. Asimismo también muestra los resultados obtenidos de los testigos extraídos y ensayados a los 29 días de edad. Ambas curvas de tendencia muestran un aumento de la resistencia a compresión del HRC con respecto al convencional. A los 7 días de edad la diferencia entre ambos es de 3,8MPa, mientras que a los 28 días la diferencia aumenta a 5,5MPa. A partir de estos resultados, y teniendo en cuenta la dispersión que tienen, puede afirmarse que el HRC obtiene valores de resistencia mayores a los de un hormigón convencional de las mismas características.

Por otra parte, los resultados de los testigos extraídos de las losas a los 28 días de edad muestran unos valores muy distintos a los esperados. Por una parte, los testigos extraídos de la losa

con HRC (T19) presentan una disminución considerable de la resistencia a los 28 días en comparación con los resultados de las probetas normalizadas. La diferencia entre ambos hormigones fue el curado recibido una vez terminado el elemento. Por un lado a la losa no se le realizó ningún tipo de curado mientras que las probetas normalizadas se introdujeron en la cámara húmeda. Otra variable a considerar es el hormigón ensayado, ya que fue requerido el volumen de distintas cubas para poder realizar la losa.

Los resultados del ensayo de flexotracción, a los 28 días de edad, de las probetas prismáticas se presentan en la figura A2.103. Los resultados muestran que el hormigón con adición de cal obtiene un valor inferior al del hormigón sin adición para la misma edad. Hay que tener en cuenta que la cantidad de probetas ensayadas es de una y de dos para el hormigón con cal y para el convencional respectivamente, por lo que los resultados mostrados no corresponden al número mínimo estadístico para obtener un valor más fiable. La resistencia a flexotracción a los 28 días es aproximadamente un 25% de la resistencia a compresión.

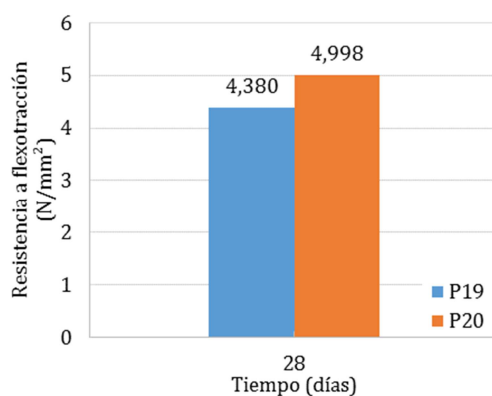


Figura A2. 103 – Resultados de resistencia a flexotracción de probetas prismáticas (28 días)

Por otro lado, hay que tener en cuenta no se dispone de trazabilidad entre el hormigón correspondiente a los testigos y a las probetas moldeadas, esto es, si son de la misma amasada o bien de diferente.

- **Ensayos de deformación**

Probetas prismáticas

Los resultados de deformación obtenidos para probetas prismáticas de 150x150x600mm son los que se muestran en la figura A2.104 y en la figura A2.105. En ellas se muestra la deformación de la probeta realizada con el hormigón con adición de cal y con el hormigón convencional respectivamente.



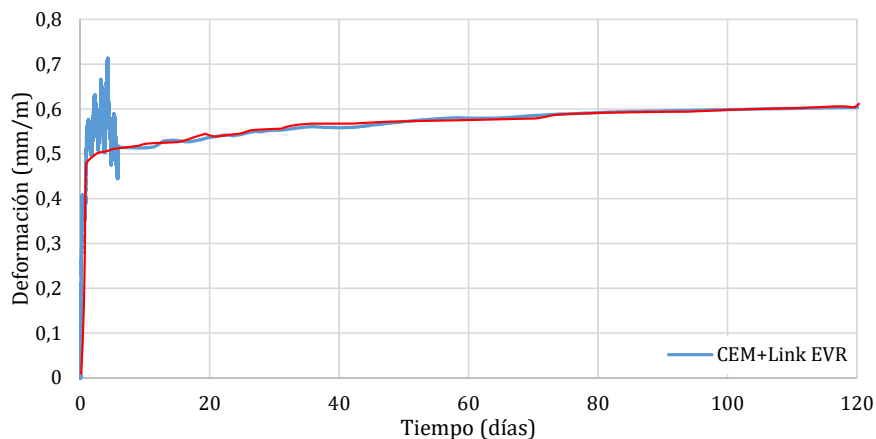


Figura A2. 104 – Probeta prismática de hormigón con cal (P19)

Los resultados de expansión del hormigón con cal (figura A2.104) muestran que 85% de la expansión se da en las primeras 24 horas. A partir de dicho instante la velocidad de deformación del material disminuye, ya que desde dicho instante y hasta los 120 días la expansión representa un 15% de la expansión total. Hay que observar que las primeras 24 horas de medición se realizaron en obra cubriendo el hormigón con un plástico para mejorar su curado. A partir de dicho momento se conservaron en cámara climática.

Para el caso de la deformación del hormigón convencional se siguió el mismo procedimiento de ensayo que para las anteriores. Los resultados que se obtuvieron para este hormigón son los que se muestran en la figura A2.105.

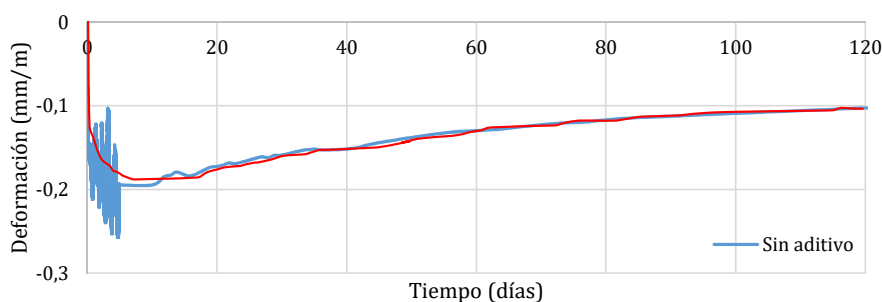


Figura A2. 105 – Probeta prismática de hormigón convencional (P20)

En la figura A2.105 se observa que dicho material sufre una retracción muy marcada durante las primeras 24 horas. Esta llega a un valor máximo de 0,2mm/m aproximadamente en un período de 10 días. Cámara climática a partir de dicho momento expande ligeramente al igual que ocurría para el hormigón con cal.

