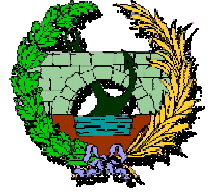




**UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**

**Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos  
Canales y Puertos**



**TESIS DOCTORAL**



**DESARROLLO Y ANÁLISIS DE PAVIMENTOS  
INDUSTRIALES DESDE EL PUNTO DE VISTA  
DEL ACABADO SUPERFICIAL**



**Autor**

**ÁLVARO GARCÍA HERNÁNDEZ**

**Directores**

**DANIEL CASTRO FRESNO**

**JUAN ANTONIO POLANCO MADRAZO**

**Santander, Noviembre 2007**

## 5. DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS ACABADOS SUPERFICIALES DE UN PAVIMENTO DE HORMIGÓN

*Este Capítulo tiene como finalidad presentar una comparación cualitativa y hasta cierto punto también cuantitativa entre los acabados superficiales para pavimentos de hormigón más comunes empleados en la actualidad, con el objetivo de analizar las mejoras que supone su incorporación. Para obtener estos resultados se ha realizado una serie de seis pavimentos experimentales cada uno con un acabado diferente.*

*El tipo de ensayos se ha elegido en función de las principales agresiones que va a sufrir el pavimento: de impacto, de abrasión y de ataque químico. Otros ensayos que se realizaron incluían aspectos como la densidad o la penetración de agua en el hormigón, con el fin de determinar la influencia del pulido superficial.*

El pavimento industrial es el revestimiento utilizado en suelos de edificios para industrias mecánicas, químicas, alimentarias y de servicios generales (laboratorios, almacenes, p rkings, centros comerciales, etc.). Una de las primeras referencias que se tienen acerca de los pavimentos industriales aparece recogida en la revista del Instituto Americano del Hormigón por Scripture, en los años 30 [154]. Partiendo de una caracterización física convencional (densidad, permeabilidad, resistencia a la penetración de agua), el estudio experimental efectuado se ha enfocado bajo criterios de durabilidad, comparando el comportamiento de las seis alternativas frente a los principales esfuerzos que debe resistir el pavimento: abrasión, resistencia a los productos químicos y a impacto. Para ello, se ha ejecutado en condiciones reales de puesta en obra un pavimento industrial de 37.5 m<sup>2</sup>, repartido en seis áreas iguales, cada una dotada de un acabado superficial diferente.

La elección del acabado superficial de un pavimento dependerá de los requerimientos de servicio a los que va a estar expuesto, con especial énfasis al tipo y frecuencia de las cargas, el impacto, la abrasión, la resistencia al ataque químico y, en algunas circunstancias, la higiene, la resistencia al deslizamiento y la est tica. Para cargas ligeras, donde la abrasión no es un problema serio, deberá ser suficiente con una terminación conseguida tras una flotación y un fratasado. Si se usa una fratasadora mecánica, la resistencia del pavimento deberá ser suficiente para camiones con neumáticos e incluso para vehículos ligeros con ruedas metálicas [95].

Generalmente, cuando se demandan pavimentos con una gran resistencia a las tensiones de impacto o a la abrasión (típicamente exigidas en almacenes y fábricas), se usan

endurecedores superficiales, que se incorporan, bien monolíticamente durante la colocación de la base, o como una capa separada después de que la base haya endurecido. Este estudio se ha centrado en los pavimentos acabados con capas monolíticas. En estos, la capa inferior se ejecuta con un hormigón convencional, mientras que la capa superior se realiza con un mortero u hormigón de mejor calidad, que se extiende sobre la losa de hormigón todavía fresca y que, posteriormente, se pule para dotar al conjunto de unas prestaciones mayores a las de la losa de hormigón (Figura 5.1).

Para el mortero superior, los productos más usados son arenas naturales seleccionadas, arenas sintéticas y productos metálicos. Estos últimos se usan fundamentalmente cuando se requiere una buena resistencia a impacto.

Las limaduras de hierro que se emplean como endurecedores superficiales, se obtienen normalmente de desechos industriales, procesados primero por incineración para eliminar todo rastro de aceites, carbón y otros restos orgánicos y segundo de manera magnética para separar las partículas de otros metales como el zinc o el aluminio. La Tabla 5.1 muestra el rango típico de distribución de tamaños de los endurecedores de hierro en un pavimento pulido [121]:

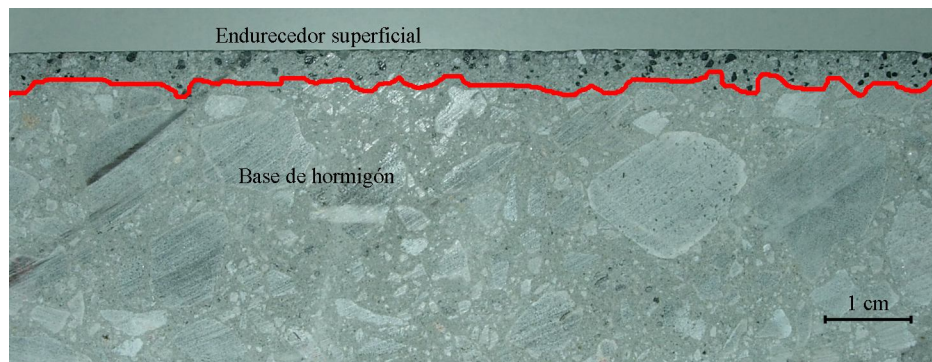
Tamiz	Porcentaje retenido
No. 8	0
No. 16	6-10
No. 30	48-54
No. 50	32-37
No. 100	1,4-3,2
No. 200	0,1-0,4
Módulo de finura	2,65-2,78

**Tabla 5.1: Rango de distribución de tamaños de los endurecedores de hierro típicos para un pavimento pulido [121].**

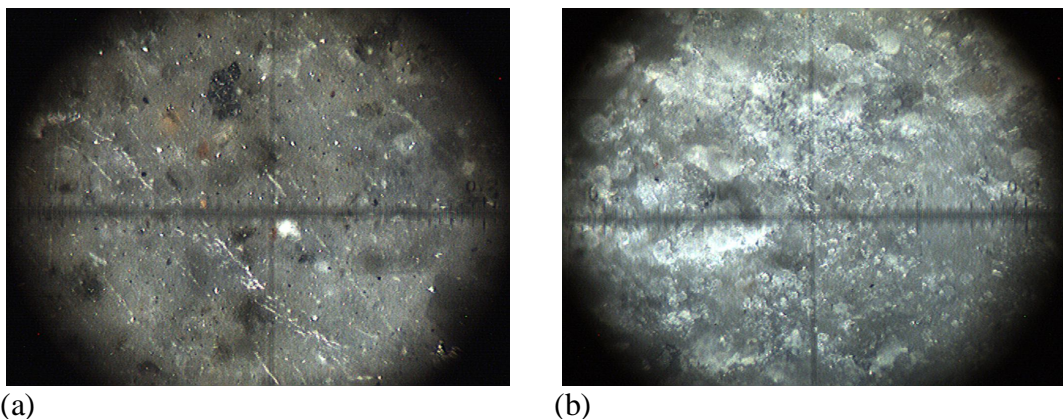
En el caso de los pavimentos monolíticos, Sadeyzadeh et al. [150] encontraron que el tipo de acabado superficial utilizado no tenía influencia alguna en la distribución de la estructura porosa hasta aproximadamente la mitad de su espesor, dependiendo la misma de la relación agua/cemento usada. Sin embargo, la estructura porosa de la zona superficial se veía fuertemente influenciada por el procedimiento de acabado. Es decir, la compresión y vibración de la superficie del hormigón por la acción de la fratasadora es efectiva como medio para compactar la matriz cementosa local y eliminar los capilares asociados con la exudación externa. De este modo, el efecto del flotado será comparable con el de la

revibración del hormigón durante el inicio del fraguado, que incrementa las resistencias del mismo debido a la consolidación de la estructura del gel y a la eliminación de huecos.

Según este autor, en los pavimentos pulidos existe una zona superior de alrededor de 1 a 2 mm en la que la dureza es superior a la del resto del pavimento; posteriormente existe una zona hasta los 5 mm de profundidad en la que la dureza cambia rápidamente (Figura 5.1). Por último, la zona que se encuentra más abajo que éstas apenas se ve afectada por el tipo de acabado utilizado, pero sí presenta grandes variaciones con la relación agua/cemento empleada. Es decir, los efectos beneficiosos del pulido se producirán por la formación de una zona densificada que crea una corteza de alrededor de 1 mm de espesor de superior calidad.



