



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



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, 2.007

A los que buscan...

Si ya no es que esto sea burla pensada, no me puedo persuadir que hombres de tan buen entendimiento como son, o parecen, todos los que aquí están, se atrevan a decir y afirmar que ésta no es bacía, ni aquella albarda; más como veo que lo afirman y lo dicen, me doy a entender que no carece de misterio el porfiar una cosa tan contraria de lo que nos muestra la misma verdad y la misma experiencia; porque voto a tal, que no me den a entender que ésta no sea bacía de barbero, y ésta albarda de asno.

Don Quixote de la Mancha. Capítulo XLV.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a todos aquellos que me apoyaron en estos tres años, con especial atención a los profesores Daniel Castro y Juan Antonio Polanco, que me acompañaron y sufrieron conmigo en el día a día del desarrollo de la investigación.

Mi más sincero agradecimiento al profesor Enrique Castillo por sus sabios consejos y por la ayuda prestada desde que elegí esta profesión. Nunca antes me habían dado tanto por tan poco y sin él no habría hecho este trabajo.

Gracias a la empresa SIEC S.A., que me proporcionó todos los medios materiales necesarios para realizar la Tesis.

Gracias a Jorge, Joseba, David, Elena y Luis, porque han sido unos compañeros de viaje excelentes.

Gracias al arquitecto Luis Moreno, a él le debo la mitad de mi Tesis (tanto si es buena como si no). Siento si le hice pasarlo mal.

Gracias a mis padres, Diego y Catalina, porque siempre han estado ahí y porque nunca permitieron que me faltara nada.

Gracias a María Luisa, por ayudarme tanto, motivarme día a día y darme esperanzas aunque todo se viera mal. Sin ella este trabajo tampoco se hubiera hecho (o al menos no lo hubiera hecho yo, con lo que nunca habría sido así).

Por último, gracias a todos los que crean que deben estar aquí y mi mala cabeza ha hecho que me olvide de ellos, créanme, lo siento.

Muchas gracias

INDICE

1. TESIS DOCTORAL	8
1.1. HIPOTESIS	8
1.2. JUSTIFICACIÓN	8
1.3. OBJETIVOS.....	9
1.3.1. Objetivos generales.....	9
1.3.2. Objetivos específicos	10
1.4. INTRODUCCIÓN.....	10
2. ASPECTOS BÁSICOS DEL HORMIGÓN HECHO CON CEMENTO PORTLAND.....	14
2.1. COMPONENTES PRINCIPALES DEL CLINKER DE PORTLAND.....	14
2.2. ASPECTOS QUÍMICOS DE LA HIDRATACIÓN DEL CEMENTO PÓRTLAND....	15
2.3. ETAPAS DE LA HIDRATACIÓN	16
2.3.1. Estados del agua	20
2.4. ASPECTOS FÍSICOS DE LA HIDRATACIÓN.....	21
2.4.1. Prefraguado	23
2.4.2. Fraguado	26
2.4.3. Postfraguado.....	27
2.5. VARIACIÓN DE LA PRESIÓN HIDRÁULICA EN LA MASA DURANTE EL FRAGUADO	27
2.5.1. Porosidad y exudación del hormigón	29
2.6. HIDRATACIÓN DEL CEMENTO PÓRTLAND.....	31
2.7. FUERZAS ENTRE PARTÍCULAS EN LOS PRIMEROS MOMENTOS DE LA HIDRATACIÓN.....	34
2.7.1. Tensión capilar	36
2.7.2. Influencia del vibrado	40
2.8. DESARROLLO DE RESISTENCIAS EN EL HORMIGÓN CON EL TIEMPO	41
3. EVOLUCIÓN DE LA RESISTENCIA A PENETRACIÓN EN EL HORMIGÓN FRESCO	43
3.1. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	48
3.2. MATERIALES EMPLEADOS EN EL ESTUDIO	50
3.3. ESFUERZOS SOBRE EL PENETRADOR	52
3.4. MODELOS DE ESTADO CRÍTICO	56
3.4.1. Definición de las constantes elásticas	61
3.5. COMPORTAMIENTO DEFORMACIONAL DEL HORMIGÓN FRESCO	65
3.5.1. Trayectorias deformacionales al cambiar la energía cinética del sistema.....	68
3.5.2. Trayectorias deformacionales a lo largo del tiempo	70
3.5.3. Superficie de fluencia para incrementos de la tensión vertical	72
3.5.4. Superficie de fluencia en el tiempo.....	76
3.5.5. Relación entre las superficies de fluencia	80
3.5.6. Evolución de la resistencia a la penetración de un hormigón fresco	84
3.5.7. Resultados experimentales, discusión y validación del modelo	87