Al comparar ambos resultados se observa que la adición de cal mejora las propiedades expansivas del material. De igual manera un curado óptimo favorece la generación de dicha expansión ya que permite que la hidratación de los componentes del cemento y de la cal se hidraten en mayor medida.

Por otra parte, el efecto expansivo que se observa en ambas probetas puede deberse al sistema de almacenamiento usado. Este se basó en la colocación de dos piezas de madera de 1cm de canto a 10cm de cada extremo, lo que pudo provocar un fenómeno de flexión debido al peso propio

del material. En este caso dicha expansión no se debe al material sino a un proceso derivado del almacenamiento de las probetas.

#### Probetas cilíndricas

El sistema de medición de deformaciones en probetas cilíndricas ha permitido determinar el comportamiento de estas aunque dicho sistema no resulta del todo fiable. El sistema de medición se basó en la colocación de dos puntos metálicos de medición en posición diametral (dos en cada lado). A continuación, se mostraran los resultados para las probetas realizadas con hormigón con cal y con el hormigón convencional. En cada figura se muestra el porcentaje de expansión en función del tiempo.

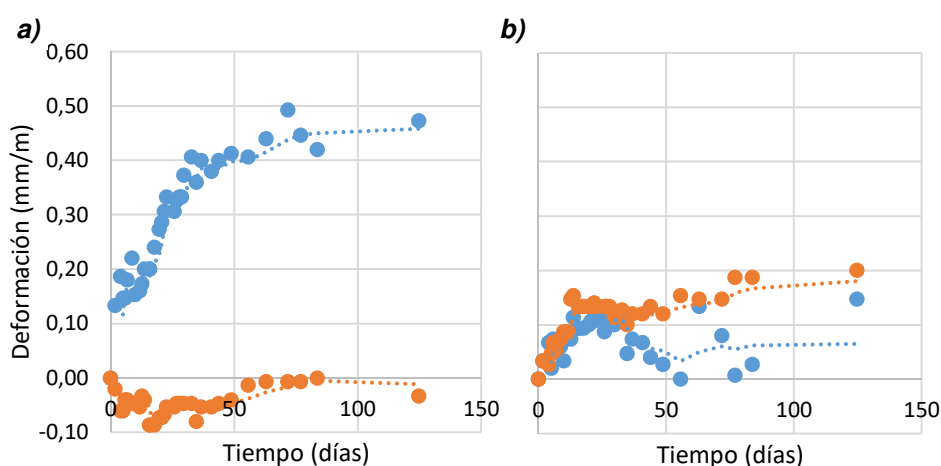


Figura A2. 106 - Deformación probetas cilíndricas de hormigón cal (19); a) probeta 1; b) probeta

2

En la figura A2.106 se observa, en primer lugar, que el hormigón que contiene cal genera expansiones en la mayoría de los casos. Al observar los gráficos de manera independiente se ve que para la misma probeta los resultados obtenidos en mediciones diametralmente opuestas pueden ser muy distintos. Este fenómeno puede deberse al lugar en que se colocan los puntos de medición, es decir, al material sobre el que se fijan los puntos (árido, pasta, etc.).

Por otra parte, las diferencias dentro de la misma probeta muestran que esta deforma de manera distinta en lados puestos (figura A2.106a). Esto puede deberse a que el hormigón este mal mezclado, a la colocación de los elementos de medición o a condiciones de curado distintas en cada lado de la probeta, aunque esta última queda descartada por haberse seguido el mismo proceso para todos los elementos.

La comparación entre la figura A2.106a y figura A2.106b muestra que la deformación alcanzada para la misma edad no alcanza los mismos valores. Se puede observar que una probeta alcanza una expansión de 0,6mm/m mientras que la otra únicamente llega a los 0,2mm/m, habiendo sido curadas y medidas de la misma forma.

Los ensayos realizados para el hormigón sin cal son los que se muestran en la figura A2.107. En cada uno de los gráficos se ha representado la deformación de cada uno de los lados de medición en función del tiempo.

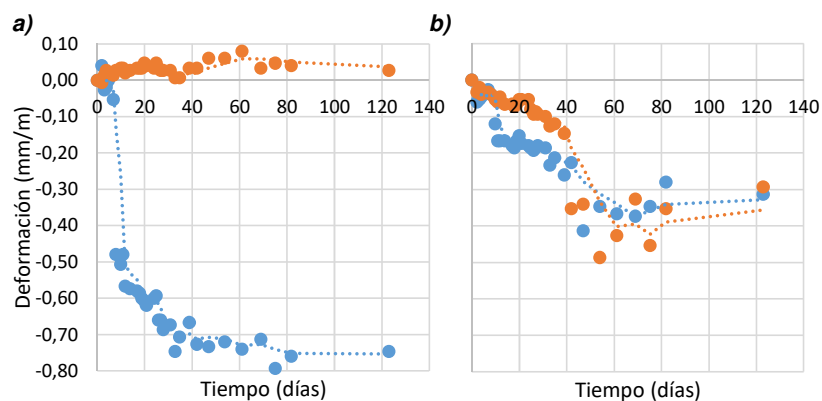


Figura A2.107 – Deformación probetas cilíndricas de hormigón convencional (20); a) probeta 1;  
b) probeta 2

Los gráficos que se muestran en la figura A2.107 muestran, efectivamente, que el hormigón sin cal se retrae con el tiempo. Al igual que ocurría para las probetas anteriores, los resultados obtenidos no alcanzan valores similares, sino que para cada probeta la retracción máxima varía. Los valores máximos obtenidos son de  $-0,8\text{mm/m}$  y de  $0,45\text{mm/m}$  para cada una de las probetas, lo que representa una variación aproximada del 50% del valor.