**Figura 5.1: Aspecto del corte transversal de un pavimento endurecido.**



**Figura 5.2: Vista al microscopio (200 aumentos) de la superficie de dos pavimentos de hormigón. (a) Pavimento pulido con un endurecedor a base de cuarzo y corindón. (b) Pavimento simplemente regleteado.**

Por último, la textura del pavimento puede ser clasificada en dos tipos [75]: microestructural, cuando presenta desviaciones con una amplitud de onda característica

menor de 0.5 mm y macroestructural, con desviaciones de la superficie del pavimento con una longitud de onda y amplitud que va desde 0.5 mm hasta un valor en el que ya no se vea afectada la interacción rueda-pavimento. En la Figura 5.2 se muestran dos imágenes al microscopio con los dos tipos de acabado estudiados (pulidos y regleteados), donde predomina un tipo de textura u otra.

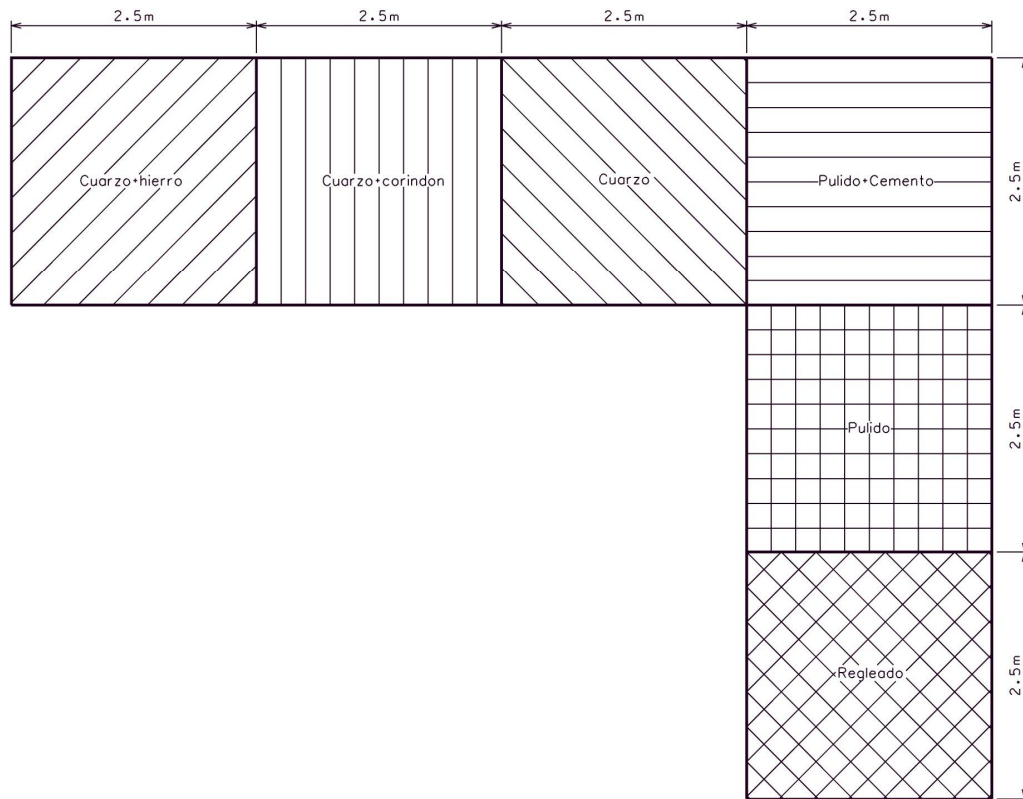
## 5.1. PAVIMENTO EXPERIMENTAL

### 5.1.1. Preparación del pavimento

El lugar donde se preparó el pavimento está localizado en el término municipal de Los Corrales de Buelna (Cantabria), en un área industrial conocida como Polígono de Barros. La colocación del hormigón se llevó a cabo el día 4 de agosto de 2006. La temperatura media registrada durante la ejecución del pavimento fue de 21°C y la humedad relativa ambiental del 73%.

El pavimento experimental fue construido siguiendo el procedimiento habitual en un pavimento de hormigón, sin armaduras y sobre una superficie compactada, en el interior de una nave industrial. Consta de un área de 37.5 m<sup>2</sup> dividida en seis partes de 2.5 x 2.5 m correspondientes a los diferentes acabados superficiales estudiados (Figura 5.3):

- Hormigón pulido
- Regleteado
- Hormigón pulido con agregado de cuarzo, arena de sílice y cemento.
- Hormigón pulido con agregado de corindón, cuarzo, arena de sílice y cemento,
- Hormigón pulido con agregado de virutas de acero y una mezcla de cuarzo, arena de sílice y cemento
- Hormigón pulido con agregado de cemento



**Figura 5.3: Disposición en planta de los diferentes acabados superficiales estudiados.**

El hormigón usado fue proporcionado por una planta de hormigonado. Estaba dosificado con  $340 \text{ kg/m}^3$  de cemento CEM IV/A 32.5 SR y una relación agua/cemento de 0.48. El tamaño máximo del árido era de 20 mm y se empleó un aditivo fluidificante polifuncional, de manera que su consistencia era fluida. La dosificación utilizada en los acabados superficiales fue la mostrada en la Tabla 5.2.

	Cuarzo	Corindón	Hierro	Cemento
Acabado de Cuarzo	50 kg	25 kg		35 kg
Acabado de Hierro	50 kg		25 kg	35 kg
Acabado de Cuarzo	50 kg			35 kg

**Tabla 5.2: Proporciones de endurecedores superficiales empleados.**

En la Figura 5.4 se muestra el procedimiento seguido para la colocación del pavimento. En la Figura 5.4 (a) se observan los encofrados de madera usados para delimitar los distintos acabados superficiales estudiados. Los tabloncillos permitían generar una losa de 7 cm de espesor. En la Figura 5.4 (b) se contempla el vertido del hormigón en los moldes desde el camión. En la Figura 5.4 (c) se muestran las operaciones de allanado de la

superficie de hormigón mediante una regla. En la Figura 5.4 (d) se muestra el vibrado del hormigón mediante el empleo de una regla vibratoria. En la Figura 5.4 (e) pueden verse las operaciones de flotado del pavimento de hormigón. Este proceso se realiza con la finalidad de embeber los áridos más grandes en el interior de la superficie y así eliminar pequeñas imperfecciones como huecos y vacíos y para compactar el hormigón y consolidar el mortero superficial. En la Figura 5.4 (f) se muestra la extensión de los endurecedores que posibilitan los acabados superficiales. Posteriormente a esta operación le siguió el proceso de flotado, y finalmente el de fratasado. En la Figura 5.4 (g) se observa el proceso de curado de la losa de hormigón y en la Figura 5.4 (h) se presenta una visión general del pavimento experimental realizado.

### 5.1.2. Extracción de las muestras

Con el fin de obtener las muestras necesarias para realizar los ensayos se recurrió a máquinas cortadoras y de extracción de testigos como las mostradas en la Figura 5.5

Para los ensayos de resistencia al ataque químico se prepararon 18 muestras cuadradas de 30 x 30 x 7 cm (Figura 5.6 (a)) por cada tipo de pavimento (tres de ellas para cada agente químico). En total se analizaron 108 prismas.

Las probetas cilíndricas (Figura 5.6 (b)) se extrajeron mediante una máquina sacatestigos dotada con una corona de 15 cm de diámetro, aproximadamente 40 para cada tipo de acabado superficial estudiado. Este tipo de probetas se usó para los ensayos de abrasión, resistencia a impacto y profundidad de penetración de agua.

Para la obtención de las resistencias del hormigón a compresión [183] y a tracción indirecta [184] se elaboraron a pie de obra 20 probetas cilíndricas de 15 cm de diámetro y 30cm de altura, según indica la norma UNE-EN 12390 [182], con hormigón tomado directamente del camión.



(a)



(b)



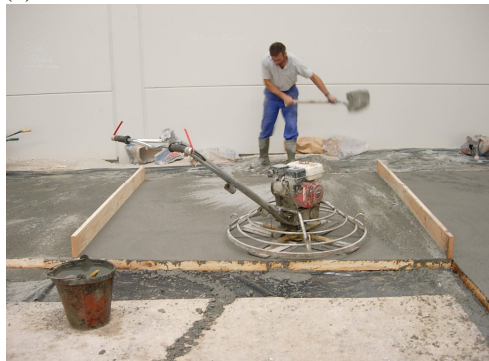
(c)



(d)



(e)



(f)



(g)



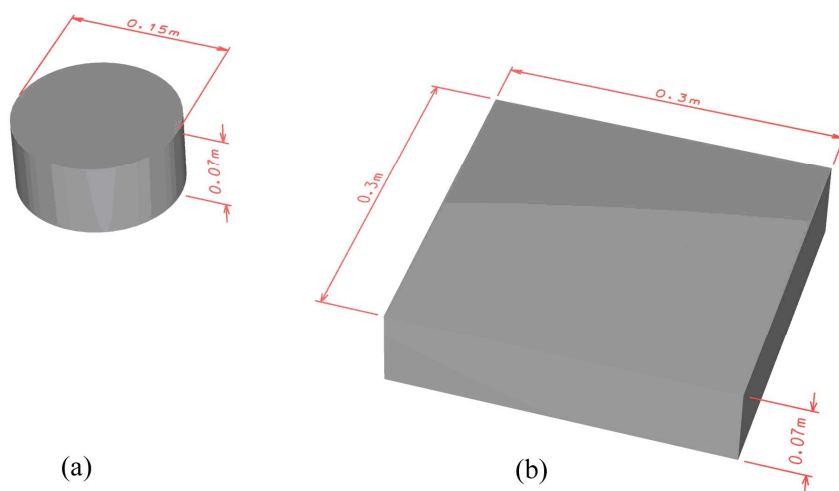
(h)

