



Escola de Camins

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

TESIS DE MÀSTER

Màster

Ingeniería Estructural y de la Construcción

Título

Caracterización de la adherencia en refuerzos de Ultra-Thin
Whitetopping (UTW)

Autor

Janill M. De la Cruz Romero

Tutor

Pablo Pujadas Álvarez
Sergio H. Píalarissi Cavalaro

Intensificación

Ingeniería de la Construcción

Fecha

Febrero 2016

AGRADECIMIENTOS

A Dios que sin él no hubiera tomado el camino correcto en mi vida; el que nos ilumina y el que nos ayuda a poder lograr todas nuestras metas; el que brindó la fuerza cuando me sentía ahogada.

Mis padres, Rey Eduardo De la Cruz y Kenya Romero, que sin ellos no soy nadie, me dieron la vida, el apoyo incondicional, entendieron mis ausencias y fueron los que siempre creyeron en mí, brindándome su apoyo moral y económico lo cual estaré agradecida eternamente.

Mi hermana Katherine De la Cruz, por su apoyo sin condiciones, por enseñarme lo correcto y por creer en nuestro intelecto de que si lo podría lograr.

A mis tutores Sergio H. Pialarissi y Pablo Pujadas, por su gran apoyo en la realización de la tesis. A Sergio por brindarme todos sus sabios conocimientos, y en especial por su gran motivación que siempre me brindaba. A Pablo Pujadas por brindarme sus consejos y sus enseñanzas, al siempre darme nuevas ideas de mejoras y siempre estar presente para aclarar cualquier duda surgida en cualquier momento.

Por otro lado, agradecer a Rubén López, por su compañía durante la realización de la campaña experimental, además de que me orientó en toda la parte de práctica de mi trabajo, siempre dispuesto a aportar a la Tesis con numerosos comentarios y nuevas ideas.

A los miembros del Laboratorio: Camilo, Robert, Carlos, Jordi y Tomás, por la ayuda prestada durante la realización de la campaña experimental, por siempre estar dispuestos a ayudar y los momentos divertidos que alegraban el trabajo.

Y para finalizar, gracias a mis queridos compañeros y amigos: Heriberto Peña, Karen Cabrera, Oriana Torres, Julio Báez, y en especial a Marcos Barboza, que de una u otra forma me ayudaron tanto con el transcurso de mi carrera de Máster como la Tesis de Máster, acompañándome en los momentos de crisis como de felicidad.

RESUMEN

El uso moderno del asfalto para carreteras y construcción de calles comenzó a finales del siglo pasado, y creció rápidamente el surgimiento de la industria automotriz. Desde entonces, la tecnología del asfalto ha dado grandes pasos con el objetivo de obtener la reducción de los costes de mantenimiento. Hoy en día un tipo de rehabilitación de pavimentos asfálticos es el Whitetopping, el cual se conoce como el recubrimiento de un pavimento asfáltico existente con una capa de hormigón de cemento Portland.

Los Whitetopping se clasifican dependiendo del espesor de la losa, si es superior a 200 mm se considera Whitetopping convencional (CWT), este se caracteriza por su diseño ya que no considera adherencia entre el asfalto y el hormigón. Los espesores de 100 a 200 mm se consideran delgados (TWT), estos se diseñan y construyen generalmente con una adherencia intencionada. Los espesores inferiores a 100 mm se consideran Whitetopping ultra-delgado (UTW), donde es obligatorio una maximización de la adherencia entre las capas para lograr un buen funcionamiento.

Para la investigación a realizar, se observarán los diferentes tipos de adherencia entre la base y el whitetopping, con el fin de analizar la capacidad de resistencia. Los métodos de adherencia entre capas a utilizar serán: La técnica de adherencia sin tratamiento, el Abujardado, ligante asfáltico, con emulsión bituminosa (ECR1), la emulsión bituminosa + arena 2/5mm (ECR2), y para finalizar la técnica de adherencia de una imprimación asfáltica + polvo.

Con el fin de valorar la adherencia se realizarán ensayos a tracción "Pull-out", ensayos LCB y de Slant Shear. Se evaluará la influencia de la rugosidad en la superficie de las probetas asfálticas. Además se propone realizar análisis de correlaciones de los ensayos entre sí, con el fin de determinar si algunos ensayos puedan depender del otro.

En cuanto a los ensayos, se determinará cuál es el más adecuado, para probar la adherencia en la interfaz asfalto-hormigón, realizando una evaluación llamada Múltiples Criterios de Evaluación (MCA). Finalmente, se realizará un análisis sobre el criterio de rotura, para poder identificar el fallo mayor de la adherencia en la interfase.

ABSTRACT

The modern use of asphalt road and street construction began late last century and quickly grew the rise of the automobile industry. Since then, the asphalt technology made great steps in order to obtain a reduction in maintenance costs. Today a type of asphalt pavement rehabilitation is whitetopping, which is known as the coating of an existing asphalt pavement with a layer of Portland cement concrete.

A whitetopping overlay is constructed when a new Portland cement concrete layer is placed on top of an existing HMA pavement system. The concrete thickness for a UTW is equal to or less than 100 mm (4 in.). A TWT is greater than 100 mm (4 in.) but less than 200 mm (8 in.). Conventional whitetopping is an overlay of 200 mm (8 in.) or more, where it is mandatory maximizing the adhesion between the layers to achieve good performance.

For research to be performed, the different types of adhesion between the base and the whitetopping, in order to analyze the capacity of resistance are observed. The interlayer adhesion methods to be used are: The bonding technique untreated, bushhammering, asphalt binder with bitumen emulsion (ECR1), sand bitumen emulsion + 2 / 5mm (ECR2), and finally adhesion technique an asphalt primer + powder.

In order to evaluate the adhesion of tensile tests "Pull-out" LCB and Slant Shear tests are performed. The influence of the roughness measured on the surface of the asphalt specimen. It is further proposed perform correlation analysis tests each other, in order to determine whether some trials may depend on the other.

As for the tests, it determines what is most appropriate for testing adhesion on asphalt-concrete interface, performing a test called Multiple Evaluation Criteria (MCA). Finally, an analysis of the failure criterion will be held in order to identify the major fault of the adhesion at the interface.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	i
RESUMEN	iii
ABSTRACT	v
ÍNDICE	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE TABLAS	xiii
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Introducción	1
1.2 Razón de ser.....	2
1.3 Objetivos.....	3
1.3.1 Objetivo general	3
1.3.2 Objetivos específicos.....	3
1.4 Metodología y organización del documento	4
2 ESTADO DEL CONOCIMIENTO	7
2.1 INTRODUCCIÓN	7
2.2 ANTECEDENTES.....	8
2.3 FUNDAMENTOS DEL WHITETOPPING	9
2.3.1 Clasificación del Whitetopping	9
2.3.2 Comportamiento fundamental del Whitetopping	10
2.3.3 Ámbito de aplicación.....	11
2.4 DISEÑO DEL WHITETOPPING	11
2.4.1 Fundamentos del diseño	13
2.4.2 Características del Diseño	15
2.4.3 Consideraciones de lugar	16
2.4.4 Interacción Vehículo-Pavimento	17
2.5 CONSTRUCCIÓN DEL WHITETOPPING.....	22
2.5.1 Procedimiento Constructivo	22