La variación entre los resultados obtenidos puede deberse igualmente a lo ya expuesto para la figura A2.106, ya que el sistema de medición usado es el mismo en ambos casos.

### A.2.3. Objetivo 2: visitas posteriores

#### a) Estado de las losas

En visitas posteriores realizadas los días 27 de mayo y 27 de julio de 2014 no se observaron patologías en ninguna de las losas. La edad de la losa en dichas visitas es la que se muestra en la tabla A2.36.

Visita	Edad de la losa	Motivo visita
27.05.2014	28 días	Extracción testigos
27.07.2014	89 días (3 meses)	Visita técnica

Tabla A2.36 – Edades de la losa en las visitas realizadas

#### b) 28 días de edad

La primera visita realizada a la losa se realizó el día 27 de mayo para proceder con la extracción de testigos de hormigón de cada una de las losas. En dicha visita no se observaron fisuras ni desperfectos en ninguna de las losas ejecutadas. Por otra parte si se pudo observar el efecto de la retracción para cada uno de los hormigones usados. En la figura A2.108a se muestra una vista general de la división de las losas que corresponde con la valla de acceso al recinto. Por otro lado, la figura A2.108b corresponde al detalle de la junta entre ambos hormigones y el elemento metálico donde se sitúa el raíl de la puerta de entrada.

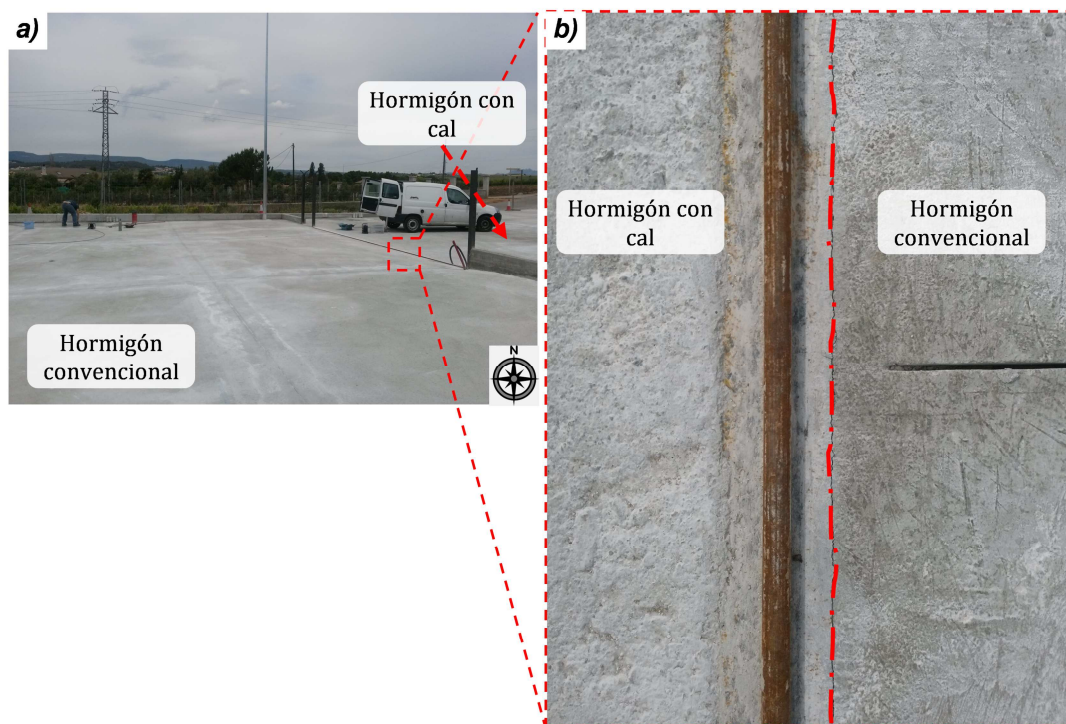


Figura A2. 108 – a) vista general de la división entre las losas; b) detalle de la junta entre los hormigones y el elemento metálico de la puerta de acceso

En la figura A2.108a pueden observarse las juntas de retracción realizadas a la losa de hormigón convencional. Asimismo se señala la pieza metálica usada como separación superficial de cada uno de los hormigones. En la figura A2.108b se muestra el detalle de la unión entre ambos hormigones y un elemento metálico. De igual manera, en dicha figura se puede diferenciar las losas, ya que la que está realizada con hormigón convencional presenta una junta de retracción muy cercana al elemento metálico.

La característica más relevante que se pretende mostrar en la figura A2.108b es la aparición del fenómeno de la retracción en la losa realizada con hormigón convencional, que se traduce en una pequeña separación entre el elemento metálico y el hormigón. Por otro lado, el hormigón con adición de cal no presenta dicha separación entre ambos elementos. Puede decirse que a los 28 días las losas se encuentran en perfecto estado de mantenimiento.

#### c) 89 días de edad (3 meses)

La visita técnica realizada a los 3 meses de edad del hormigón determinó que el hormigón de ambas losas no había sufrido daños importantes. De manera general se observaron pequeñas fisuras en la losa de hormigón convencional, mientras que en la losa con adición de cal no se observó ningún desperfecto. A continuación se muestra una vista general de la losa de hormigón con adición de cal (figura A2.109) y a continuación imágenes de las fisuras encontradas (figura A2.110).



Figura A2.109 - Vista general de la losa con adición de cal a los 3 meses de edad

En la figura A2.109 se observa que la losa realizada con hormigón con cal presenta marcas de neumáticos en toda su superficie. Esto es debido a que dicha losa es el acceso principal de los vehículos al recinto de la empresa, por lo que todo el tráfico pasa obligatoriamente por ella. El estado de esta losa a los 3 meses de edad es muy bueno.