**Figura 5.4: Procedimiento constructivo del pavimento experimental. (a) encofrados para el pavimento, (b) vertido del hormigón, (c) allanado del pavimento, (d) allanado con regla vibrante, (e) flotado del hormigón, (f) aplicación del agregado mineral para su fratasado posterior, (g) curado del pavimento, (h) vista general del pavimento experimental**





**Figura 5.5: Procedimiento de extracción de muestras. (a) serrado del pavimento, (b) probetas usadas en los ensayos a ataque químico, (c) extracción de testigos cilíndricos del hormigón, (d) aspecto de los testigos cilíndricos extraídos.**



**Figura 5.6: Dimensiones de los testigos extraídos del pavimento experimental.**

## 5.2. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN

### 5.2.1. Resistencia a compresión

El principal objetivo de este ensayo es comprobar la calidad del hormigón. El ensayo se realizó siguiendo las recomendaciones de la norma UNE-EN 12390-3 [183], sobre probetas cilíndricas de 30 cm de altura y 15 cm de diámetro. La resistencia a compresión se calculó a partir de cinco resultados curados durante catorce y veintiocho días en una cámara húmeda a 20 °C y un 99 % de humedad. En todos los casos las probetas se refrentaron con mortero de azufre.

Los datos de la Tabla 5.3 muestran la resistencia a compresión del hormigón empleado en los estudios. En esta tabla, también se recogen las cargas totales aplicadas por la máquina de compresión sobre las probetas.

Muestra	Resistencia a compresión a 14 días		Resistencia a compresión a 28 días	
	T	MPa	T	MPa
1	34.00	19.24	38.90	22.01
2	36.30	20.54	39.00	22.06
3	35.30	19.97	36.60	20.79
4	35.70	20.20	39.10	22.12
5	34.50	19.52	38.30	21.67
Promedio	35.16	19.89	38.38	21.73

Tabla 5.3: Resistencia a compresión del hormigón a 14 y a 28 días.

### 5.2.2. Resistencia a tracción indirecta (Ensayo Brasileño)

Este ensayo se realizó de acuerdo con la norma UNE-EN 12390-6 [184], sometiendo las probetas cilíndricas de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura a compresión a lo largo de un plano diametral. La relación del ensayo de tracción indirecta del hormigón con su resistencia a flexión es de aproximadamente el 60% de la resistencia a flexión [59].

Las probetas se ensayaron tras un curado de 14 y 28 días. Los resultados se muestran en la Tabla 5.4.

Resistencia a tracción indirecta a 14 y a 28 días				
Muestra	14 días		28 días	
	T. (kN)	MPa	T. (kN)	MPa
1	13.50	3.00	12.90	2.87
2	15.90	3.53	18.00	4.00
3	13.80	3.06	15.90	3.53
4	12.70	2.82	17.50	3.91
5	13.40	2.79	17.20	3.82
Promedio	13.86	3.04	16.30	3.62

Tabla 5.4: Resistencia a tracción indirecta del hormigón a 14 y a 28 días.

### 5.2.3. Densidad

Este ensayo se realizó siguiendo las recomendaciones prescritas en la norma UNE 41-169-89 [178], utilizando tres probetas para cada tipo de pavimento estudiado. En primer lugar, las probetas se secaban en una estufa a 110 °C durante 24 horas, después se pesaban secas, obteniendo su masa de este modo ( $m_1$ ). Posteriormente, se cubrían con vaselina para impermeabilizarlas y se pesaban de nuevo ( $m_2$ ). Por último, las probetas se sumergían en agua obteniéndose el peso sumergido ( $m_3$ ) (Tabla 5.5). La densidad aparente del hormigón se calcula mediante la fórmula indicada en (5.1):

$$D = \frac{m_1}{m_2 - m_3} * d \quad (5.1)$$

Donde:

D = Densidad de la probeta  $g/cm^3$

d = Densidad del agua ( $1 g/cm^3$ )

$m_1$  = Peso de la probeta seca (g)

$m_2$  = Peso de la probeta impermeabilizada (g)

$m_3$  = Peso de la probeta impermeabilizada sumergida en agua (g)

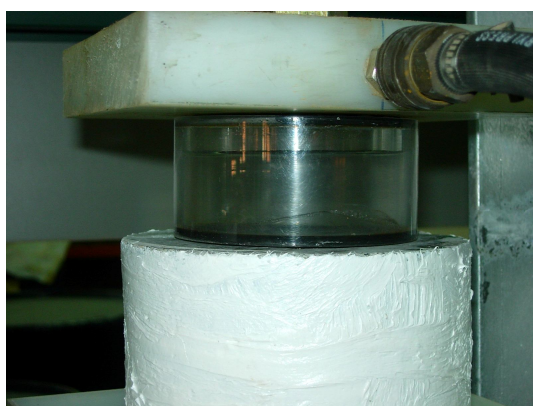
En la Tabla 5.5, puede observarse cómo el acabado superficial influye en la densidad de los pavimentos estudiados, aunque el endurecedor superficial empleado apenas puede ser tenido en cuenta. En esta tabla, el hecho más relevante es la menor densidad del pavimento regleteado, lo que indica un mayor volumen de huecos en el mismo.

Tipo de acabado:		Regleado	Acabado de Hierro	Acabado de Cuarzo	Acabado de Corindón	Acabado de Cemento	Acabado Pulido
Peso seco (gramos)	Probeta 1	2076.50	3568.60	2228.80	3371.00	2222.50	2330,60
	Probeta 2	2061.60	3516.30	2238.00	3339.10	2335.40	2257,30
	Probeta 3	2310.60	2243.80	2286.40	2987.20	2278.80	2170,30
	Promedio	2149.57	3109.57	2251.07	3232.43	2278.90	2252,73
Peso seco con aislante (gramos)	Probeta 1	2077.10	3572.20	2230.70	3376.50	2225.30	2335,40
	Probeta 2	2064.50	3521.90	2240.30	2489.80	2338.40	2261,00
	Probeta 3	2347.40	2267.00	2288.80	3342.30	2281.80	2172,00
	Promedio	2163.00	3120.37	2253.27	3069.53	2281.83	2256,13
Peso sumergido en agua (gramos)	Probeta 1	1122.30	2022.50	1300.00	1848.50	1216.30	1310,90
	Probeta 2	1108.70	1991.60	1246.90	1567.50	1299.20	1259,90
	Probeta 3	1277.90	1258.30	1240.00	1401.40	1242.80	1214,40
	Promedio	1169.63	1757.47	1262.30	1605.80	1252.77	1261,73
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )		2.16	2.28	2.27	2.21	2.21	2.27

Tabla 5.5: Tabla de masas y densidades de las probetas estudiadas

#### 5.2.4. Profundidad de penetración de agua

Este ensayo se realizó siguiendo las recomendaciones de la norma UNE-EN 12390-8 [185], usando tres muestras para cada uno de los seis tipos de acabado estudiados. Con el fin de asegurar la impermeabilidad lateral de las probetas, las mismas se cubrieron con una capa de silicona. El ensayo tiene una duración de 72 horas durante las que la cara pulida del pavimento está cubierta por agua a 5 atmósferas de presión (Figura 5.7 (a)). Transcurrido ese tiempo, las probetas se partieron en dos semicilindros con el fin de medir la máxima profundidad de penetración de agua en las mismas (Figura 5.7 (b)). Los valores de penetración de agua para cada tipo de pavimento estudiado se muestran en la Tabla 5.6 y en la Figura 5.8.



(a)

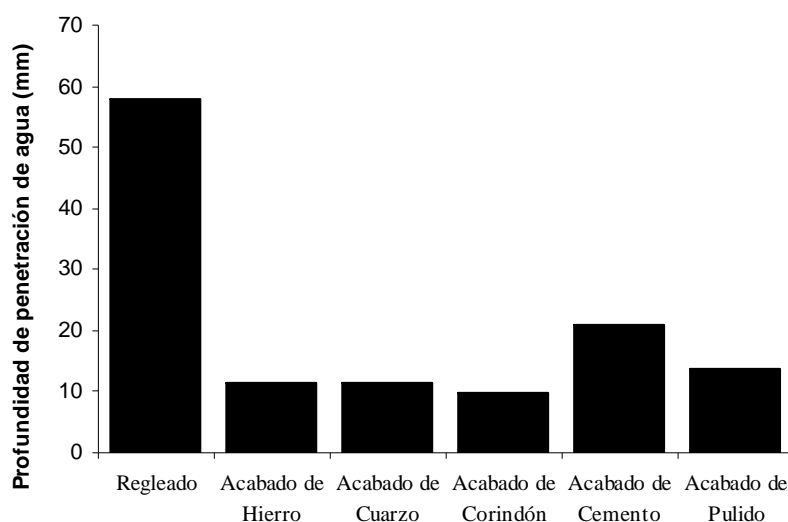


(b)

Figura 5.7: Ensayo de penetración de agua. (a) Preparación de las muestras. (b) Muestras ensayadas.