3.6. CONCLUSIONES.....	91
4. INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA EN EL FRAGUADO DE HORMIGÓN	93
4.1. DESARROLLO TEÓRICO.....	96
4.1.1. Estimación del tiempo de fraguado.....	96
4.1.2. Métodos de madurez.....	97
4.2. METODOLOGÍA Y MATERIALES USADOS.....	101
4.3. RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	102
4.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	105
4.4.1. Ensayos de Vicat.....	105
4.4.2. Hormigones.....	107
4.5. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	108
4.6. CONCLUSIONES.....	110
5. DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS ACABADOS SUPERFICIALES DE UN PAVIMENTO DE HORMIGÓN.....	111
5.1. PAVIMENTO EXPERIMENTAL.....	114
5.1.1. Preparación del pavimento.....	114
5.1.2. Extracción de las muestras.....	116
5.2. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN.....	119
5.2.1. Resistencia a compresión.....	119
5.2.2. Resistencia a tracción indirecta (Ensayo Brasileño).....	119
5.2.3. Densidad.....	120
5.2.4. Profundidad de penetración de agua.....	121
5.2.5. Resistencia al impacto.....	123
5.2.6. Resistencia a la abrasión.....	125
5.2.7. Resistencia al ataque químico.....	128
5.3. CONCLUSIONES.....	135
6. RESISTENCIA AL IMPACTO DE PAVIMENTOS DE HORMIGÓN DOTADOS DE ACABADO SUPERFICIAL.....	137
6.1. INTRODUCCIÓN.....	137
6.1.1. Características de los impactos sobre el hormigón.....	140
6.1.2. Daño ocasionado al hormigón debido a impactos repetidos (fatiga).....	145
6.2. MEDICIÓN DEL DAÑO ACUMULADO DEL PAVIMENTO SUJETO A IMPACTOS REPETIDOS MEDIANTE LA VARIACIÓN DE LA PROFUNDIDAD DEL CRÁTER PRODUCIDO.....	149
6.3. MEDICIÓN DEL DAÑO ACUMULADO POR IMPACTOS EN UN PAVIMENTO DE HORMIGÓN MEDIANTE EL USO DE GALGAS EXTENSIOMÉTRICAS.....	155
6.3.1. Medidas en la chapa de carga.....	157
6.3.2. Resultados experimentales.....	159
6.3.3. Discusión de los resultados experimentales.....	161
6.4. MODELIZACIÓN MEDIANTE TÉCNICAS DE ELEMENTOS FINITOS DE LA RESISTENCIA A IMPACTO DE UN PAVIMENTO DE HORMIGÓN.....	165
6.4.1. Análisis explícito de elementos finitos.....	166
6.4.2. Modelos de elementos finitos desarrollados.....	167
6.4.3. Elección del material hormigón.....	172
6.4.4. Resultados y discusión del modelo de elementos finitos.....	179

6.5. CONCLUSIONES	187
7. <i>MODELO DE EVOLUCIÓN DEL DESGASTE POR ABRASIÓN EN UN PAVIMENTO DE HORMIGÓN</i>	189
7.1. METODOLOGÍA Y MATERIALES USADOS	191
7.1.1. Ensayo de abrasión	191
7.1.2. Materiales.....	191
7.1.3. Procedimiento experimental.....	192
7.2. RESULTADOS EXPERIMENTALES	193
7.3. MODELO TEÓRICO	194
7.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	199
7.5. CONCLUSIONES	206
8. CONCLUSIONES	208
8.1. LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN Y TRABAJOS FUTUROS	215
9. BIBLIOGRAFÍA	217
I. DOCTORAL THESIS	233
I.I HYPOTHESIS	233
I.II JUSTIFICATION	234
I.III OBJECTIVES	234
I.III.I General Objectives	234
I.III.II Specific Objectives	235
I.IV INTRODUCTION	236
II. CONCLUSIONS	239
II.I CHAPTER 3: EVOLUTION OF PENETRATION RESISTANCE IN FRESH CONCRETE	239
II.II CHAPTER 4: MATURITY APPROACH APPLIED TO CONCRETE BY MEANS OF VICAT TESTS.	241
II.III CHAPTER 5: EFFECT OF DRY SHAKING TREATMENT ON CONCRETE PAVEMENT PROPERTIES	244
II.III.I Water absorption	245
II.III.II Impact resistance	245
II.III.III Abrasion resistance	245
II.III.IV Chemical resistance	246
II.III.V General Conclusion	246
II.IV CHAPTER 6: EFFECT OF DRY SHAKING TREATMENT ON CONCRETE PAVEMENT PROPERTIES	246
II.V CHAPTER 7: A MODEL FOR THE ABRASIVE WEAR EVOLUTION IN A CONCRETE PAVEMENT	249
II.VI FUTURE RESEARCH LINES	252