2.5.2	Consideraciones técnicas y colocación del hormigón	24
2.5.3	Ejecución de las Juntas	25
2.5.4	Obtención de la adherencia entre capas.....	26
3	CAMPAÑA EXPERIMENTAL	29
3.1	Introducción	29
3.2	METODOLOGÍA DE LA CAMPAÑA EXPERIMENTAL.....	30
3.2.1	Técnicas de adherencia a estudiar	31
3.3	DOSIFICACIONES Y MATERIALES.....	31
3.3.1	Características del Asfalto	31
3.3.2	Características del hormigón	32
3.3.3	Materiales empleados en las juntas.....	34
3.4	Fabricación de las probetas	35
3.4.1	Fabricación de las bases de asfalto.....	35
3.4.2	Aplicación de los tratamientos de adherencia.....	37
3.4.3	Fabricación del Hormigón.....	41
3.4.4	Curado de las Probetas	42
3.5	EQUIPOS DE ENSAYO.....	43
3.5.1	Prensa Hidráulica para el ensayo de tracción.....	43
3.5.2	Prensa hidráulica para caracterización de materiales, ensayo LCB y Slant Shear.	44
3.6	METODOLOGÍA DE LOS ENSAYOS	45
3.6.1	Descripción de los ensayos	45
3.6.2	Caracterización del Asfalto	45
3.6.3	Caracterización del hormigón	47
3.6.4	Ensayo de tracción (“Pull-Out”).....	49
3.6.5	Ensayo LCB	50
3.6.6	Ensayo “Slant Shear”.....	51
4	ANÁLISIS DE RESULTADOS	53
4.1	INTRODUCCION	53

4.2	CRITERIO DE CHAuVENET	54
4.3	Ensayo de tracción (“pull-out”)	54
4.4	Ensayo lcb	57
4.5	Ensayo “SLANT SHEAR”	59
4.6	INFLUENCIA DE LA RUGOSIDAD	62
4.7	CORRELACIÓN DE ENSAYOS	64
4.8	CRITERIO PARA UN MÉTODO DE ENSAYO ADECUADO	65
4.9	CRITERIO DE ROTURA	67
5	Conclusiones.....	73
5.1	Introducción	73
5.2	Conclusiones generales	74
5.3	Conclusiones específicas	75
5.4	Futuras líneas de investigación	76
	Referencias.....	77
	Anejos	81
A.	RESULTADOS DEL ENSAYO PULL-OUT	82
B.	RESULTADOS DE ENSAYO LCB	83
C.	RESULTADOS DEL ENSAYO SLANT SHEAR.....	84

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Metodología a seguir durante la investigación.....	5
Figura 2.1 Evolución del UTW en Estados Unidos. Fuente:(Rasmussen, 2005)	9
Figura 2.2 Tipos de Recubrimientos(a). Efecto de la acción compuesta del comportamiento de UTW Y TWT cargado bajo a flexión (b). Fuente:(Boardman et al., 2004)	10
Figura 2.3 Extendedora de encofrado deslizante. Imagen extraída de GOMACO International.....	25
Figura 2.4 Corte donde las distorsiones exceden 50 mm. Extraída de (Han, 2005)	26
Figura 2.5 Aspecto del asfalto tras fresado (Rasmussen, 2004) (a) y aplicación de asfalto para nivelación (b).....	27
Figura 3.1 Procedimiento del programa experimental	30
Figura 3.2 Fases de fabricación de las probetas.....	35
Figura 3.3 Capazos de mezcla Bituminosa (a), Piezas de plástico para ensayo “Slant Shear” (b).	36
Figura 3.4 Trituración de la mezcla bituminosa (a), Calentamiento de la mezcla bituminosa en el horno (b), Calentamiento de las probetas metálicas en el horno(c), Calentamiento de la mezcla bituminosa en el hornillo(d).....	37
Figura 3.5 Preparación probeta de asfalto (a), Martillo percutor con pistón acoplado actuado (b).	37
Figura 3.6 Máquina de pistola de agujas (a), Fijación de probeta en molde metálico (b), Abujardado de la semi-probeta asfáltica (c), Probetas abujardadas (d).	38
Figura 3.7 Técnica de emulsión asfáltica ECR1.....	39
Figura 3.8 Cernido del árido (a), Colocación emulsión bituminosa (b), Colocación de los áridos (c), Técnica de emulsión asfáltica+ árido terminada (d).	40
Figura 3.9 Removido del producto mediante a un taladro de bajas revoluciones (a), Limpieza de la superficie (b), Aplicación del producto + polvo (c), extracción del polvo sobrante mediante a compresor (d).	41
Figura 3.10 Probetas Preparadas (a), Materiales listos para amasar en seco (b), adición del agua (c), adición del superplastificante (d).	42
Figura 3.11 Probetas hormigonadas (a), Conservación durante las primeras 24 horas (b).....	42
Figura 3.12 Probetas de asfalto protegidas por el molde (a), Probetas de asfalto desencofradas (b).....	43
Figura 3.13 Cámara climática (a), Probetas en la cámara climática (b).....	43
Figura 3.14 Máquina Pulidora (a), Prensa Hidráulica INSTRON (b).....	44

<i>Figura 3.15 Prensa Hidráulica IBERTEST</i>	<i>44</i>
<i>Figura 3.16 Ensayo LCB (a), ensayo de tracción pura (b) y ensayo “Slant Shear (c)”.</i>	<i>45</i>
<i>Figura 3.17 Medida de altura de probetas de asfalto (a), Pesado de una semi-probeta de asfalto (b).....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 3.18 Ensayo a Tracción Indirecta.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 3.19 Ensayo a Compresión.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 3.20 Transductores inductivos LVDT (a), Probeta de hormigón lista para ensayar (b).</i>	<i>48</i>
<i>Figura 3.21 Ensayo a Compresión simple del Hormigón.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 3.22 Fijación de la Probeta en la parte de la base de asfalto (a). Probeta lista a ensayar (b)</i>	<i>49</i>
<i>Figura 3.23 Esquema de fuerzas y tensiones actuantes sobre la disposición de la probeta. Fuente: (Calisto, 2007)(a). Probeta de Whitetopping lista para el ensayo LCB (b).....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 3.24 Disposición de la probeta en la prensa durante al ensayo (a), Distancia de la junta de la probeta al apoyo (b). Fuente: (Calisto, 2007).....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 3.25 Vista en planta probeta Slant Shear (a), Probeta Slant Shear lista a ensayar (b).</i>	<i>51</i>
<i>Figura 4.1 Gráfica Pull Out.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 4.2 Gráfica Ensayo a tracción con célula de carga de 5kN</i>	<i>56</i>
<i>Figura 4.3 Ensayo Pull-out junta sin tratamiento (a). Ensayo Pull-out junta abujardada (b).....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 4.4 Gráfica Ensayo LCB.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 4.5 Ensayo LCB con junta de tratamiento de ECR2+árido (a). Parte del Hormigón de refuerzo de la probeta LCB con junta de tratamiento de ECR2+árido (b)</i>	<i>59</i>
<i>Figura 4.6 Círculo de Mohr. Fuente: (Juan Pablo Rodríguez Ayuso, 2012).....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 4.7 Gráfica Ensayo Slant Shear.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 4.8 Gráfica Rugosidad Superficial-LCB.....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 4.9 Gráfico Pullout-LCB</i>	<i>64</i>
<i>Figura 4.10 Gráfico Pullout-Slant Shear.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 4.11 Gráfico Pullout-LCB</i>	<i>65</i>
<i>Figura 4.12 Criterio de rotura probetas sin tratamiento</i>	<i>69</i>
<i>Figura 4.13 Criterio de rotura probetas Abujardadas.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 4.14 Criterio de rotura probetas ECR1</i>	<i>71</i>