Tipo de acabado	Valores de penetración (mm)					Promedio (mm)
Regleado	65.33	59.40	55.60	60.32	48.29	57.79
Acabado de Hierro	19.12	6.98	6.96	11.02	12.80	11.38
Acabado de Cuarzo	13.23	12.51	8.39	10.65	12.11	11.38
Acabado de Corindón	9.27	9.92	10.12	10.27	9.25	9.77
Acabado de Cemento	28.42	20.29	15.72	18.24	22.36	21.01
Acabado de Pulido	18.01	13.14	10.07	14.97	12.42	13.72

**Tabla 5.6: Medida de la máxima penetración de agua para cada tipo de pavimento**



**Figura 5.8: Gráfica comparativa de la penetración de agua en diferentes tipos de acabado superficiales para pavimentos de hormigón.**

Observando los resultados de la Tabla 5.6 y de la Figura 5.8, no existe una gran diferencia entre el comportamiento de los pavimentos en función del tipo de acabado, excepto en el caso del pavimento simplemente flotado. Tan sólo en los pavimentos que han sido pulidos o tienen un acabado de cemento la diferencia es un poco mayor. Esto es debido a que los materiales usados como endurecedores (hierro, corindón y cuarzo) son impermeables, y por lo tanto dificultan el paso del agua a través del acabado superficial. En el caso de los pavimentos pulidos y con cemento, no existen estos elementos que dificulten el paso del agua. El acabado con cemento es todavía más significativo, porque en él existe una capa mayor de mortero en la superficie que en el acabado simplemente pulido (Figura 5.9). Por último, en el caso del pavimento regleteado, la penetración de agua se incrementa mucho, lo que indica una porosidad mayor que en los otros tipos de acabado.

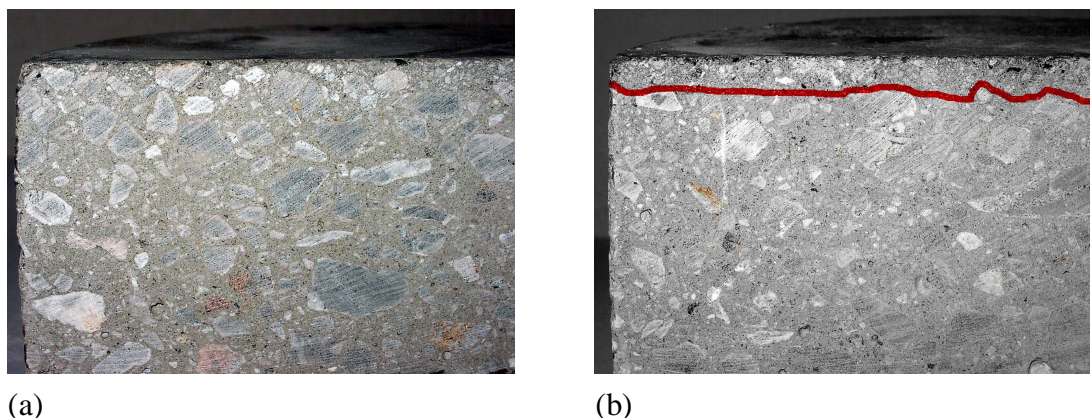


Figura 5.9: Acabados de pavimento. (a) Acabado pulido. (b) Acabado con cemento.

### 5.2.5. Resistencia al impacto

Para la determinación de la resistencia a impacto se utilizaron las muestras de la Figura 5.6 (a) ensayadas según la norma UNE 83514 [229]. Este método consiste en dejar caer repetidamente un peso de 4.54 kg desde una altura de 457 mm sobre una esfera de acero, situada sobre la probeta de hormigón. A partir de nueve ensayos para cada tipo de pavimento con la finalidad de tener una muestra estadísticamente representativa. La Tabla 5.7 recoge los resultados obtenidos de los ensayos a 14 y a 28 días. Estos datos se encuentran representados en la Figura 5.10.

	14 días				28 días			
	1ª grieta		rotura		1ª grieta		rotura	
	Media	Desviación típica	Media	Desviación típica	Media	Desviación típica	Media	Desviación típica
Regleteado	10	6	13	7	24	7	25	3
Acabado de Hierro	8	4	10	5	18	9	22	7
Acabado de Cuarzo	9	5	6	5	16	3	18	3
Acabado de Corindón	6	2	8	3	18	11	19	6
Acabado Pulido	6	3	7	2	16	8	17	6
Acabado de Cemento	5	2	6	2	13	5	14	2

Tabla 5.7: Número de impactos hasta rotura y primera grieta a 14 y 28 días de los pavimentos estudiados

Llama la atención que, de todos los acabados estudiados, el que mejores características presenta en cuanto a resistencia a impacto es el que fue simplemente regleteado. Anteriormente se ha indicado que este tipo de acabado es el que mayor porosidad presenta, así como el que menor densidad tiene. En principio, antes del estudio más extenso que se lleva a cabo en el Capítulo 6, esto puede achacarse a una mayor capacidad de absorción de

energía por parte del pavimento, debida a su gran porosidad, que actúa como un conjunto de amortiguadores de energía que logran la atenuación de las ondas de choque al encontrarse con los poros; es decir, al propagarse la onda en un medio de menor densidad se distribuirá por la pasta de cemento teniendo que recorrer un mayor camino (Figura 5.11). Por otra parte, una gran parte de la energía se consumirá en el colapso de los poros del hormigón antes de empezar a formarse microroturas por el impacto.

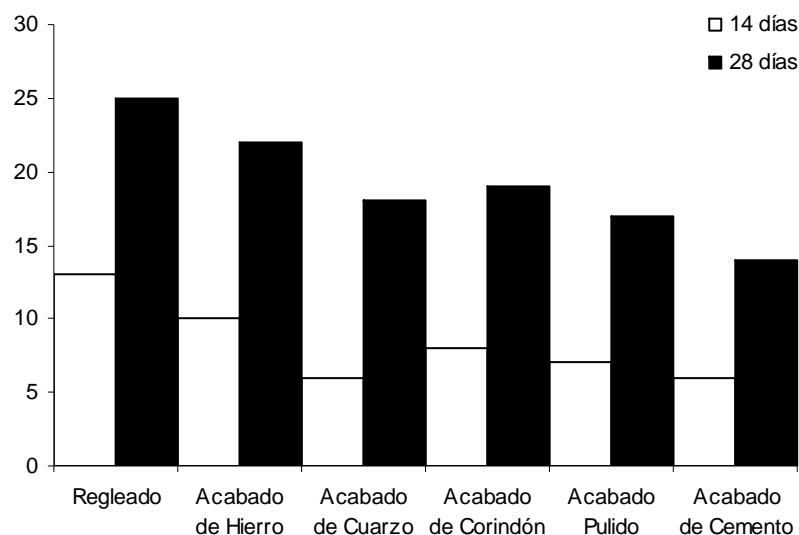


Figura 5.10: Número de impactos requeridos para causar la rotura del hormigón a los 28 días.