En el caso de la losa de hormigón convencional si se observaron algunas fisuras derivadas del secado y de fisuras aparecidas con posterioridad. Ambas fisuras se muestran en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.10.**

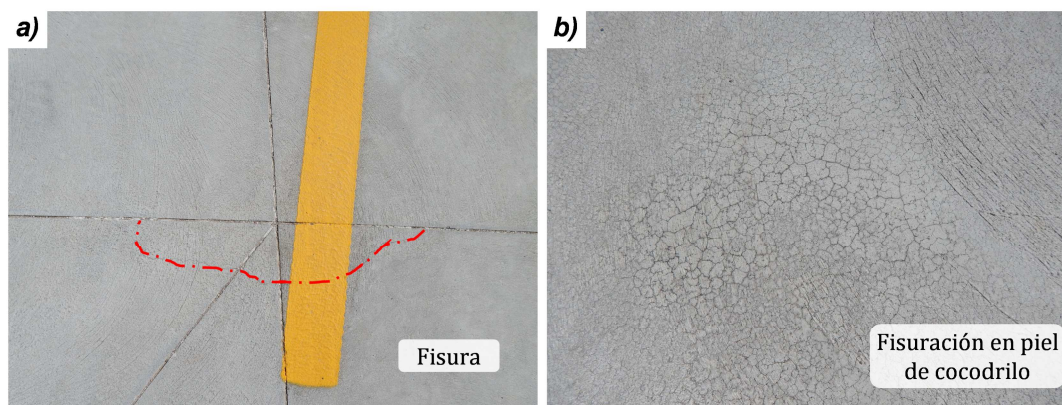


Figura A2.110 - Losa de hormigón convencional; a) fisuración en las esquinas de las juntas; b) fisuración en piel de cocodrilo

En la figura A2.110a se muestra la fisura aparecida en la intersección de juntas de retracción de la losa. Se observa que dicha fisura abarca 3 divisiones de losa por la zona dónde más juntas existen. Dicha fisura es común en elementos de hormigón y en este caso puede deberse a puntos débiles en la base del hormigón o al hecho de la existencia de cuatro juntas de retracción muy cercanas. Otras causas posibles son la existencia de cargas repetidas o a una transferencia de carga deficiente.

La figura A2.110b muestra las fisuras en con geometría de piel de cocodrilo características del proceso de secado del hormigón. Dichas fisuras afectan principalmente a la superficie del hormigón por lo que no representan un daño estructural para el elemento.

#### **A.2.4. Conclusiones**

Las conclusiones que pueden extraerse de la ejecución de ambas losas y de su análisis posterior se muestran a continuación.

En primer lugar hay que mencionar que existen diferencias entre los resultados de resistencia a compresión realizados para las probetas y para los testigos. Se ha podido observar que los resultados no concuerdan entre sí y que a los 28 días las tendencias están invertidas, es decir, la probeta de mayor resistencia es la que obtiene menor resistencia obtiene en los testigos. Como dato característico se ha podido observar que el hormigón con cal se estabiliza a los 28 días (ensayo en testigos), mientras que el hormigón convencional sigue aumentando de resistencia, superando al otro hormigón a los 181 días.

Por otra parte, los ensayos de deformación llevados a cabo han determinado el sistema de medición más idóneo para este material. En primer lugar se ha podido observar que la medición de la deformación es más efectiva en el molde. De esta manera es posible medir las primeras 24 horas de comportamiento del hormigón. El sistema mediante puntos de medición colocados de manera diametral en cada probeta ha demostrado que no consigue obtener resultados acordes para todas las muestras.

Los resultados de deformación han permitido observar que efectivamente existe un efecto expansivo en el hormigón con cal en contraposición al convencional. Así, tanto en las probetas prismáticas como en las cilíndricas se observaba la tendencia a expandir o retraer. Los valores que se cree que pueden tomarse como más acordes a la realidad son los obtenidos mediante las probetas prismáticas en los primeros 5 días de medición, ya que estos se midieron en continuo mediante LVDTs. Los días posteriores de medición se realizaron mediante puntos, por lo que, como ya se ha visto, el valor depende de la correcta colocación del punto de medición. En el caso de las deformaciones es necesario establecer un sistema que permita una medición en continuo del comportamiento del material.

Finalmente, el estado de la losa a los 3 meses de edad podría catalogarse como muy bueno debido a la falta de fisuración característica del fenómeno de la retracción. Aunque sí que se ha dado una fisuración superficial en la losa de hormigón sin cal y en un punto de intersección de distintas juntas de retracción. En el caso de la retracción observada el fenómeno podría categorizarse como estético ya que la profundidad de dichas fisuras no conlleva daños importantes en el elemento. Por otra parte, la fisura de las juntas puede derivarse de las cargas que actúan sobre ella, de problemas en la parte inferior de la losa o de la transferencia de cargas.

## A2.10. LOSA DE ZANJA CON CaO REALIZADA EN LA CALLE LLUIS BORRASÀ (BARCELONA)

### A.2.1. Introducción

Los objetivos de este documento son la experiencia de ejecución de una zanja con hormigón de retracción compensada (HRC) en la calle peatonal contigua a la calle Lluís Borrassà y la evolución de la zanja con el tiempo. Para el primer objetivo se expondrá el proceso de hormigonado, así como los ensayos de laboratorio que se llevaron a cabo, si existen. Igualmente se definirán las características de los materiales y su proceso de fabricación. Para el segundo objetivo se mostrarán las imágenes obtenidas y se describirá el estado del elemento.

Esta experiencia se enmarca dentro de un convenio de colaboración entre la UPC y Gas Natural sobre rellenos de zanjas. Se planteó a la empresa la posibilidad de realizar unas pruebas piloto para evaluar, *in situ*, el comportamiento a largo plazo de la nueva solución de acabado de la zanja que incorpora, en su capa superior, un hormigón con expansividad controlada mediante CaO.