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 2.1 Modelos de diseño adoptadas de (Rasmussen, 2005) y (Han, 2005)</i>	12
<i>Tabla 2.2 Juntas de espaciamiento recomendada, adoptada de (Han, 2005)</i>	14
<i>Tabla 2.4 Tipos de textura y sus características más relevantes fuente: (Uniland cementera, s.a., fcc construcción, S.a., fundación cidaut, universitat Politecnica de catalunya, 2012)</i>	20
<i>Tabla 2.5 Rangos obtenidos en relación a las propiedades iniciales de textura, fricción y ruido fuente: (Uniland cementera, s.a., fcc construcción, S.a., fundación cidaut, universitat Politecnica de catalunya, 2012)</i>	21
<i>Tabla 2.6 Reparación pre-recubrimiento en un pavimento de asfalto existente adoptada de: (Han, 2005)</i>	22
<i>Tabla 3.1 Métodos de adherencia a utilizar</i>	31
<i>Tabla 3.2 Dosificación Asfalto</i>	32
<i>Tabla 3.3 Dosificación del hormigón</i>	32
<i>Tabla 3.4 Especificaciones técnicas del superplastificante.</i>	33
<i>Tabla 3.5 Especificaciones técnicas del superplastificante.</i>	33
<i>Tabla 3.6 Materiales empleados en las juntas</i>	34
<i>Tabla 3.7 Especificaciones técnicas de la imprimación asfáltica</i>	34
<i>Tabla 3.8 Materiales empleados en las juntas</i>	49
<i>Tabla 4.1 Resultados del ensayo Pull Out</i>	55
<i>Tabla 4.2 Resultados del ensayo Pull Out con célula de carga de 5kN</i>	56
<i>Tabla 4.3 Resultados del ensayo Pull Out</i>	58
<i>Tabla 4.4 Resultados del ensayo Slant Shear</i>	61
<i>Tabla 4.5 Resultados del ensayo Slant Shear esfuerzo normal y de corte</i>	62
<i>Tabla 4.6 Resultados rugosidad-LCB probetas fresadas</i>	63
<i>Tabla 4.7 Criterios de Evaluación MCA</i>	66
<i>Tabla 4.8 Valores de Criterios de Rotura</i>	72
<i>Tabla 4.9 Puntos de los diferentes tipos de técnicas de tratamiento de juntas</i>	72

1 INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

El desarrollo en la industria construcción de pavimentos, cada vez más propone nuevas técnicas y diseños para garantizar la durabilidad del pavimento. Al pasar del tiempo, se ha acrecentado el número de construcciones de obras viales, donde siempre se busca que el manteniendo cada vez sea más duradero.

Al momento de presentarse la decisión de rehabilitación de carreteras, sabemos que viene de la mano la preocupación por realizar obras de infraestructura que sean resistentes a los agentes externos, de manera que puedan ser diseñadas para una mayor duración.

Un tipo de rehabilitación es el Whitetopping, conocido como un recubrimiento de hormigón de refuerzo, construido sobre un pavimento asfáltico existente. Para garantizar una mayor durabilidad, es necesario tener la cuenta el factor adherencia. Una suficiente adherencia asegura de que el conjunto Whitetopping trabaje de forma monolítica, y así mejorar las capacidades resistentes.

Este trabajo pretende investigar el comportamiento de la adherencia frente a diferentes técnicas de adherencia, realizando estudios que permitan mostrar el

comportamiento y las diferencias entre las técnicas. Así también en establecer comparaciones que permitan verificar realmente cual es el más factible.

De esta manera los pavimentos Whitetopping servirían para proporcionar mayor durabilidad, teniendo una satisfactoria adherencia entre el asfalto y el hormigón, con esto se garantiza mejora de capacidades resistentes disminuyendo la posibilidad de deslizamientos diferenciales entre capas bajo cargas.

1.2 RAZÓN DE SER

Los daños por durabilidad en los pavimentos, ha sido un tema de interés para la población. Estos daños también tienen repercusiones económicas, que son puntos clave para determinar la rentabilidad de los proyectos, en este caso los pavimentos en general.

Una forma de alcanzar la reducción del mantenimiento vial, para el caso de los pavimentos Whitetopping, sería la de garantizar la adherencia en su interfaz. Para esto se recomienda el estudio de la adherencia que garantice una mayor durabilidad.

Existen normas y recomendaciones que contemplan la utilización de ensayos para la caracterización y control de la adherencia de los pavimentos Whitetopping. Entre ellas normativa española EHE-08 y la ASTM que refieren a ensayos sobre la adherencia.

El ensayo a tracción también conocido como el ensayo Pullout requiere la utilización de probetas whitetopping de tamaño de 100x200 mm. En este caso se fabricaron 30 probetas en total sobre todas las técnicas de adherencia.

La ejecución del ensayo LCB, considerado para medir la resistencia de la adherencia, requiere la utilización de probetas whitetopping de tamaño de 100x160 mm. Siguiendo los criterios generales para la realización del ensayo, donde se requiere un mínimo de probetas, en este caso se fabricaron 30 probetas en total sobre todas las técnicas de adherencia.

Para el ensayo de Slant Shear conocido como el ensayo de cizallamiento oblicuo, requiere la utilización de probetas whitetopping de tamaño de 100x200 mm. En este caso se fabricaron 7 probetas en total sobre todas las técnicas de adherencia.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general

El principal objetivo de este trabajo es determinar las propiedades resistentes de diferentes técnicas de adherencia entre mezcla bituminosa y hormigón. Si se logra una mayor adherencia en la interfaz, podemos garantizar una mayor vida útil en los pavimentos whitetopping. El trabajo a desarrollar, considera un gran avance tecnológico respecto a los Whitetopping ultra-delgados.

Para ello se plantean estudios con diferentes tipos de técnicas de adherencia, que puedan determinar qué tipo de técnica determine mayor durabilidad para maximizar la adherencia entre el asfalto y el hormigón de refuerzo.

1.3.2 Objetivos específicos

Para alcanzar el objetivo general planteado, se presentan en este sub-apartado una serie de objetivos específicos. Con el logro de estos objetivos podemos certificar que el principal ha sido alcanzado.

En cuanto a la fabricación y el análisis de los resultados, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Análisis sobre la literatura existente que permita conocer los factores que influyen en la adherencia del Whitetopping.
- Planificar una campaña experimental capaz de proporcionar los resultados necesarios para comparar los diferentes tipos de tratamientos para la adherencia del Whitetopping.
- Evaluar la influencia de los diferentes tipos de técnicas de adherencia, teniendo en cuenta una junta sin tratamiento.
- Conocer el comportamiento de los ensayos Pull-out, LCB y Slant Shear en función a las variaciones que presentan las distintas técnicas de adherencia en cada probeta ensayada.
- Analizar los resultados de los ensayos, según las diferentes tipos de técnicas de adherencia, a la vez analizar sobre posibles parámetros relativos a los ensayos realizados, con los que se deberá analizar un estudio de correlación.
- Evaluar la influencia de la rugosidad de las semi-probetas de asfalto, teniendo en cuenta la las juntas abujardadas.