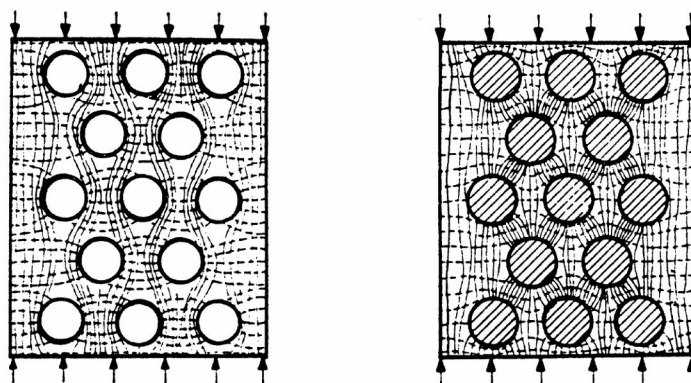
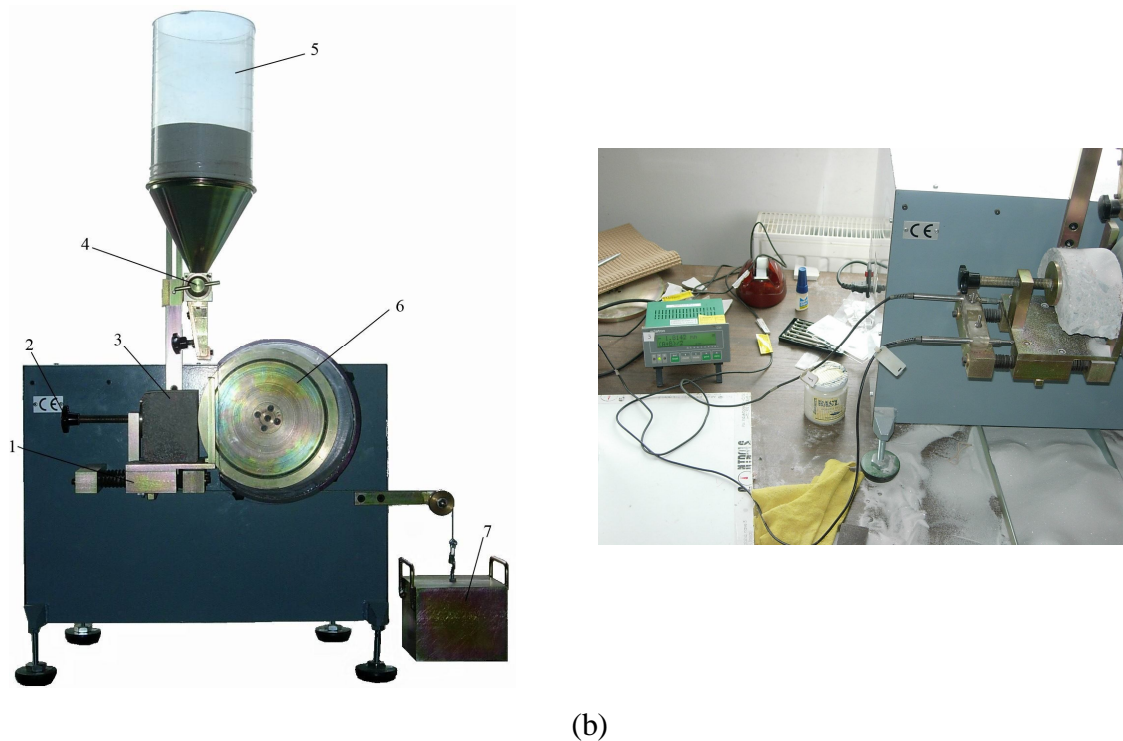


Figura 5.11: Direcciones de los esfuerzos principales. (Izquierda) hormigón poroso. (Derecha) hormigón normal [56].

Finalmente, es significativa la gran diferencia en cuanto a la resistencia a impacto entre las probetas rotas a 14 días y las rotas a 28 días, que es reflejo de la pequeña ganancia de resistencia observada en los ensayos de compresión.

### 5.2.6. Resistencia a la abrasión

La resistencia a la abrasión del hormigón para pavimentos normalmente se relaciona con su resistencia a compresión que se mejora principalmente con un incremento en el contenido de cemento y/o una reducción en la cantidad de agua de amasado. La dureza del árido grueso empleado sólo será determinante, cuando la capa superior de mortero haya sido removida. Por último, otro de los hechos que afectan en gran medida a la resistencia a abrasión del hormigón es el tipo de curado y edad que tenga el mismo.



**Figura 5.12: (a) Ensayo de rueda de abrasión. (1: carrito; 2: tornillo; 3: probeta; 4: válvula ; 5: depósito; 6: disco de abrasión; 7: peso). (b) Transductores usados para medir la profundidad de penetración en cada instante.**

Para la realización de este ensayo se siguieron las especificaciones de la norma UNE-EN 1338 [186]. Los ensayos se realizaron con el abrasímetro que se detalla en la Figura 5.12, (a) sobre probetas cilíndricas como las mostradas en la Figura 5.6 (a). El aparato dispone de una rueda de acero, de 20 cm de diámetro que gira a 75 r.p.m. y se encuentra en contacto con la muestra estudiada. La fuerza entre la rueda y la muestra viene fijada por la aplicación de un peso constante. Durante el proceso, un abrasivo a base de corindón cae a una velocidad de 2.5 l/min entre la rueda y la probeta. La duración del ensayo es de un minuto. Posteriormente, se mide el ancho de la zona erosionada. Para la realización de los



ensayos a 28 días se utilizó una pareja de transductores como los mostrados en la Figura 5.12 (b), de tal forma que pudiera medirse la profundidad de penetración en cada instante (Figura 5.14). Posteriormente se calcula la anchura de la huella a través de la fórmula expuesta en (5.2), que relaciona la profundidad de penetración del disco de abrasión con la anchura de la huella.

$$a_e = 2\sqrt{2Rh - h^2} \quad (5.2)$$

Donde:

$a_e$  = Anchura equivalente de la huella (mm).

R = Radio del disco de abrasión (20 cm).

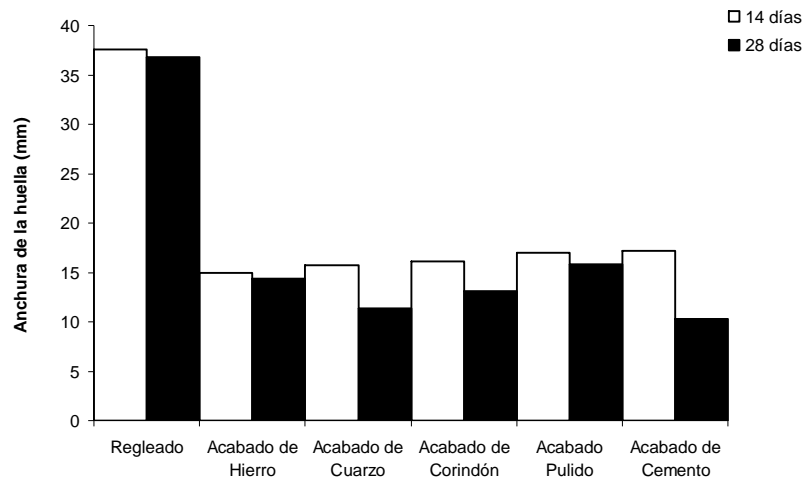
h = Profundidad de la huella.

Cada ensayo se repitió cinco veces, según indica la norma UNE-EN 1338, sobre probetas curadas durante 14 y 28 días.

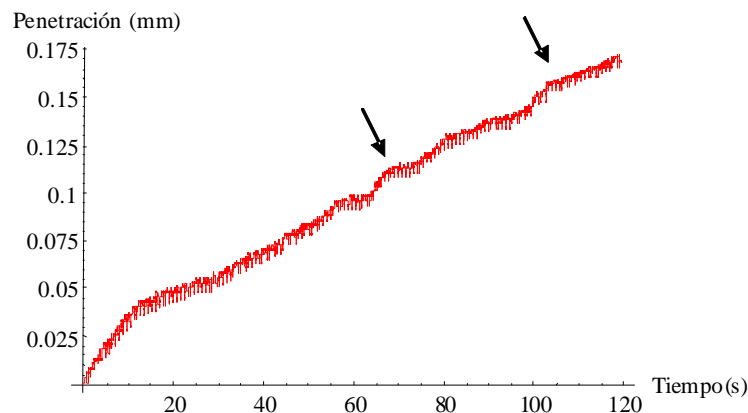
	14 días		28 días	
	Media (mm)	Desviación típica	Media (mm)	Desviación típica
Regleteado	37.60	2.21	36.78	7.98
Acabado de Hierro	14.93	0.48	14.34	1.84
Acabado de Cuarzo	15.75	0.55	11.40	0.35
Acabado de Corindón	16.07	0.69	13.07	1.78
Acabado Pulido	17.00	0.92	15.79	1.95
Acabado de Cemento	17.17	1.17	10.34	2.08

**Tabla 5.8: Datos de anchura de la huella causada por el disco de abrasión en los diferentes pavimentos estudiados.**

En la Tabla 5.8 y en la Figura 5.13 se muestran los resultados de la anchura de la huella obtenidos con el aparato de la Figura 5.12 (a). En estas puede verse, por comparación entre el pavimento regleteado y el pulido, cómo éste es un buen método para aumentar la resistencia a abrasión. Por otra parte, llama la atención que no exista una gran diferencia entre los distintos pavimentos pulidos. Como era de esperar, el pavimento al que no se le añadió ningún endurecedor superficial es el que menos resistencia a abrasión presenta.