### A.2.2. Objetivo 1: ejecución de la zanja

La losa se ejecutó el día 30 de setiembre de 2014. La obra seleccionada se ubica en una zona peatonal paralela a la calle Lluís Borrassà en el distrito de Sant Martí de Barcelona. Se trata de una zanja de 64 m de longitud con un ancho de 60 cm. En la figura A2.111 se muestra la localización en plano y un detalle de la zona peatonal seleccionada para la prueba.

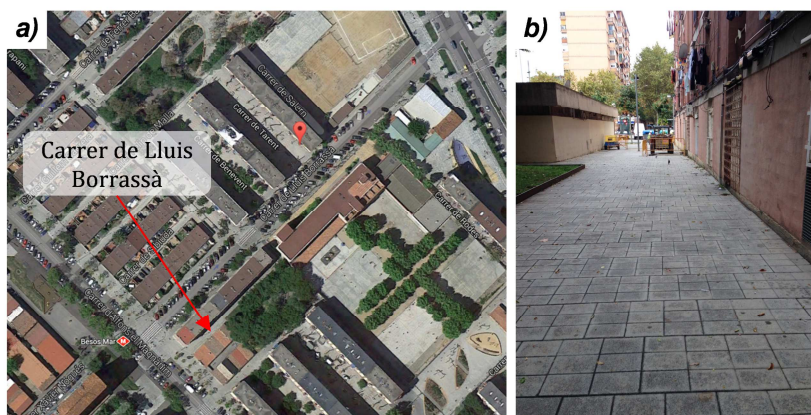


Figura A2. 111 - a) localización de la zanja; b) zona a excavar

Antes de la prueba se realizaron dos visitas a la obra para reconocer la localización y los condicionantes de la misma. La primera visita, por parte de la UPC, tuvo lugar el 17 de septiembre de 2014, después de que se realizara una cata para identificar el tipo sustrato en la zona. En la figura A2.112 se muestran detalles de la cata y del material extraído.

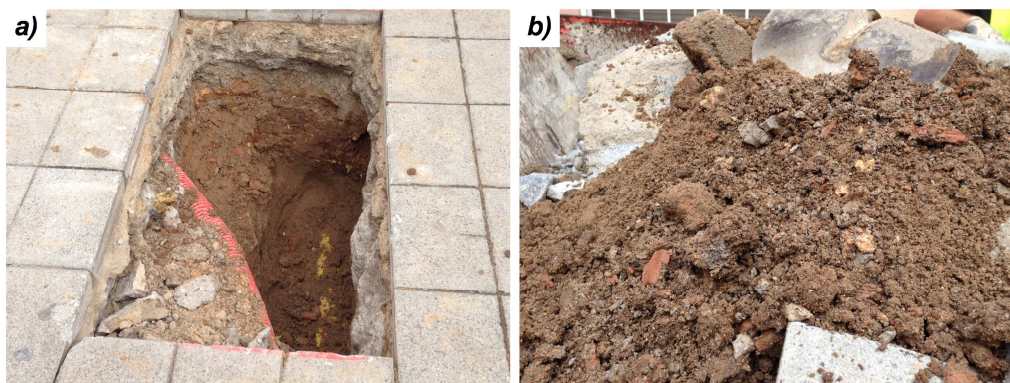


Figura A2. 112 – a) cata realizada en la zona peatonal de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**; b) detalle del sustrato

En la figura A2.112b se observa que la granulometría del material extraído es muy variable, presentando incluso cascotes de ladrillos con aristas vivas. Por este motivo, se consideró adecuado no reaprovechar las tierras para el relleno de la zanja. Se propuso usar material nuevo de aportación y dar un acabado con una losa superior de hormigón ligeramente expansivo.

Tras la excavación de los 64 m de longitud de la zanja (figura A2.113), el día 23 de septiembre se visitó la obra por segunda vez y se confirmó dicha decisión. Por este motivo, se decidió emplear material seleccionado (sauló) para el relleno, sobre el cuál se previó una capa de 15 cm de hormigón expansivo con una resistencia de 20 MPa. El acabado de la zanja se realizaría con las baldosas de la propia zona peatonal salvo en los últimos 10 m de zanja, en los que se llevaría la capa de hormigón hasta el nivel de calle con el objetivo de realizar un seguimiento visual del comportamiento y del aspecto del hormigón.

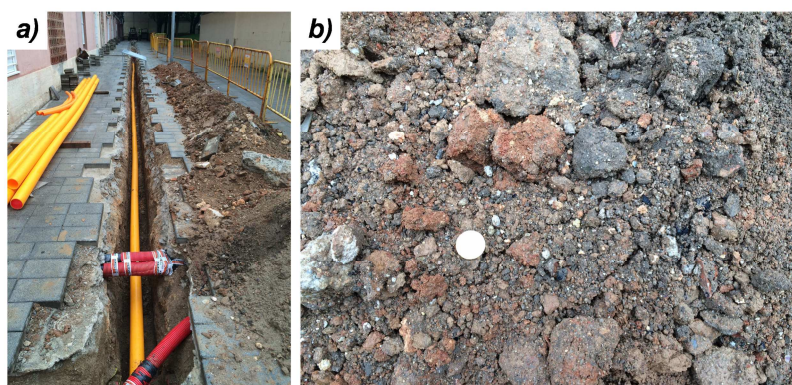


Figura A2. 113 – a) zanja abierta; b) detalle de los materiales extraídos

#### a) Confección del hormigón

El hormigón fue suministrado por la empresa PROMSA, situada en el polígono Les Fallulles en Pallejà, a una distancia de aproximadamente 27km ( $\approx 30$ min) del punto de hormigonado. La dosificación que se estableció para la realización de la losa es la que se describe en la tabla A2.37. En ella se observa que se ha utilizado  $25 \text{ kg/m}^3$  de Link-EVR, lo que representa un 10,64% del peso de cemento. En la ejecución no se realizó curado algunos, no obstante hay que señalar que estuvo lloviendo, tanto durante la ejecución como durante algunas horas posteriores.