- Determinar el ensayo más adecuado, mediante la evaluación llamada “Múltiples Criterios de Evaluación” (MCA).
- Mediante el plano de Mohr-Coulomb, realizar un estudio donde se ajuste los criterios de rotura de (lineal, Griffith, y un modelo propuesto)

1.4 METODOLOGÍA Y ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO

En este apartado se presentará todo el contenido que abarca el trabajo de la Tesis de Máster. El documento se ha organizado de manera que pueda satisfacer los objetivos planteados en el apartado anterior. Para esto se pretende seguir una metodología la cual se muestra a continuación:

- Estado del Conocimiento: de primera instancia, se revisa de forma crítica la bibliografía técnica para acotar el problema, y así mismo conocer cómo es abordado en la actualidad por otros autores. A partir de esta partida, surge la idea del desarrollo de la campaña experimental.
- Fabricación probetas: A partir de la determinación del estado del arte, se planteó una campaña experimental en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras Luís Agulló de la UPC, que mediante a los conocimientos adquiridos del estado del arte, se construyeron pavimentos de hormigón sobre asfalto (Whitetopping).
- Ensayos de Laboratorio: Luego de la fabricación de las probetas, se sometieron a ensayos de Pull-out, LCB y Slant Shear. Con el fin de determinar las propiedades resistentes de diferentes técnicas de adherencia entre mezcla bituminosa y hormigón.
- Análisis de los resultados: Obteniendo los resultados de los ensayos, se procedió a analizar los resultados con el fin de lograr una caracterización adecuada. Además de obtener los resultados de resistencias, se determinará la influencia de la rugosidad, se determinará el ensayo más adecuado para la valoración de la adherencia y mediante el plano de Mohr-Coulomb, se realizará un estudio donde determine los criterios de rotura de los ensayos.

Al tratarse de actividades que presentan una interrelación entre ellas, se presenta en la Figura 1.1 el procedimiento a seguir durante la investigación:

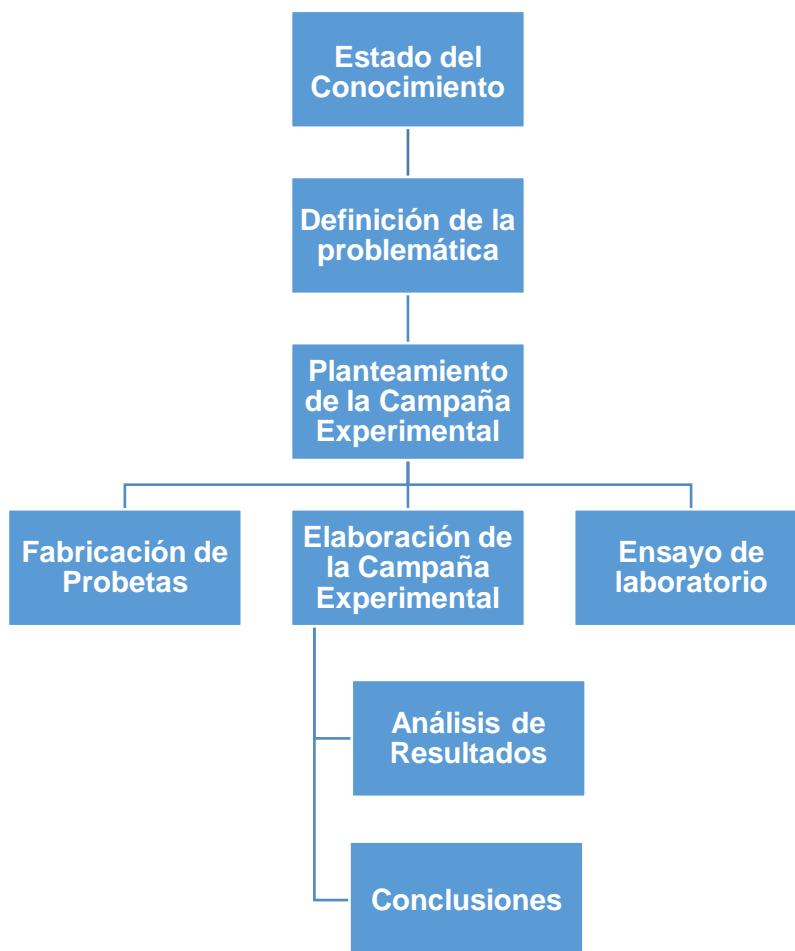


Figura 1.1 Metodología a seguir durante la investigación

El desarrollo del documento de la Tesis se ha organizado en forma de capítulos, donde se han dividido en cinco capítulos diferentes. Cada una de ellas se describe a continuación de manera sintética:

- El **Capítulo 1** introduce el documento de manera contextualizada destacando su importancia, donde se describe la razón de ser, los objetivos que deben cumplir junto con la metodología a seguir.
- En el **Capítulo 2** se realiza una revisión del estado del conocimiento de los pavimentos Whitetopping. En el se presentan fundamentos, construcción e influencia de la adherencia del Whitetopping, en esencial de los ultra delgados.
- En el **Capítulo 3** describe la campaña experimental realizada en el laboratorio. Muestra la metodología de la campaña experimental, donde describe las técnicas de adherencia a utilizar y la descripción de los ensayos. Luego las

dosificaciones, materiales empleados, la fabricación de las probetas y los equipos de ensayo empleados para los ensayos.

- En el **Capítulo 4** muestran los resultados obtenidos de la campaña experimental, éste incide en el análisis de los resultados de los ensayos realizados sobre la adherencia del asfalto-hormigón de refuerzo.
- Por último, en el **Capítulo 5** muestra las conclusiones obtenidas, a las que llega este documento, y a la vez plantea propuestas a investigaciones futuras.

2 ESTADO DEL CONOCIMIENTO

2.1 INTRODUCCIÓN

La reducción de costes de mantenimiento de la red viaria es un objetivo de interés común para el conjunto de la población. Una forma de alcanzar ese objetivo es mediante el empleo de técnicas más económicas y/o durables que las que se utilizan comúnmente en la actualidad.

Tradicionalmente, para el mantenimiento de este tipo de firmes se emplean técnicas consistentes en la colocación de una nueva capa asfáltica sobre el pavimento deteriorado. Como técnica alternativa surge el whitetopping, que consiste en colocar una capa de hormigón sobre el pavimento asfáltico a reforzar.

El objetivo del presente capítulo pretende mostrar las principales características del Whitetopping, así como los campos de aplicación de éste, así mismo describe la importancia de la interacción entre capas. De este modo, el lector puede tomar conocimiento sobre la importancia de la adherencia entre capas para la reparación de pavimentos Whitetopping.

El capítulo comienza sobre los antecedentes, destacando la necesidad de la rehabilitación de pavimentos, asimismo se detalla el fundamento del Whitetopping.

Además, se presenta detalladamente el diseño y construcción del Whitetopping. De este modo, el lector puede obtener conocimientos sobre la viabilidad del uso del Whitetopping y la importancia de la adherencia entre sus capas.

2.2 ANTECEDENTES

El uso moderno del asfalto para carreteras y construcción de calles comenzó a finales del siglo pasado, y creció rápidamente el surgimiento de la industria automotriz. Desde entonces, la tecnología del asfalto ha dado grandes pasos con el objetivo de obtener la reducción de los costes de mantenimiento.

En las construcciones de carretera básicamente existen tres tipos de pavimentos: los flexibles, rígidos y compuestos. Los flexibles se construyen mediante una mezcla asfáltica donde su vida estimada de servicio es entre 10 a 20 años. Los rígidos se construyen en base de hormigón donde su vida estimada de servicio es mayor a los 20 años y puede llegar a unos 50 años. Mientras que los compuestos se conocen como la rehabilitación del hormigón sobre asfalto o asfalto sobre hormigón. *(Dr. Ing. Andrés Sotil Chávez)*

Hoy en día un tipo de rehabilitación de pavimentos asfálticos es el Whitetopping, el cual se conoce como el recubrimiento de un pavimento asfáltico existente con una capa de hormigón de cemento Portland. *(Rasmussen, 2005).*

En la República Dominicana los pavimentos asfálticos constituyen el porcentaje total de carreteras en donde se deben realizar rehabilitaciones cada 5 años. En España los pavimentos asfálticos constituyen el 99% de la Red de Carreteras del Estado.