**Figura 5.13: Anchura de la huella en los pavimentos estudiados causada por el disco de abrasión según la norma UNE-EN 1338.**



**Figura 5.14: Evolución de la penetración en el pavimento por el disco de abrasión en el pavimento acabado con corindón.**

Por otra parte, en la Figura 5.13 se ve cómo el pavimento que mejor resiste la abrasión es aquel al que se le añade cemento como endurecedor superficial, siempre y cuando se pueda esperar el tiempo suficiente para que el mortero de la capa superior adquiera la mayor parte de las resistencias. Contrariamente a lo que podría suponerse, el pavimento al que se le añadió corindón no resistió tanto como aquel al que se le añadió cuarzo. A primera vista esto pudo deberse a la propia naturaleza del ensayo, ya que al ser el hormigón un material compuesto, existen partes con una menor resistencia que otras, con lo que en algún momento dado, el corindón no sólo estará sufriendo el efecto de la abrasión, sino también esfuerzos de cortante al golpear los granos de abrasivo contra el corindón, con lo que este tenderá a pulverizarse, ya que el corindón es más frágil que cuarzo. Una muestra de esto se

encuentra en la Figura 5.14, que representa la penetración en el hormigón por parte del disco de abrasión medido con los trasductores de la Figura 5.6 (b). En esta figura se ve cómo la velocidad de penetración disminuye para luego acelerar repentinamente. Se cree que este fenómeno puede ser debido al desgaste del corindón, que “frena” la penetración del disco de abrasión hasta que finalmente se rompe, y en ese momento, la abrasión tiene lugar mucho más deprisa. Por último, es importante señalar cómo el pavimento pulido con virutas de hierro apenas tiene más resistencia que el pavimento simplemente pulido.

Por último, uno de los hechos que llama atención en la Figura 5.14 es que el pavimento acabado con hierro pasa de tener mejor resistencia a la abrasión a los 14 días que los pavimentos acabados con cuarzo y corindón, a tenerla peor a los 28 días de curado. El motivo por lo que esto pudo producirse pudo ser que en el caso del pavimento acabado con virutas de hierro, éstas se encuentran orientadas paralelas al plano del suelo, con lo que una gran parte de la resistencia a abrasión la están proporcionando ellas; además, estas virutas no tienen rotura frágil como el corindón, sino que plastifican adaptándose al flujo de abrasivo. Sin embargo, en el caso de los pavimentos acabados con cuarzo o con corindón, su desgaste dependerá en mayor medida del grado de curado de la pasta de cemento ya que cuando la pasta no tenga suficientes resistencias, la matriz cementosa que mantiene unidos los granos de cuarzo y de cemento se desgastará muy fácilmente, con lo que los granos tenderán a desprenderse.

### **5.2.7. Resistencia al ataque químico**

Según Fernández Cánovas [59], la resistencia que presenta el hormigón al ataque químico por determinadas sustancias depende de su permeabilidad y de la distribución y tamaño de sus poros. De este modo, el proceso de pulido del pavimento será muy recomendable por el efecto de compactación que tiene sobre la parte expuesta del hormigón.

La agresión química se produce de dos formas fundamentales: una, por disolución de los compuestos fácilmente solubles del propio hormigón o por la formación de sales también solubles y extracción de las mismas por el agua y otra, por ataque con formación de compuestos insolubles de mayor volumen que los primitivos y que al recristalizar dentro

del sistema capilar dan lugar a una expansión que produce tensiones mecánicas capaces de destruir el hormigón [59]. Así, en el ataque por ácidos, los compuestos cálcicos del hormigón se convierten en sales cálcicas, destruyendo la estructura del cemento endurecido y el sistema poroso.

El propósito de estos ensayos es definir los parámetros que puedan servir para elegir un tipo de acabado con respecto al ambiente al que va a estar expuesto. Como no se tenía constancia de que este tipo de ensayo se hubiera realizado antes, al no saber cómo iba a actuar el acabado ante los agentes químicos, se registró la profundidad del daño producido por los productos químicos a 3, 7, 14 y 28 días de exposición tras 15 días de curado previo en cámara húmeda al 98 % de humedad y  $20 \pm 1^\circ\text{C}$  de temperatura, así como su aspecto externo en esos momentos.

Los ensayos se llevaron a cabo a temperatura controlada ( $20 \pm 1^\circ\text{C}$ ) dentro del laboratorio de Materiales de la Escuela de Ingenieros de Caminos de Santander a partir de las probetas prismáticas de la Figura 5.6 (b). Para la realización de este ensayo, las instrucciones más parecidas que se encontraron son las indicadas en la norma UNE-EN 13529 [187].

Primeramente, se lavaron concienzudamente las probetas, procurando eliminar el producto de curado en la medida de lo posible. Paralelamente se prepararon unos anillos cilíndricos de PVC de 9 cm de diámetro y 6 cm de altura, con el fin de servir de contenedores para los productos químicos empleados. Los anillos se fijaron sobre la superficie de las probetas, una vez secadas, mediante una resina epoxi. Para prevenir el daño en el espécimen donde no fuera deseable, el resto de la superficie expuesta se cubrió con una pintura impermeabilizante. Sobre cada probeta se adosaron dos anillos cilíndricos de PVC (Figura 5.15 (a)).

Los productos químicos usados para este ensayo fueron los recomendados por la norma UNE-EN 13529 (Tabla 5.9).

Para cada tipo de pavimento se usaron 18 probetas (3 por cada tipo de producto químico, con un total de 6 recipientes de PVC). Una vez preparadas, cuando el anillo de PVC se

encontraba totalmente sellado por su base con la resina, el líquido se vertía en el recipiente hasta una profundidad de aproximadamente 1cm. Posteriormente, los anillos se cubrían con una lámina transparente de polietileno, de forma que evitase su evaporación y facilitara su ulterior retirada (Figura 5.15 (b)).

Líquido empleado	Grupo al que representa
Disolución al 50% en volumen de ácido acético + 50% en volumen de ácido propiónico	Ácidos orgánicos (salvo ácido fórmico) y sus sales en disolución acuosa.
Ácido sulfúrico (30%)	Ácidos inorgánicos hasta el 30 % y sales hidrolizantes en disolución acuosa (PH<6) salvo el ácido fluorhídrico y los ácidos oxidantes y sus sales.
Ácido fluorhídrico	
Hidróxido de sodio (20%)	Bases inorgánicas y sus sales alcalinas hidrolizantes en disolución acuosa (PH>8) salvo las disoluciones de amonio y las disoluciones oxidantes de sales (por ejemplo hipoclorito).
Hipoclorito sódico al 5% (lejía)	
Disolución acuosa de cloruro de sodio (20%)	Disolución de sales inorgánicas no oxidantes que presentan un pH de 6 a 8.

**Tabla 5.9: Líquidos de ensayo empleados [187].**



(a)



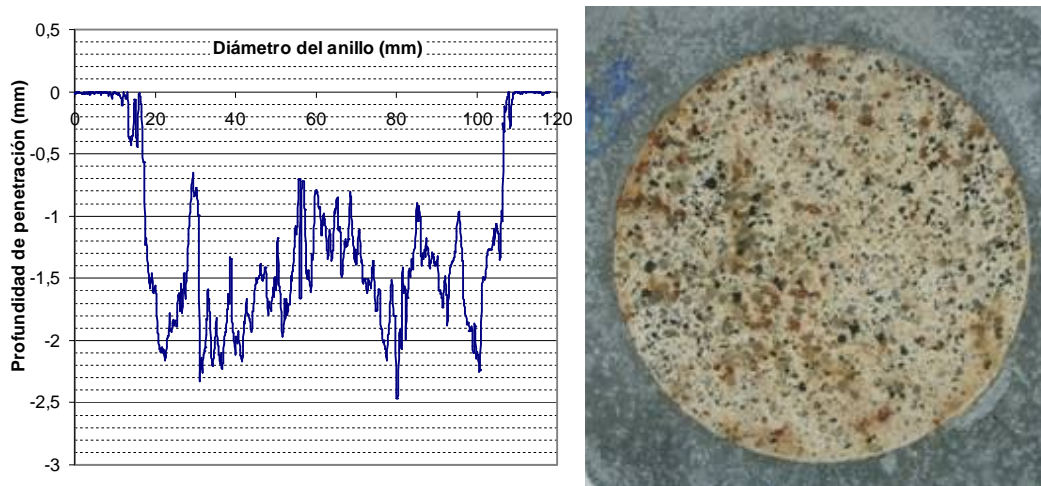
(b)

**Figura 5.15: (a) Probetas preparadas para recibir los productos químicos. (b) Probetas ya preparadas con los productos químicos.**

Transcurrido al tiempo de exposición, tras retirar los productos químicos, los recipientes se lavaban con agua abundante y se despegaban. Después de esto, se anotaban todos los cambios que se habían producido en la superficie del pavimento. Después, se efectuaba un barrido láser para conocer la profundidad del daño causado por los productos químicos

(Figura 5.16).

En la Figura 5.16 se muestra un ejemplo de penetración en una probeta por parte de uno de los productos químicos empleados. En la Tabla 5.10 y en la Figura 5.17 se recogen los datos de penetración de los productos químicos en los diferentes pavimentos empleados.