Características del hormigón	Ud.	Datos
Tipificación del hormigón	-	HM-20/20/B
Cemento CEM II/A-L 42,5R	kg/m <sup>3</sup>	235
Óxido de calcio (CaO) - Link EVR	kg/m <sup>3</sup> (%spc)	25 (10,64)
Relación a/c	-	0,66
Tipo de curado	-	Sin curado
Armado	kg/m <sup>3</sup>	-
Grava 10/20 mm	kg/m <sup>3</sup>	819
Arena 0/4 mm	kg/m <sup>3</sup>	1105
Agua	l/m <sup>3</sup>	155
Aditivo: Pozzolith 475 N	l/m <sup>3</sup>	1,65
Aditivo: Glenium SKY 866	l/m <sup>3</sup>	0,71

Tabla A2. 37 – Características del hormigón

Para el control de la consistencia del hormigón se realizó el ensayo de asentamiento mediante el cono de Abrams de acuerdo con la UNE-EN 12350:2006 (AENOR, 2006). Se obtuvo un asentamiento del cono de 7 cm, indicando una consistencia blanda del hormigón.

#### b) Puesta en obra y acabado superficial

El procedimiento para la ejecución del hormigonado estuvo condicionado por la limitación de espacio en la zona peatonal. Debido a la imposibilidad de acceso del camión hormigonera, el vertido se realizó mediante “dumper” lo que ralentizó el proceso (figura A2.114a). A pesar de ello, no se detectó ninguna incidencia con el hormigón. En los últimos 10 m de zanja, donde el hormigón expansivo llegaba a pie de calle, se enrasó el hormigón y se realizó un marcado con el objetivo de asimilar el acabado del hormigón al de las baldosas contiguas. Debido a la lluvia posterior al hormigonado el acabado final pudo verse afectado negativamente. En la figura A2.114 se muestra el procedimiento de vertido y la realización del acabado en los últimos metros de zanja.



Figura A2. 114 – a) proceso de vertido del hormigón expansivo; b) enrasado y acabado superficial del hormigón visto

### c) Ensayos realizados

En este apartado se describirán los ensayos que se llevaron a cabo, así como los resultados obtenidos para cada uno de ellos. Los ensayos realizados se llevaron a cabo por parte de Promsa.

Durante la prueba se prepararon probetas cilíndricas de 150x300 mm para evaluar la resistencia a compresión del hormigón según la norma UNE-EN 12390:2003 (AENOR 2003). El resultado de la resistencia a compresión a los 7 días es de 27,9 MPa, que corresponde a la resistencia media de dos probetas. Este resultado indica que la resistencia a los 7 días supera el valor de 20 MPa exigido en la ordenanza municipal para un pavimento de este tipo.

### A.2.3. **Objetivo 2: evolución de la zanja**

Con el fin de realizar un seguimiento del estado de la zanja, el día 14 de octubre se visitó de nuevo la obra y se realizaron las fotografías que se presentan en la figura A2.115.



*Figura A2. 115 – a) estado del pavimento a los 14 días de edad; b) acabado de los 10 últimos metros de la zanja; c) detalle de acabado producido por la lluvia*

En la figura A2.115 se observa que no se han producido fisuras por retracción del hormigón. En particular, cabe destacar que no se aprecia fisura entre el hormigón nuevo y las losas adyacentes. En este sentido, el resultado es satisfactorio.

Por otra parte, cabe destacar que el acabado superficial del hormigón en el tramo final de la zanja (últimos 10 metros) se vio afectado por la lluvia que tuvo lugar el día de la prueba (figura A2.115c). Es necesario precisar que de haber cubierto dicha superficie el acabado hubiese sido significativamente mejor y que nada tiene que ver dicho acabado con el uso de un hormigón expansivo pues habría pasado con cualquier tipo de hormigón.

### A.2.4. **Conclusiones**

En base a los resultados obtenidos, se puede afirmar que la prueba fue una experiencia positiva de cara al uso de hormigones expansivos en la nueva solución de zanja. Similar valoración se ha hecho por parte de GAS NATURAL FENOSA, sugiriendo la realización de otra obra de contraste. Teniendo en cuenta lo anterior, a continuación se presentan las principales conclusiones extraídas.

- El uso de un hormigón expansivo evita la aparición de fisuras por retracción del hormigón tan común en este tipo de obra y favorece la transmisión de tensiones al terreno colindante.
- La adición de cales como agente expansivo no afecta a la resistencia del hormigón exigida en las ordenanzas municipales.

## A2.11. LOSA DE ZANJA CON CaO REALIZADA EN EL CAMÍ DE LA REINETA (COLLSEROLA-BARCELONA)

### A.2.1. Introducción

Los objetivos de este documento son la experiencia de ejecución de una zanja con hormigón de retracción compensada (HRC) en el Camí de la Reineta y la evolución de la zanja con el tiempo. Para el primer objetivo se expondrá el proceso de hormigonado, así como los ensayos de laboratorio que se llevaron a cabo, si existen. Igualmente se definirán las características de los materiales y su proceso de fabricación. Para el segundo objetivo se mostrarán las imágenes obtenidas y se describirá el estado del elemento.

Esta experiencia se enmarca dentro de un convenio de colaboración entre la UPC y Gas Natural sobre rellenos de zanjas. Se planteó a la empresa la posibilidad de realizar unas pruebas piloto para evaluar, *in situ*, el comportamiento a largo plazo de la nueva solución de acabado de la zanja que incorpora, en su capa superior, un hormigón con expansividad controlada mediante CaO.

La primera prueba se ha presentado con anterioridad con la referencia R.O.21. La segunda obra seleccionada para la prueba del proyecto se localiza en el Camí de la Reineta (en Collserola), en el distrito de Sarrià-Sant Gervasi de Barcelona. Durante la experiencia intervinieron las siguientes personas.