El Whitetopping como alternativa de mantenimiento ha venido desde hace más de 80 años, donde se ha utilizado para rehabilitaciones de aeropuertos, Carreteras primarias y secundarias, calles e incluso para estacionamientos, con el fin de mejorar su rendimiento, durabilidad y calidad de superficies deterioradas.

En los Estados Unidos se ha utilizado desde el 1918 donde su primera aparición fue en el Estado de Indiana, en donde se ha renovado el interés de utilizar el Whitetopping en los últimos 10 años, como resultado de varios proyectos de alto perfil de éxito.

Desde 1992, la ACPA (American Concrete Pavement Association), ha dado el seguimiento de la utilización de UTW (Ultra Thin Whitetopping) en los Estados Unidos

y donde se ha documentado más de 300 proyectos durante el período de 10 años, del 1992 al 2002. La figura 2.1 muestra el uso histórico de proyectos UTW en los Estados Unidos de acuerdo con las estadísticas de ACPA. El proyecto promedio, como se ha señalado en esta figura, aproximadamente 2500 m² (3000 yd²).

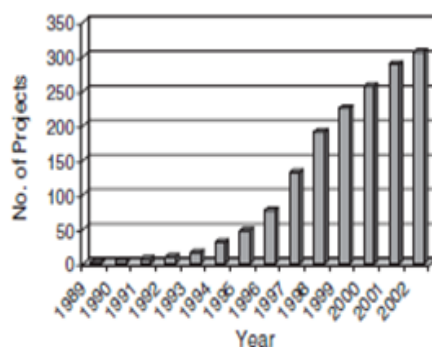


Figura 2.1 Evolución del UTW en Estados Unidos. Fuente:(Rasmussen, 2005)

En respuesta a la demanda provocada por el rápido deterioro de las carreteras con sólo un modesto incremento en la financiación, la industria de la pavimentación con hormigón ha adoptado Whitetopping como una estrategia clave de marketing. (Rasmussen, 2005).

2.3 FUNDAMENTOS DEL WHITETOPPING

Se conoce como Whitetopping al recubrimiento de hormigón realizado con cemento portland, construido en la parte superior de un sistema de pavimento asfáltico existente. Tratándose de una solución bicapa con materiales cuyas propiedades son disímiles y donde su comportamiento estructural depende del vínculo de adherencia que tengan entre ambos materiales.

Desde hace mas de 80 años ha existido la rehabilitación de pavimentos de asfalto en caliente (HMA) sobre hormigones en base a cemento Portland (PCC). Llamándose así en la Industria de la Ingeniería como “Whitetopping”, donde han sido utilizadas en aeropuertos, Carreteras primarias, secundarias y locales, calles, y estacionamientos con el fin de mejorar la durabilidad y calidad de las superficies de HMA que están deterioradas. (Boardman, York, & Dot, 2004)

2.3.1 Clasificación del Whitetopping

Los modelos de Whitetopping se pueden clasificar mediante a su espesor y la adherencia con el HMA. (Boardman et al., 2004)

- **Whitetopping Convencional (CWT):** Recubrimiento de hormigón con un espesor de 200 mm (8 pulg) o más, diseñada y construida sin consideración a la adherencia entre el hormigón y el pavimento Asfáltico.
- **Whitetopping Delgados (TWT):** Recubrimiento de hormigón con un espesor de más de 100 mm (4pulg) y menos de 200 mm (8pulg). En la mayoría, pero no todos los casos, este whitetopping se ha diseñado y construido con una unión intencional para el pavimento asfáltico (HMA).
- **Whitetopping Ultra Delgados (UWT):** Recubrimiento de hormigón con un espesor igual o inferior a 100 mm (4pulg). Este whitetopping requiere una adherencia con el HMA para lograr un buen desempeño.

La Adherencia entre la base de pavimento asfáltico y la losa de hormigón se pueden clasificar en:

- **Adherentes:** Capa de Hormigón construida directamente sobre de un pavimento existente. En la construcción se emplean técnicas para garantizar la adherencia entre capas.
- **No Adherentes:** Capa de Hormigón construida directamente encima de un pavimento existente pero separadas intencionalmente para inferir con la adhesión. Como se muestra en la figura 2.2.a.
-



Figura 2.2 Tipos de Recubrimientos(a). Efecto de la acción compuesta del comportamiento de UTW Y TWT cargado bajo a flexión (b). Fuente:(Boardman et al., 2004)

2.3.2 Comportamiento fundamental del Whitetopping

El Whitetopping delgado (TWT) y ultra delgado (UTW) proporcionan una estructura de pavimento único que es fundamentalmente diferente de otros tipos de pavimento. En los UTW, y en muchos de los casos de TWT están diseñados y construidos con la consideración de garantizar la adherencia entre el PCC y materiales de HMA. Respecto a los ultra-delgados, se exige una maximización de la adherencia entre capas, pues es el factor clave para su buen funcionamiento

Como se ilustra en la figura 2.2.b, la distribución de tensiones en un sistema adherente versus un sistema no adherente, puede ser significativamente diferente. Como resultado a la acción compuesta, las tensiones en la capa superior (PCC) son significativamente inferiores en la adherente que en el caso de la no adherente.

La adherencia entre el asfalto y el hormigón asegura que parte de los esfuerzos son absorbidos por la sub-base. Además, dado que gran parte de la losa está en compresión, y porque el hormigón es mucho más fuerte en compresión que en tensión, el diseño de la losa puede ser más delgado.

2.3.3 Ámbito de aplicación

Antes de la aplicación del hormigón para el whitetopping, se recomienda una reparación del pavimento existente, para proporcionar la uniformidad necesaria en el sistema. Aunque ya colocado el Whitetopping no se refleje el estado del asfalto, pueden dar lugar a diferentes tipos de fallas en el sistema. Por ejemplo, un fallo de la subrasante localizada debajo del asfalto, conduce a agrietamientos cocodrilo, donde en la última instancia de aplicación puede conducir a fallas, rugosidad o romper la losa de hormigón si no se corrige. (*Rasmussen, 2005*)

La reparación del pavimento para el sistema Whitetopping es crítico para cualquiera de sus casos. El Whitetopping convencional requiere un mínimo de reparaciones antes de la aplicación del hormigón para proporcionar un soporte uniforme. Incluso en algunos de los casos las reparaciones de drenajes pueden ser necesarias. (*Han, 2005*) En caso de que el diseño del Whitetopping delgado o ultra delgado se asume adherencia entre los materiales, se debe fresar el pavimento de asfalto ante previa aplicación. (*ACPA, 1998*)

2.4 DISEÑO DEL WHITETOPPING

El diseño de los pavimentos whitetopping corresponde a la selección del hormigón a disponer, su espesor, la distancia entre juntas y su tipología. Se realiza bajo la consideración de la existencia o no de la adherencia entre hormigón y asfalto, las cargas producidas por el tráfico y los efectos térmicos así como la fatiga que sufren los materiales. (*Han, 2005*)

Los métodos más usados en la aplicación del whitetopping según (*Han, 2005*) y (*Rasmussen, 2005*) son el de American Concrete Pavement Association (ACPA, 1998), el de American Association of State Highway and Transportation Official

(AASHTO, 1993), el del Colorado Department of Transportation (Tarr, S. M., Sheehan, M. J., & Okamoto, 1998), el del Portland Cement Association (Wu, C. L., Tarr, S. M., Refai, T. M., Nagai, M. A., & Sheenan, 1998) y el del New Jersey Department of Transportation. (Gucunski, 2001).