**Figura 5.16: Ejemplo de daño en la sección del pavimento con acabado de corindón por parte de la mezcla de ácido propiónico más acético a los 14 días.**

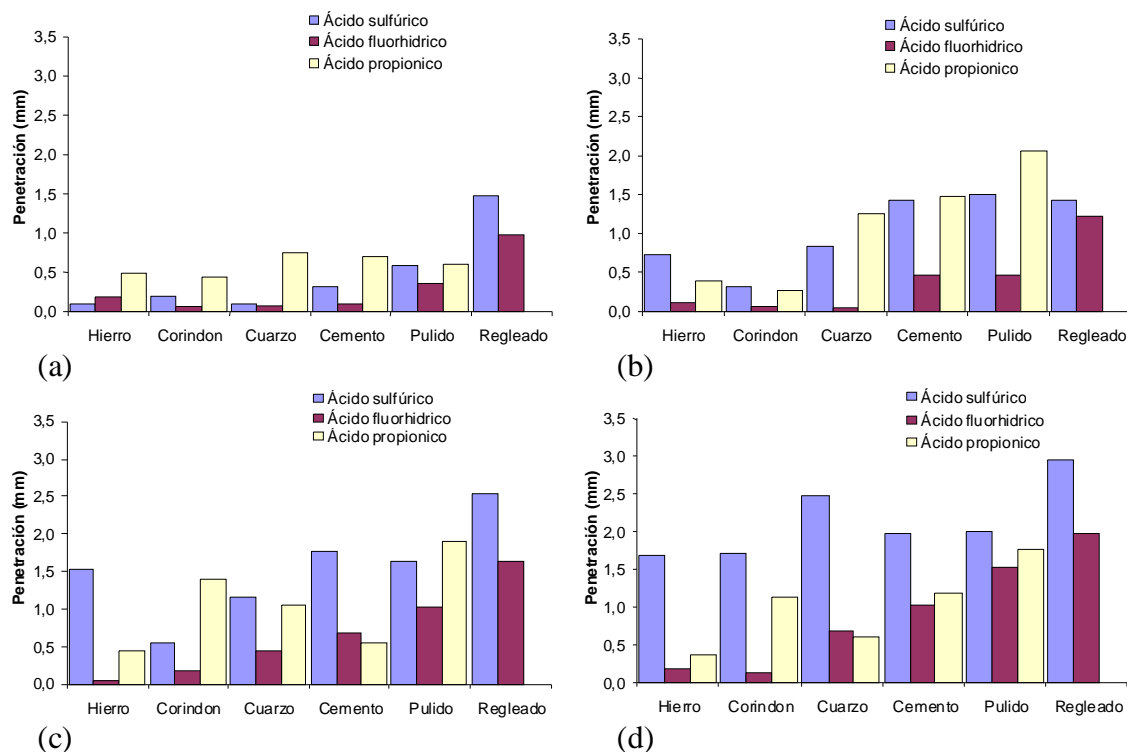
Profundidad del ataque (mm)	Días	Hierro		Corindón		Cuarzo		Cemento		Pulido		Flotado	
		Med.	Max.	Med.	Max.	Med.	Max.	Med.	Max.	Med.	Max.	Med.	Max.
Ácido sulfúrico	3	0.10	0.45	0.19	0.32	0.09	0.21	0.32	1.66	0.59	0.97	1.48	3.05
	7	0.73	1.85	0.32	1.12	0.84	2.88	1.43	2.85	1.50	3.00	1.43	6.73
	14	1.52	2.91	0.55	1.28	1.15	2.67	1.75	2.97	1.62	3.35	2.52	4.48
	28	1.68	3.13	1.71	3.39	2.48	4.93	1.98	3.19	2.01	3.16	2.95	5.25
Ácido fluorhídrico	3	0.18	0.45	0.06	0.13	0.07	0.17	0.09	0.16	0.35	0.59	0.98	1.91
	7	0.11	0.94	0.06	0.14	0.04	0.12	0.47	0.96	0.46	1.09	1.22	2.59
	14	0.05	0.12	0.17	0.34	0.44	1.11	0.68	0.94	1.02	1.60	1.63	3.05
	28	0.18	0.35	0.12	0.38	0.69	1.55	1.02	1.49	1.52	2.24	1.98	3.51
Ácido propiónico	3	0.49	1.80	0.44	1.05	0.75	2.31	0.70	1.70	0.60	1.12	-	-
	7	0.39	1.14	0.27	0.81	1.26	2.52	1.48	2.56	2.06	3.35	-	-
	14	0.45	1.36	1.39	2.47	1.06	2.45	0.54	2.49	1.90	3.31	-	-
	28	0.38	1.31	1.15	3.31	0.60	2.03	1.20	4.88	1.78	3.32	-	-

Med. = Media  
Max. = Máximo

**Tabla 5.10: Datos de penetración por ataque químico en los diferentes pavimentos estudiados.**

Existen tres factores que influyen especialmente en el efecto de los productos químicos sobre los pavimentos de hormigón: (i) tipo de producto, (ii) tiempo de exposición y (iii) tipo de acabado en el pavimento empleado.

A partir de los datos de la Figura 5.17, puede observarse cómo de entre los pavimentos estudiados, los que en general resisten mejor el ataque de los productos químicos son: (1º) los acabados con hierro, (2º) los acabados con corindón, (3º) los acabados con cuarzo, (4º) los acabados con cemento, (5º) los que han sido simplemente pulidos y (6º) los que no han sido acabados.



**Figura 5.17:** (a) Datos medios de penetración a 3 días. (b) Datos medios de penetración a 7 días. (c) Datos medios de penetración a 14 días. (d) Datos medios de penetración a 28 días.

Por otra parte, de los productos químicos estudiados, los más agresivos para el pavimento fueron los ácidos (Figura 5.17). En esta figura puede observarse cómo el ácido que más daño causa al pavimento es el ácido sulfúrico, seguido por la combinación de ácido acético y ácido propiónico. La diferencia fundamental que se observó entre estos dos tipos de agresivos químicos es que el segundo ataca fundamentalmente a la pasta de cemento y los endurecedores superficiales parecen tener algún tipo de influencia sobre sus efectos, mientras que el ácido sulfúrico ataca tanto a la pasta como a los áridos. Según la ACI-201 [9] las tres sustancias ácidas empleadas presentan una velocidad de ataque elevada, mientras que el hidróxido de sodio en la solución empleada tiene una velocidad de ataque moderada y la lejía tiene una velocidad de ataque lenta o despreciable.

El ácido sulfúrico reacciona con el hidróxido de calcio y da lugar a la formación de sulfato de calcio dihidrato cristalizado y expansivo que puede destruir el hormigón (Figura 5.18 (a)). El mecanismo resumido del ataque por sulfatos es [152]: teniendo contacto la superficie del hormigón con la solución agresiva, penetra el  $SO_4^{2-}$  (ión sulfato) por difusión limitada en la zona superficial; penetra el catión asociado y reacciona sustituyendo el  $Ca^{2+}$  (ión calcio), formándose yeso. Se presenta una reacción con el  $C_3A$  (aluminato tricálcico) o el  $C_4AH_x$  (aluminato cálcico hidratado) y el monosulfoaluminato, generando etringita expansiva. Además, al ser los áridos empleados calizos, el ácido reacciona con ellos, destruyéndolos y formando grandes agujeros en el pavimento. El ácido sulfúrico disuelve el corindón y el cuarzo. Por otra parte, el hierro, al entrar en contacto con el ácido sulfúrico, se oxida formando sulfato ferroso ( $FeSO_4$ ).