- ANEXO I. DATOS DE VARIACIÓN DE LA PROFUNDIDAD DEL CRÁTER CON EL TIEMPO SOBRE HORMIGÓN FRESCO CON DOS TIPOS DE PROYECTILES DIFERENTES (DATOS USADOS PARA PROGRAMAR LOS ENSAYOS).
- ANEXO II. DATOS DE VARIACIÓN DE LA PROFUNDIDAD DEL CRÁTER CON EL TIEMPO SOBRE HORMIGÓN FRESCO.
- ANEXO III. DATOS DE ENSAYOS DE VICAT TOMADOS A DIFERENTES TEMPERATURAS PARA LOS CEMENTOS ESTUDIADOS.
- ANEXO IV. APUNTES SOBRE LOS ATAQUES QUÍMICOS EN LAS PROBETAS DE HORMIGÓN.
- ANEXO V. CLASIFICACIÓN DE LOS ACABADOS SUPERFICIALES DE PAVIMENTOS Y USOS MÁS RECOMENDABLES PARA LA INDUSTRIA.
- ANEXO VI. CÓDIGOS DE LAS SIMULACIONES REALIZADAS EN LOS PROGRAMAS DE ELEMENTOS FINITOS.
- ANEXO VII. MICRODEFORMACIONES EN LA CHAPA MEDIDAS EN IMPACTOS SUCESIVOS SOBRE PROBETAS CONDIFERENTES ACABADOS SUPERFICIALES.
- ANEXO VIII. PARÁMETROS DE LAS CURVAS DE ABRASIÓN PARA LOS DIFERENTES CASOS ESTUDIADOS.

1. TESIS DOCTORAL

El estudio emprendido pretende aportar un avance en el conocimiento de los hormigones utilizados para la ejecución de pavimentos industriales.

1.1. HIPOTESIS

Las hipótesis de partida para el desarrollo de esta investigación han sido las siguientes:

- Existe un momento óptimo durante el fraguado del hormigón para pulir un pavimento hecho de este material.
- Además del ensayo convencional de Vicat para la determinación del periodo de fraguado, el conocimiento de la energía de activación del cemento incorporado en el hormigón puede aportar una valiosa información para su caracterización.
- Aunque en la actualidad se emplean distintas soluciones para mejorar el acabado superficial de estos pavimentos, no existe una clasificación ni una comprobación de las ventajas que supone su utilización.
- El ensayo usado actualmente para conocer la resistencia al impacto de un pavimento dotado de un acabado superficial específico, no es el más adecuado para el estudio de esta característica, ya que canaliza las tensiones hacia la masa de hormigón, soslayando la fina capa de acabado.
- Puede plantearse un modelo que sirva para predecir la evolución de la abrasión en el hormigón, por efecto de las cargas de tráfico actuantes sobre el pavimento.

1.2. JUSTIFICACIÓN

Como primera motivación puede mencionarse el ahorro económico que estos pavimentos suponen para las empresas del sector. Sus costes de construcción, en relación con los costes totales de una construcción industrial, constituyen aproximadamente un 20% del total. Por otra parte, en la literatura técnica apenas existen publicaciones con respecto a este tema.

La idea de esta Tesis Doctoral nació en el año 2004, cuando la empresa SIEC S.A. propuso la realización de un proyecto a la Universidad de Cantabria que tuviera como resultado algún tipo de sistema de control para solucionar la incertidumbre que surge a la hora de fijar el momento idóneo para iniciar el pulido de los pavimentos de hormigón que ellos realizaban, así como la posibilidad de proporcionar una guía en cuanto al diseño del acabado del pavimento, mediante el establecimiento de una clasificación de pavimentos de hormigón para usos industriales, dado que no se conocen muy bien las características funcionales de los mismos.