Estos métodos van limitados en función del volumen de tráfico IMD (intensidad media diaria de tráfico en la vía) y si el sistema entre capas adherente o no. Para los casos que no se asume adherencia entre el sistema asfalto hormigón se puede emplear los métodos de diseño del AASHTO y ACPA, tal y como se muestra en la tabla 2.1. El resto de métodos tienen una aplicación limitada exclusivamente a whitetopping delgados o ultra-delgados.

Método de diseño	AASHTO ACPA	AASHTO ACPA2	C-DOT	PCA NJ-DOT
Fase de diseño	No se asume adherencia	No se asume adherencia	Se asume adherencia parcial	Se asume adherencia parcial
Fase de construcción	No se aplican técnicas para generar adherencia	No se aplican técnicas para generar adherencia	Se aplican técnicas para generar adherencia	Se aplican técnicas para generar adherencia
Tipo de WT	Convencional (CWT)	Delgado (TWT)	Delgado (TWT)	Ultra-delgado (UTW)
Volumen de tráfico (IMD)	> 10.000	400 a 10.000	> 10.000	< 400
Vida de diseño (años)	30	20	20	20

Tabla 2.1 Modelos de diseño adoptadas de (Rasmussen, 2005) y (Han, 2005)

Los métodos del C-DOT y la PCA, en los que se asume adherencia parcial, han sido calibrados mediante experiencias puntuales. De ellas se ha derivado la relación existente entre las deformaciones del hormigón y las del asfalto en la interfase del pavimento. Extrapolar un solo resultado experimental a para el diseño general de whitetopping puede inducir a un error en los diseños obtenidos. Además, los modelos no dan margen para contemplar otras técnicas existentes o que puedan aparecer para proporcionar la adherencia entre capas.

En el caso del modelo del NJ-DOT se estiman las tensiones generadas con adherencia perfecta (100%) y sin adherencia (0%) a través de unas expresiones calibradas con un modelo de elementos finitos. Las tensiones reales se estiman por interpolación lineal asumiendo una adherencia de entorno al 70%, aunque este valor

se deja a criterio del proyectista. En este caso hay libertad para introducir las características del pavimento al realizar técnicas distintas de tratamiento de la interfase. Sin embargo, es difícil determinar cuál es el nivel real de adherencia que se da en la práctica.

2.4.1 Fundamentos del diseño

El diseño de los whitetopping delgados y convencionales para caminos de volumen medio se utilizan los métodos de (AASHTO, 1993), (ACPA, 1998), y (Mn/DOT), mientras que los procedimientos de diseños de Whitetopping delgados o ultra delgados para carreteras de alto volumen incluyen (AASHTO, 1993) y la (ACPA, 1998). (Han, 2005)

Los elementos de diseño están constituidos por el espesor de recubrimiento, el diseño de la mezcla, Las juntas y el drenaje. (Dale Harrington, 2014)

Diseño de espesor

El espesor de la losa del Whitetopping es una característica importante del sistema global de pavimento. En donde es importante no sólo por el rendimiento sino también el costo. Como resultado, la selección del espesor debe equilibrar una serie de factores, incluyendo la carga esperada de tráfico, la resistencia y rigidez del pavimento existente, las propiedades del hormigón, y el grado de transferencia de carga. (Rasmussen, 2005)

Para el procedimiento del diseño de la (AASHTO, 1993) , el espesor de recubrimiento se toma como el nuevo espesor de la losa de hormigón requerido para las futuras proyecciones de tráfico y de las condiciones de diseño dadas. El whitetopping se diseña usando un módulo eficaz de basalto (k_{eff}) del pavimento flexible existente, lo que puede determinarse a partir del ensayo de deflectometría de impacto (FWD) de deflexión o desde el nomograma en la guía (AASHTO, 1993). (Han, 2005)

La interacción entre la superficie del hormigón y la base estabilizada se maneja a través del uso de un factor de fricción. La guía proporciona una gama de factores de fricción recomendados para tener en cuenta una amplia gama de condiciones de adherencia para diferentes tipos de bases. (Han, 2005)

En principio una unión parcial se puede considerar al asignar un factor de fricción apropiado. Sin embargo se necesitan más validación del procedimiento de diseño para garantizar la fiabilidad del diseño del espesor. (Han, 2005)

Cuando se selecciona el espesor Whitetopping, controles adicionales se deben realizar, incluyendo sobre la liquidación restante sobrecarga bajo estructuras y acera a juego y canalones. Además, debido a superposiciones Whitetopping son comúnmente precedidas por una operación de fresado, la reducción en el espesor de HMA debe ser un factor. El uso de incrustaciones Whitetopping (fresado profunda seguida de la colocación de la superposición) puede considerarse en secciones muy gruesas HMA. (Rasmussen, 2005)

El espesor de la losa se selecciona basándose en el número de camiones por día, la resistencia a la flexión de diseño del hormigón, el espesor del asfalto, espaciamiento de las juntas y la subrasante valor k. (Han, 2005)

Diseño de Juntas

Una de las características más notables de los Whitetoppings delgados y ultra delgados son sus cortas separaciones entre juntas. Diseños utilizando espaciamientos cortos entre juntas puede reducir significativamente las tensiones. Además, combinado con una buena adecuada adherencia entre PCC-HMA, el espaciamiento corto entre las juntas reduce la flexión de los paneles del hormigón, reduciendo aun más la tensión. (Rasmussen, 2005)

El espaciamiento de las juntas tiene un efecto significativo sobre el agrietamiento en las esquinas. La ubicación de la junta es también importante para evitar las cargas concentradas. Estudios en Minnesota recomiendan un espaciamiento entre juntas donde en la tabla 2.2 se muestra.

Ancho de carril (metro)	Espesor de Whitetopping	
	< 12,7 cm (5 in)	≥ 12,7 cm (5 in)
3	1,5 x 1,8 (m)	3 x 3,65 (m)
3,65	1,8 x 1,8 (m)	3,65 x 3,65 (m)

Tabla 2.2 Juntas de espaciamiento recomendada, adoptada de (Han, 2005)

Según (Rasmussen, 2005) la regla más común para paneles delgados y ultra delgados es seleccionar un espaciado de juntas que sea 12 a 18 veces el espesor. Las secciones delgadas son comúnmente en el extremo inferior de este rango es decir 12 y las secciones ultra delgadas 18.

Si el TWT está diseñado y construido sin adherencia al HMA, se recomienda aumentar el espaciado 21 veces su espesor. La relación de la longitud (dimensión más larga) a la anchura (dimensión más corta) de cualquier panel dado, se recomienda que

sea no más de 1,5 aunque algunos recomiendan una relación máxima de 1,25. (Rasmussen, 2005)

Cabe señalar que dado al gran número de juntas típicamente especificadas para un UTW o TWT, el coste adicional podría estar en contra del coste una sección más gruesa de PCC, lo cual requiere menos coste. (Rasmussen, 2005)

Consideraciones climáticas

Junto con el tráfico, las condiciones climáticas pueden afectar el comportamiento y el rendimiento de un sistema whitetopping. Durante la construcción, los efectos más perjudiciales de las condiciones climáticas se producen en condiciones extremas de temperatura, específicamente a temperaturas del aire superior a 32 ° C o menos de 4 °C. (Rasmussen, 2005)

Para el diseño y la construcción de la capa de refuerzo en el Whitetopping, se deben considerar los posibles efectos tanto para las temperaturas más altas como las más bajas de curado en las propiedades del hormigón y el comportamiento del pavimento en edades tempranas. (Rasmussen, 2005)