### A.2.2. Objetivo 1: ejecución de la zanja

La losa se ejecutó el día 19 de noviembre de 2014. La obra seleccionada se localiza en el Camí de la Reineta (en Collserola), en el distrito de Sarrià-Sant Gervasi de Barcelona. Se trata de una zanja de 80 cm de profundidad y aproximadamente 25 cm de ancho (con tubería de diámetro nominal de 90 mm). En la figura A2.116 se muestra la localización en plano y un detalle de la zona peatonal seleccionada para la prueba. La constructora encargada de ejecutar la obra en este caso es COBRA GESTIÓN DE INFRAESTRUCTURAS, S.A.

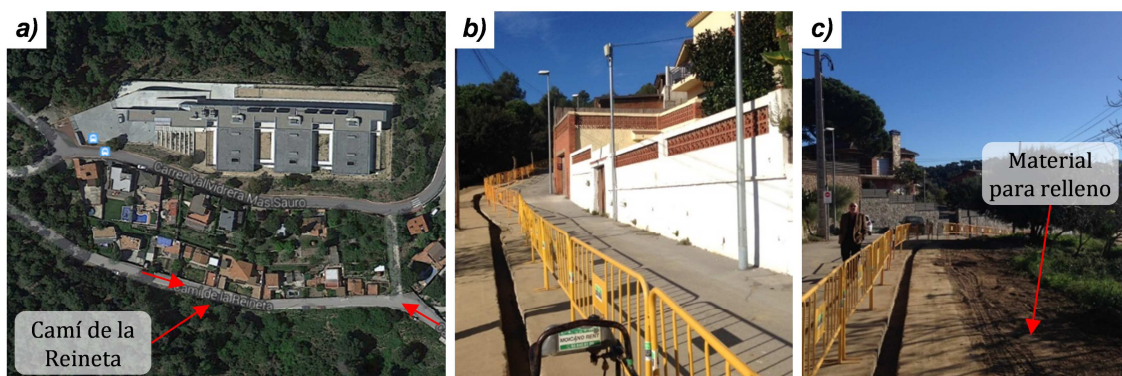


Figura A2. 116 – a) localización de la zanja; b) y c) detalle de la zanja

#### a) Excavación de la zanja

Este tipo de zanja estrecha se ejecuta mediante una rozadora de espesor 25 cm (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**a) de forma que a medida que se excava la zanja el

material es machacado. En este caso, la constructora nos informó de que el cribado fue manual, retirando únicamente los cascotes o elementos de mayor tamaño procedentes de la capa de asfalto. El material granular extraído de las capas inferiores poseía una granulometría adecuada por lo que pudo ser reutilizado para el relleno de las zanja. En la figura A2.117 se muestran distintas imágenes del proceso de excavación y compactación de la zanja.



Figura A2. 117 – a) rozadora de 25cm; b) compactadora adaptada a las dimensiones de la zanja;  
c) detalle de sección con capa de material granular compactada

En la figura A2.117a se muestra la rozadora empleada para realizar la excavación de la zanja. En la figura A2.117c se observa, al lado derecho de la zanja, un terreno de color más oscuro que corresponde al material empleado para el relleno. Esa capa de material granular se compactó por medio de una compactadora con un patín adaptado para la zanja estrecha (figura A2.117b). El resultado final de la compactación se puede observar en el detalle de la figura A2.117c.

En esta prueba se plantea probar dos espesores diferentes en la capa de hormigón expansivo con el fin de evaluar el comportamiento estructural a largo plazo de la capa. En este caso, se opta por el espesor de 20 cm empleado tradicionalmente en ese tipo de pavimento y un espesor reducido de 15 cm. En consecuencia, se ejecutan dos tramos con una sección transversal diferente.

#### b) Confección del hormigón

Teniendo en cuenta el resultado positivo de la prueba piloto anterior, se consideró adecuado emplear el mismo hormigón. Este fue suministrado por la empresa Promsa, situada en el polígono Les Fallulles en Pallejà, a una distancia de aproximadamente 23km ( $\approx 30$ min) del punto de hormigonado. La dosificación que se estableció para la realización de la losa es la que se describe en la tabla A2.38.

En este caso, la dosificación de hormigón pedida a planta es diferente pues se pide un hormigón con una resistencia menor que en la prueba piloto anterior. En ella se observa que se ha utilizado 25 kg/m<sup>3</sup> de Link-EVR, lo que representa un 12,76% del peso de cemento. En la ejecución no se realizó curado alguno.

Características del hormigón	Ud.	Datos
Tipificación del hormigón	-	HM-20/20/B
Cemento CEM II/A-L 42,5R	kg/m <sup>3</sup>	196
Óxido de calcio (CaO) - Link EVR	kg/m <sup>3</sup> (%spc)	25 (12,76)
Relación a/c	-	0,79
Tipo de curado	-	Sin curado
Armado	kg/m <sup>3</sup>	-
Dimensiones	m	66 x 2,5 (165m <sup>2</sup> )
Grava 10/20 mm	kg/m <sup>3</sup>	790
Arena 0/4 mm	kg/m <sup>3</sup>	1085
Agua	l/m <sup>3</sup>	155
Aditivo: Pozzolith 475 N	l/m <sup>3</sup>	1,37
Aditivo: Glenium SKY 866	l/m <sup>3</sup>	0,59

Tabla A2. 38 – Características del hormigón (áridos de tipo calizo)

### c) Puesta en obra y acabado superficial

El procedimiento de hormigonado de la zanja fue mucho más sencillo y ágil que en el caso de la prueba anterior (RO.21) debido que el vertido del hormigón se realizó directamente desde el camión, alcanzando un rendimiento en el avance mucho mayor (figura A2.118a). La consistencia del hormigón fue adecuada permitiendo un fácil extendido del mismo a lo largo de la zanja, tal y como se observa en la figura A2.118b. Este aspecto fue valorado muy favorablemente por los trabajadores de la obra. Con la figura A2.118c se pretende ilustrar el buen aspecto y consistencia del hormigón que no presenta segregación, cerrando bien la esfera realizada manualmente.