1.3. OBJETIVOS

A continuación, se detallan los objetivos de esta investigación, que definen las características, alcances y desarrollo de la Tesis. Los objetivos generales recogen los puntos básicos a estudiar y los objetivos específicos muestran, de manera resumida, la forma de llegar a estos objetivos generales.

1.3.1. Objetivos generales

Objetivo 1. Realizar un estado del arte acerca de la evolución de las propiedades del hormigón durante el fraguado y del comportamiento de un pavimento de hormigón pulido bajo las principales sollicitaciones mecánicas a las que estará sometido.

Objetivo 2: Definir un método que permita, de una manera sencilla, determinar el momento óptimo de pulido de un pavimento de hormigón.

Objetivo 3: Analizar la influencia de la temperatura ambiental en la aparición y duración del periodo de pulido mencionado.

Objetivo 4: Realizar un estudio comparativo de los acabados superficiales más empleados en pavimentos de hormigón.

Objetivo 5: Realizar un análisis del comportamiento del acabado bajo cargas de impacto, cuantificando sus efectos beneficiosos.

Objetivo 6: Plantear un modelo de la evolución de la abrasión de un pavimento de hormigón, en función de las cargas de tráfico actuantes.

1.3.2. Objetivos específicos

Objetivo específico 1: A partir de los estudios sobre el comportamiento del hormigón, tanto fresco como endurecido, se analizarán los datos de forma que se obtengan los conocimientos básicos para la elaboración de la Tesis Doctoral y su comprensión por el lector.

Objetivo específico 2: Revisar los métodos experimentales existentes para la determinación del fraguado del hormigón, ponderando la viabilidad de su implantación sencilla en obra.

Objetivo específico 3: Realizar un estudio del fraguado del hormigón, de manera que pueda comprobarse cómo la energía de activación puede ser hallada a partir de ensayos de Vicat a diferentes temperaturas.

Objetivo específico 4: Realizar ensayos de abrasión, resistencia al impacto, ataque químico, penetración de agua y densidad a partir de una serie de pavimentos experimentales con distintos tipos de acabado, hechos en condiciones reales, con el fin de comparar los resultados entre sí.

Objetivo específico 5: Analizar el comportamiento del pavimento de hormigón en el momento del impacto, a partir de datos obtenidos mediante análisis dinámicos, tanto experimentales como simulados con un método de elementos finitos.

Objetivo específico 6: Analizar la resistencia a la abrasión de un pavimento de hormigón, obteniendo un modelo que sirva como base para posibles estudios posteriores sobre la vida útil del mismo en función del tráfico circulante.

1.4. INTRODUCCIÓN

Los suelos de hormigón se utilizan desde hace mucho tiempo, pero ha sido sólo recientemente que su doble rol como distribuidor de cargas y superficie de acabado ha hecho que surjan numerosas investigaciones sobre el tema [67, 74, 79, 199, 116].

En las primeras décadas del siglo XX, los suelos de hormigón eran una buena manera de conseguir una plataforma resistente a las cargas en una fábrica o almacén. Se colocaban en pequeñas placas, de 6 por 4.5 m, según el tamaño disponible de las hormigoneras, dejando los contactos tanto libres como unidos por juntas preformadas. Eran acabadas mediante allanadoras o fratasadoras para dar una calidad adecuada a los requerimientos del usuario en cada momento.

La aparición de plantas de hormigonado posibilitó la producción de grandes volúmenes de hormigón para ser colocados sin interrupción, afianzándose, así, la construcción en grandes placas. El desarrollo de los materiales plásticos, que permite el curado con sólo una protección superficial, subrayó la necesidad de proveer refuerzo y de realizar juntas para evitar los daños por retracción. Las placas eran de 4.5 m de ancho y de 18 a 24 metros de largo. Las losas comenzaron a incorporar los pasadores de los primeros trabajos que se habían hecho, pero fueron desapareciendo gradualmente. Esta fue la forma normal de construcción desde los años 60 hasta los 80 del siglo XX. Técnicas de aplicación como el pretensado y el uso de reglas vibratorias ayudaron a completar losas más largas.

El uso de ordenadores introdujo cambios fundamentales en el desarrollo de los suelos industriales. Las demandas de los usuarios cada vez apuntaban más a plataformas sobre suelos de malas condiciones y con poco aislamiento. Por otra parte, los vehículos de ruedas duras introducían altos puntos de carga y requerimientos de superficies muy planas para alcanzar la velocidad adecuada. Esto llevó a la producción de pavimentos superplanos, con requisitos muy estrictos.