Es esencial un buen desarrollo de especificaciones que represente adecuadamente la interacción entre la mezcla de hormigón seleccionado y las condiciones ambientales en la etapa de construcción. A edades tempranas pueden ocurrir problemas sobre agrietamiento aleatorio, agrietamiento transversal e incluso la pérdida de material del hormigón de refuerzo. (Rasmussen, 2005)

Estos efectos pueden minimizarse con las disposiciones adecuadas del control de la temperatura. Documentos como los climas cálidos y fríos deberán ser consultados en las directrices de colocación del American Concrete Institute (ACI). Los efectos climáticos durante la vida útil del recubrimiento también deben ser considerados. Por ejemplo, problemas relacionados con el medio ambiente tales como grietas y daños por hielo-deshielo, pueden ocurrir si no se toman medidas de precaución adecuadas. (Rasmussen, 2005)

2.4.2 Características del Diseño

Durante el proceso de diseño, el detalle de la transición del hormigón del whitetopping al pavimento debe ser proporcionado. Las transiciones entre el refuerzo de hormigón y el pavimento adyacente son generalmente más susceptibles a los daños debido a una serie de factores. (Rasmussen, 2005)

Por ejemplo, el movimiento horizontal del hormigón (retracción) puede conducir a una amplia junta en el área de interacción. Además, el asentamiento del pavimento puede conducir a un bache o hundimiento vertical, que a su vez produce la carga dinámica adicional de los vehículos. (Rasmussen, 2005)

Para mitigar estos efectos, las siguientes características de diseño se deberán utilizar exitosamente: (Rasmussen, 2005)

- *Espesor del borde de pavimento* disminución del espesor de whitetopping diseñado para el espesor de diseño de más de 75 mm (3 pulg.). la transición típica se produce sobre los 2 m (6 pies) extendido.
- *Transición del refuerzo de la losa* malla de alambre soldada o barra de refuerzo bidireccional que se puede utilizar para reforzar los primeros 3 m (10 pies) del hormigón de recubrimiento.
- *Aislamiento (de expansión)* juntas, normalmente construidas de 12 a 25 mm (0.5 a 1 pulg) de ancho y llenos de un preformado relleno de junta compresible. Estas juntas se utilizan para las transiciones a un pavimento existente.

2.4.3 Consideraciones de lugar

En cuanto a la evaluación de la viabilidad del whitetopping como una alternativa de rehabilitación, se deben considerar los factores de lugar como: (Han, 2005)

- Control de tráfico
- Arcenes
- Gálbo

En zonas urbanas, donde la congestión del tráfico es un problema diario, la gestión del desvío de tráfico durante la construcción puede ser un tema crítico. En algún momento, la reconstrucción del pavimento es inevitable; Sin embargo, si las alternativas de rehabilitación con requisitos de cierre de carril menos graves siguen siendo viables (por ejemplo una capa de refuerzo sobre el HMA) el requerimiento de cerrar los carriles puede ser un factor clave que determina la viabilidad del whitetopping. Para los proyectos de áreas congestionadas, el uso de la técnica en pavimento “vía rápida” puede ser apropiado para minimizar los tiempos de cierre de carril. (Han, 2005)

La construcción de un Whitetopping delgado puede requerir nuevos desniveles debido al aumento en la elevación de la acera de la línea principal. El cambio de elevación también puede significar que el intercambio de rampas tenga que ajustarse y

levantar el carril, los cuales afectan a la viabilidad económica de las superposiciones Whitetopping. (Han, 2005)

Gálibo también podría afectar la viabilidad del whitetopping delgado. El whitetopping delgado añade un grosor considerable, secciones cortas en reconstrucción pueden ser necesarias en estructuras en altura, como el paso a desnivel de puentes para asegurar una altura libre adecuada. El aumento de la estructura es una alternativa más costosa. (Han, 2005)

2.4.4 Interacción Vehículo-Pavimento

El comportamiento funcional de un pavimento de hormigón está asociado a la capacidad funcional que tiene para brindar una superficie segura y cómoda al usuario. En el 2013 se realizó un estudio de investigación sobre las propiedades superficiales del pavimento, en la cual se centraron en el estudio con relación a: (Uniland cementera, s.a., fcc construcción, S.a., fundación cidaut, universitat Politecnica de catalunya, 2012)

- Regularidad o rugosidad superficial (característica predominante)
- Textura.
- Adecuada fricción superficial.

La regularidad o rugosidad superficial es la característica más percibida por el usuario ya que afecta la calidad de la rodadura. Se relaciona con los efectos de las vibraciones, tales como niveles de deterioros, probabilidad de dañar a las mercancías transportadas, desgaste de los vehículos y consumo de energía. La comodidad depende principalmente del vehículo y del perfil longitudinal de la carretera. (Uniland cementera, s.a., fcc construcción, S.a., fundación cidaut, universitat Politecnica de catalunya, 2012)

La textura o acabado de un pavimento es un parámetro crítico en la comodidad y seguridad de los usuarios y necesario para la conservación de carreteras, este parámetro influye directamente en la capacidad del pavimento para evacuar el agua de la interfase rueda-pavimento y de forma indirecta en el valor del coeficiente de rozamiento del pavimento, que tiene gran importancia para la adecuada adherencia entre la rueda y el pavimento. (Uniland cementera, s.a., fcc construcción, S.a., fundación cidaut, universitat Politecnica de catalunya, 2012)

La fricción superficial de un pavimento es la fuerza desarrollada en la interfase rueda-pavimento que resiste el deslizamiento cuando se aplican las fuerzas de frenado. La fricción o resistencia al deslizamiento también es un valor crítico en la seguridad, ya que cuando los pavimentos están mojados el agua actúa como lubricante y reduce el contacto entre la rueda y pavimento. Si la película de agua es gruesa y al vehículo circula a gran velocidad, las ruedas pierden contacto con el pavimento, creando el peligroso fenómeno de aquaplaning. (Uniland cementera, s.a., fcc construcción, S.a., fundación cidaut, universitat Politecnica de catalunya, 2012)

Texturas comúnmente utilizadas

Si el espesor del pavimento y el tipo de hormigón son factores de gran importancia en el comportamiento estructural y la durabilidad, la textura superficial es la encargada de asegurar las características de rugosidad (adherencia), drenaje, baja sonoridad y reflectancia (que se traduce en una reducción de la iluminación necesaria). (Uniland cementera, s.a., fcc construcción, S.a., fundación cidaut, universitat Politecnica de catalunya, 2012)

Las texturas utilizadas pueden ser, entre otras:

- Estriado transversal: mediante el paso de peines de púas metálicas o de plástico. Es una textura que proporciona una elevada adherencia y resistencia a la frenada y buen drenaje, pero ruidosa. Recomendable para arcenes y en zonas muy lluviosas.
- Estriado longitudinal oscilante: mediante la acción de cepillos o peines, habitualmente incorporados al carro del equipo de curado. Es conveniente dotar al dispositivo de creación de la textura de un movimiento lateral que, combinado con el de avance, provoque una ondulación de forma sinusoidal que evite el guiado de las ruedas.
- Terminación con arpillera: la aplicación de una arpillera húmeda lastrada permite obtener una microtextura adherente de baja rugosidad. Se suele realizar conjuntamente con alguna de las otras texturas anteriores.
- Árido visto: obtenido mediante eliminación del mortero superficial (desactivado) de la superficie. Para ello se aplica sobre el hormigón fresco un retardador de superficie, que impide el fraguado del mortero en los milímetros superiores. Sobre dicho retardador debe extenderse un producto filmógeno de curado

(aunque existen compuestos que realizan la doble misión de retardador y curador) o una lámina de plástico. Una vez que el resto del hormigón ha adquirido suficiente resistencia (en general al día siguiente) se elimina dicho mortero mediante barrido, dejando el árido parcialmente visto. Es una técnica bien desarrollada que permite obtener pavimentos con elevada rugosidad, buenas características de evacuación del agua de lluvia, antideslizantes y de muy baja sonoridad, manteniendo prácticamente estas cualidades durante toda su vida de servicio.