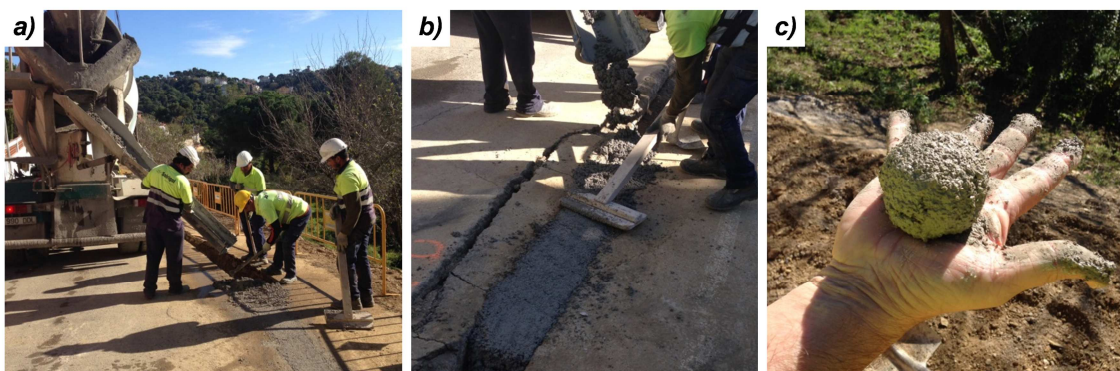


Figura A2. 118 – a) vertido del hormigón; b) extendido del hormigón en la zanja; c) detalle del hormigón

El aspecto del hormigón expandido fue muy satisfactorio. En la figura A2.119a se muestra un detalle de la sección de la zanja con el material compactado y la capa superior de 20 cm de hormigón expansivo. Asimismo, las figura A2.119b y 119c muestran vistas generales y detalle del aspecto final de la zanja cerrada. Cabe destacar que está previsto realizar un fresado de la capa para colocar, por último, una capa de asfalto.

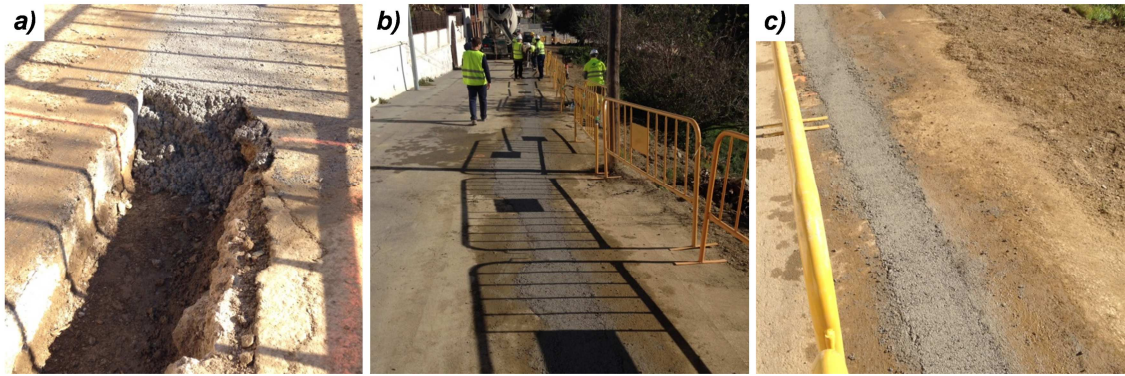


Figura A2. 119 – a) capa de hormigón de 20cm; b) detalle de zanja hormigonada; c) aspecto de la zanja acabada

#### d) Ensayos realizados

En este apartado se describirán los ensayos que se llevaron a cabo, así como los resultados obtenidos para cada uno de ellos. Los ensayos realizados se llevaron a cabo por parte de Promsa.

Durante la prueba se prepararon probetas cilíndricas de 150x300 mm para evaluar la resistencia a compresión del hormigón según la norma UNE-EN 12390:2003 (AENOR 2003). El resultado de la resistencia a compresión a los 7 días es de 18,6 MPa. Este resultado está en la línea de lo esperado para la dosificación del hormigón solicitada.

### A.2.3. Objetivo 2: evolución de la zanja

En aras de realizar un seguimiento de la evolución del hormigón, se pidió a la constructora que nos facilitara fotografías de la zanja pasados algunos días. En la figura A2.120 se presenta una vista general de la zanja y diversas imágenes de detalle del hormigón.



Figura A2. 120 – Aspecto del hormigón días después de la prueba; a) vista general; b), c) y d) detalles de la zanja

De las imágenes de la figura A2.120 se observa un buen aspecto del hormigón y, principalmente, que no ha producido separación con respecto a las paredes de la zanja por causa de la retracción. Este fenómeno revela la capacidad del agente expansivo empleado para compensar los efectos de la retracción. Cabe destacar que el cambio de tonalidad de la figura A2.120d corresponde al uso de dos materiales diferentes. En la zona inferior de la imagen se observa un



material de color gris que corresponde al hormigón expansivo empleado en la prueba. Ese punto corresponde el punto final del tramo de prueba. Seguidamente aparece un material con un tono más marrón que corresponde al mortero de baja resistencia que estaban empleando en la obra para el relleno de toda la zanja. Esa tonalidad corresponde con el bajo contenido de cemento que posee ese material.

#### **A.2.4. Conclusiones**

La experiencia realizada en la zanja del Camí de la Reineta ha sido satisfactoria, pudiendo aprovechar el material extraído de la zanja y, además, probando dos espesores distintos de hormigón expansivo. Las principales conclusiones que, desde el punto de vista del hormigón se pueden extraer de dicha experiencia son:

- El hormigón expansivo utilizado presentaba una buena consistencia, lo que facilitó la extensión de este.
- En el periodo desde la realización de la prueba hasta la entrega del presente documento no se han observado problemas relacionados al espesor de capa de hormigón expansivo de 15 cm (Se ha vuelto a visitar en fecha del 21 de diciembre de 2014. Por este motivo, siempre y cuando se cumplan con los criterios establecidos en el estudio numérico realizado, se considera que es posible reducir el espesor de esta capa.