A principios de los 80, se introduce el concepto de “hormigonado continuo”. Esto implicaba que el hormigón fuera de consistencia fluida, conseguida mediante el uso de aditivos superplastificantes, y los extendidos eran monitoreados por láser. La superficie de losa ejecutada sólo estaba limitada por la cantidad de hormigón que se pudiera producir, colocar y acabar cada jornada. Ya que el espesor de la placa oscila de 70 a 350 mm, el área de las mismas variaría entre los 1500 y 4000 m². Estas losas contenían un pequeño refuerzo y eran, a menudo, acabadas con un endurecedor de superficie o con un agregado mineral para producir una superficie más atractiva y durable.

Este proceso pronto se mecanizó mediante el uso de la regla láser, con la que se colocaba el hormigón con una pérdida mínima de material. Estos pavimentos, también, necesitaban ser compartimentados en cuadrados y rectángulos de tamaño adecuado.

El desarrollo de la industria logística forzó el progreso de las losas de hormigón para pavimentos industriales. Actualmente, el uso de los suelos industriales de hormigón es muy variado, pues las losas sirven de plataforma para todo tipo de operaciones, desde el tránsito de vehículos pesados hasta la ubicación de oficinas en ellos. Para el proyectista, el tipo, el uso, la naturaleza de las cargas y las tolerancias de la superficie son críticas para el diseño.

En consecuencia, los requisitos en los suelos industriales son correspondientemente versátiles y exigentes. Sus costes de ejecución, en relación con los costes totales de una construcción industrial, constituyen aproximadamente un 20% del total. A pesar de ello, en la literatura técnica apenas existen publicaciones al respecto.

En cuanto al trabajo realizado, esta Tesis ha sido realizada entre el Departamento de Transportes y Tecnología de Proyectos y Procesos y el Laboratorio de Ingeniería de Materiales de la Universidad de Cantabria y dirigida por los profesores don Daniel Castro Fresno y don Juan Antonio Polanco Madrazo. Al estar enmarcada dentro de los convenios realizados por la Universidad de Cantabria con la empresa SIEC S.A., el trabajo fue planteado desde el principio de tal manera que los resultados obtenidos tuvieran alguna orientación práctica para la solución de dos grandes problemas:

1. El momento óptimo de fratasado de un pavimento de hormigón
2. La realización de una clasificación de pavimentos industriales en función de su uso

Teniendo en cuenta que, teóricamente, el momento óptimo de pulido coincide con el inicio de fraguado [79], para la solución del primer problema se plantea un análisis del comportamiento del hormigón durante el proceso de fraguado, a través de algún método que sea fácilmente aplicable en la obra. Aunque ya existen ensayos que permiten conocer los tiempos de fraguado del pavimento, al encontrar algunas incongruencias en ellos, se decidió dar un nuevo enfoque al tema. Así, a lo largo de los Capítulos 2 y 4 se han sentado las bases de una investigación posterior al desarrollar los conceptos científicos básicos para la realización de un nuevo ensayo destinado a sustituir el descrito en la norma ASTM C403 [17], así como una nueva metodología mucho más simple que las presentadas

anteriormente, para conocer la influencia de la temperatura en el fraguado del hormigón y, por ende, en el momento óptimo de pulir el pavimento.

En cuanto a la solución del segundo problema, a partir de la realización de seis pavimentos experimentales con los acabados más representativos existentes actualmente, en el Capítulo 5 se plantea un análisis comparativo entre ellos mediante la realización de diferentes tipos de ensayos. Por otra parte, durante la identificación de los problemas que afectan a un pavimento de hormigón se observó que algunos de los principales eran la acción de las ruedas de los vehículos, tanto por impacto como por abrasión [95]. De este modo, en el Capítulo 6 se lleva a cabo un análisis del comportamiento dinámico del pavimento durante un impacto para conocer el efecto protector del acabado sobre la losa. Para ello, se han empleado técnicas físicas de toma de datos, en un nuevo tipo de ensayo que permite evaluar el daño acumulado en las probetas, comparando los datos con los resultados obtenidos en un programa de elementos finitos. Además, en el Capítulo 7 se propone un modelo del comportamiento dinámico a abrasión de un pavimento de hormigón, hallando conclusiones similares a las de Sadegzadeh et al. [150] y obteniendo un modelo estadístico que servirá de base para posibles estudios posteriores.