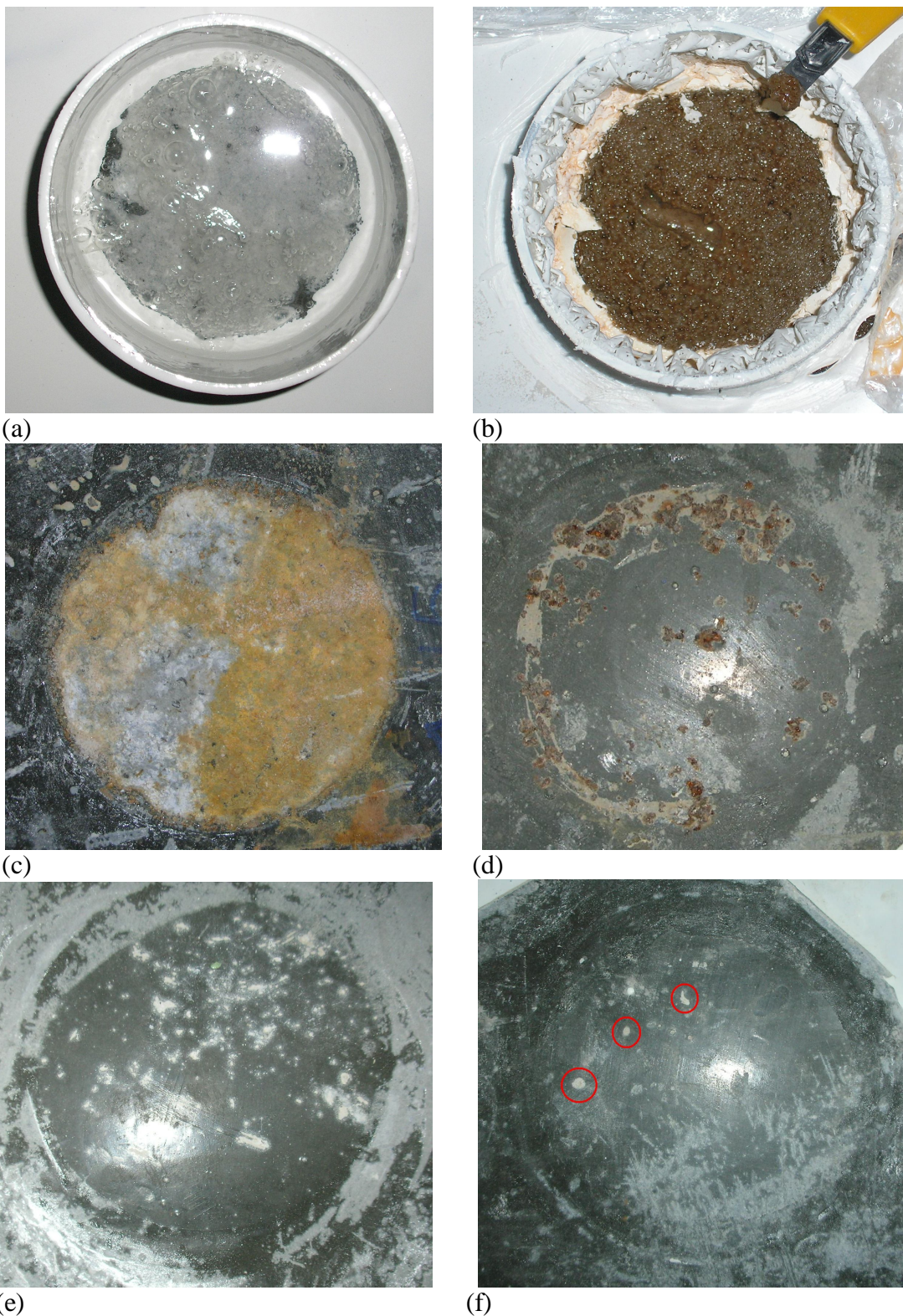
El ácido acético reacciona con el hidróxido de calcio formando sales solubles que son muy fáciles de arrancar del pavimento ante cualquier agente externo (Figura 5.18 (b)).

El ácido fluorhídrico reacciona con el hidróxido de calcio dando lugar a fluoruro de calcio insoluble que cierra los poros del hormigón. Aunque la capa superior que se forma puede actuar como protectora, retardando el efecto del ácido con respecto a los otros utilizados (Figura 5.17), al estar este ácido en grandes concentraciones produce daños considerables en el hormigón (Figura 5.18 (c)). El ácido fluorhídrico disuelve el cuarzo y el corindón.

El hidróxido de sodio, el cloruro sódico y la lejía apenas reaccionan con la pasta de cemento del acabado superficial; sin embargo, sí que afectan a ciertos agregados superficiales como el hierro, provocando su oxidación (Figura 5.18 (d)). En cualquier caso, ninguno de estos productos químicos llega a provocar el nivel de daño que se muestra en la Figura 5.17 para el caso de los ácidos (Figura 5.18 (f)).

En el caso del hidróxido de sodio y del cloruro sódico, al filtrarse el producto a través del pavimento se produjo la formación de criptoeflorescencias [59], al precipitar las sales a cierta distancia de la superficie en depósitos que presionan la capa y producen abombamientos (Figura 5.18 (d) y Figura 5.18 (f)). Ocurrió incluso que en los pavimentos acabados con corindón se desprendió la capa superficial que cubría el endurecedor superficial (corindón), dejándolo al descubierto.





**Figura 5.18:** (a). Daño en el pavimento acabado con hierro provocado por su exposición a la lejía durante 14 días. (b) Formación de sulfato cálcico dihidratado cristalizado en la superficie del pavimento por efecto del ácido sulfúrico. (c) Capa superior aislante formada por el ácido fluorhídrico en el pavimento. (d) Eflorescencias provocadas por el hidróxido de sodio en el pavimento acabado con cemento a los 14 días. (e) Sales solubles de la descomposición del hormigón por efecto de la mezcla de ácido acético más el ácido propiónico. (f) Formación de criptoflorescencias

Aunque los pavimentos acabados con hierro y corindón tienen un mal comportamiento debido a la acción de los ácidos y de los otros productos químicos mencionados, son los pavimentos que no han sido pulidos o los que han sido pulidos sin ningún tipo de endurecedor superficial los que peor comportamiento parecen tener frente a la exposición a medios químicamente agresivos. El pavimento regleteado merece una mención especial, ya que por sus imperfecciones superficiales y su gran porosidad; es decir, al tener expuesta un área mayor, los ácidos le hacen más daño que al resto, con lo que la lectura de las profundidades de penetración de los mismos se hizo muy complicada.

En general parece que aquellos pavimentos que tienen algún tipo de endurecedor superficial presentan una mayor resistencia a ataques químicos que aquéllos que han sido solamente pulidos o ni siquiera eso. Por lo tanto, uno de los aspectos destacables es que la resistencia a medios químicamente agresivos tiene una relación con la resistencia a penetración de agua del medio y con su densidad. Es decir, cuanto mayor es la porosidad del hormigón, más expuesto se encontrará al ambiente y los efectos dañinos ocurrirán en una superficie mayor.

### 5.3. CONCLUSIONES

La primera conclusión es que un pavimento industrial de hormigón, donde vaya a haber agresiones fuertes deberá estar pulido, ya que en el pavimento regleteado, en el único ensayo donde se obtuvieron resultados óptimos fue en el de resistencia a impacto, pero en la mayoría de las ocasiones el impacto y la abrasión van unidos (por ejemplo al paso de un tractor de oruga), y en el caso de la abrasión el pavimento regleteado tuvo los peores resultados.

Por otra parte, de los resultados de los ensayos, se desprende que el pavimento solamente pulido, sin incorporar endurecedor superficial, pese a tener unas características mejores que el pavimento regleteado, es el que peores características presenta con respecto al resto de acabados, excepto en el caso del impacto. El pavimento pulido al que se le añade cemento como endurecedor superficial resiste menos y es más permeable que el pavimento pulido sin endurecedores. Sin embargo, en cuanto a la resistencia a la abrasión, el pavimento simplemente pulido presenta peores características que ninguno, mientras que el pavimento pulido con cemento como endurecedor es el que mejores propiedades tiene siempre y cuando se le permita alcanzar un grado de hidratación adecuado. Además, los dos sufrieron el ataque de los ácidos bastante más que aquellos con otros tipos de

endurecedores. De este modo, ambos pavimentos deberían ser empleados en zonas de tráfico suave, preferiblemente peatonal o con tráfico de vehículos ligeros, en zonas donde no vayan a sufrir agresiones químicas.

En cuanto a los pavimentos en los que se usó un endurecedor superficial a base de cuarzo o corindón, presentan en general resultados muy parecidos entre sí, aunque el pavimento acabado con corindón tuvo más resistencia al impacto y el pavimento acabado con cuarzo más resistencia a la abrasión. Sin embargo, estos resultados no tienen tantas diferencias como con los pavimentos simplemente pulidos o endurecidos con cemento. Además, los pavimentos con cuarzo o corindón son más impermeables y tienen mejor resistencia al ataque químico que estos últimos.

En el caso del pavimento acabado con hierro, su característica principal es que posee una resistencia a impacto mayor que cualquier otro de los pavimentos estudiados, con la excepción del pavimento regleteado. Sin embargo, su resistencia a la abrasión a 28 días es inferior que la de los pavimentos acabados con cuarzo o corindón y muy similar a la del pavimento pulido sin endurecedores. Asimismo, el pavimento acabado con virutas de hierro es bastante más sensible que el resto a productos químicos como la lejía o las sales, ya que las virutas de hierro se oxidan con mucha facilidad, aumentando de volumen y provocando el desprendimiento del acabado del pavimento. Este pavimento debería utilizarse por ejemplo en el caso del paso de tractores con ruedas de oruga o en lugares donde se prevea que será necesaria una resistencia a impacto especial. Además este pavimento no debería ser expuesto a la intemperie o ser tratado con productos de limpieza agresivos.

Finalmente, cabe señalar que el endurecedor superficial será elegido llegando a un equilibrio entre el uso que se le vaya a dar al pavimento y las circunstancias económicas del contratista (ver Anexo V). No existe un acabado bueno o malo, sino un acabado para cada uso.