Existen diferentes tipos de texturas con sus respectivas características, tal y como se muestra en la tabla 2.3. Estas texturas van relacionadas con los métodos y técnicas más utilizadas y/o innovadoras. (*Uniland cementera, s.a., fcc construcción, S.a., fundación cidaut, universitat Politecnica de catalunya, 2012*)

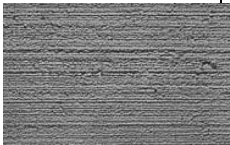
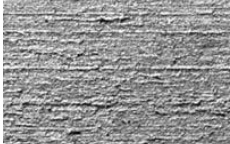

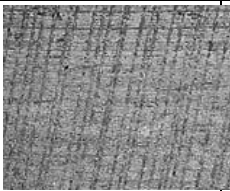
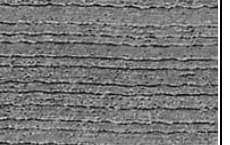
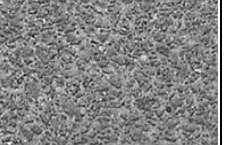

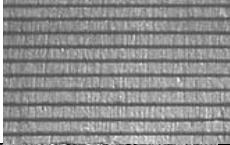
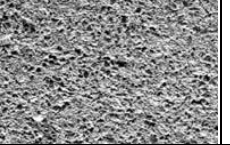
TEXTURAS DE ARRASTRE		
	Superficie cepillada	Se obtiene usando o una escoba de mano o un dispositivo mecánico que arrastra ligeramente unas cerdas rígidas a través de la superficie de hormigón. Produce estrías de aproximadamente 1.5-3 mm de profundidad. Las estrías pueden realizarse de forma longitudinal o transversal a la línea central de la carretera
	Superficies Turf	Se obtiene mediante un turf artificial invertido. El Sistema permite el control del tiempo y nivel de texturización - por lo general mediante un puente que se extiende por el pavimento. Generalmente se obtienen estrías de entre 1.5-3 mm
	Superficie arpillada	Producida mediante una arpillera gruesa humedecida desde un dispositivo que permite el control del tiempo y la velocidad de texturización, por lo general mediante un puente que se extiende por el pavimento. Produce 1.5-3 mm (01.16 a 01.08 cm) estrías profundas.
TEXTURAS DE PÚAS		
	Púa Transversal	Esta textura se consigue mediante un dispositivo mecánico equipado con un cabezal (rastrillo de metal) que se mueve lateralmente a través del ancho de la superficie de pavimentación. Una herramienta de mano es suficiente en áreas más pequeñas. Las dimensiones óptimas son: espaciamiento de los brazos al azar entre 10 a 40 mm, con no más del 50% por encima de 25 mm; Púas de 3-6 mm de profundidad, y 3 mm de ancho.
	Púa Longitudinal	Se obtiene de forma similar al tining transversal, a excepción de que los dientes se aplican en una línea paralela a la línea central del pavimento. Las dimensiones óptimas son: separación uniforme de 20 mm Púas de 3- 6 mm de profundidad, y 3 mm de ancho.
AGREGAD EXPUESTO		
	Agregado Expuesto	Se trata de la práctica más común a nivel europeo. Debe aplicarse un retardador a la superficie de hormigón, y luego lavar la superficie de mortero para que los áridos queden expuestos.
TEXTURAS DE HORMIGÓN ENDURECIDO		
	Esmerilado de diamante	Realizada mediante equipos que utilizan hojas de sierra con cabeza de corte de diamante. La cabeza de corte produce entre 164 a 197 líneas / metros y puede eliminar entre 3-20 mm de la superficie del pavimento.
	Esmerilado de diamante	Ranuras aserradas longitudinalmente en la superficie de carreteras y transversalmente para los aeropuertos. Típicamente, las ranuras son de 6 mm de profundidad, 3 mm de ancho y espaciados 20 mm de separación. En los aeropuertos las ranuras son de 6 mm de profundidad, 6 mm de ancho y separadas 40 mm de distancia.
	Abrasión	Superficie fuertemente grabada producida por un equipo que lanza elementos abrasivos. Los impactos de los medios abrasivos elimina una capa fina de mortero y áridos de la superficie del pavimento. La profundidad de la eliminación es controlable y el polvo generado se aspira.

Tabla 2.3 Tipos de textura y sus características más relevantes fuente: (Uniland cementera, s.a., fcc construcción, S.a., fundación cidaut, universitat Politècnica de Catalunya, 2012)

Tal como se muestra en la tabla 2.3 cada uno de los métodos identificados tiene propiedades y rendimientos características que los hacen más o menos deseables para las diferentes aplicaciones de pavimentación. La Tabla 2.4 resume los

rangos obtenidos en relación a las propiedades iniciales de textura, fricción y ruido para cada método.

METODOS	TEXTURA		FRICCIÓN		RUIDO	
	MTD [mm]	MPD [mm]	FN40R	FN40S	CPX [dB(A)]	CPB L _{max} [dB(A)]
Transverse tine (aprox: 20 mm)	0,53- 1,1	0,50 -0,52	41,0 - 56,0	30,6 - 34,4	100,4 - 104,8	83,0 - 84,0
Transverse tine (aprox: 13 mm)		0,35 - 1,00	54,0 - 71,0	37,6 - 62,0		81,9 a 83,0
Transverse tine (variable)	1,14	0,42 - 1,02		50,0 - 69,5		81,0 a 87,3
Transverse Groove	1,07			48,0 - 58,0		84,1 a 84,6
Transverse drag	0,76		22,0 - 46,0			
Longitudinal tine	1,22			36,0 - 76,6	96,6 a 103,5	79,0 a 85,0
Longitudinalgroove						
Longitudinal grind	0,30 - 1,20		35,0 -51,0	29,9 - 46,8	95,5 a 102,5	81,2
Longitudinal burlap drag					101,4 a 101,5	
Longitudinal turf drag	0,53 - 1,00		23,0 - 55,6	20,0 - 38,0	97,4 a 98,6	83,7
Longitudinal plastic brush			48,0 - 52,0	23,0 - 24,0	101,8 a 102,2	
EAC	0,9 - 1,1		35,0 - 42,0			
Shat abraded PCC	1,2 - 2,0			34,3 - 46,2		84,3
Porous PCC						
Ultrathin epoxied lamínate	1,4					79,8
Ultrathin bonded wearing course	0,97 - 1,98		26,0 - 27,0		95,0 a 99,0	

Tabla 2.4 Rangos obtenidos en relación a las propiedades iniciales de textura, fricción y ruido
fuente: (Uniland cementera, s.a., fcc construcción, S.a., fundación cidaut, universitat Politecnica de catalunya, 2012)

La selección del método de texturización más apropiado, en función de las diferentes aplicaciones, requiere: mantener un equilibrio a corto y largo plazo de unos adecuados los niveles fricción de mojado, minimizar el ruido pavimento – neumático, mantener la durabilidad de las carreteras y minimizar los costos de construcción y mantenimiento. (Uniland cementera, s.a., fcc construcción, S.a., fundación cidaut, universitat Politecnica de catalunya, 2012)

2.5 CONSTRUCCIÓN DEL WHITETOPPING

Las prácticas actuales para la construcción de Whitetopping son casi idénticos a los de la construcción de cualquier pavimento de hormigón (Han, 2005). En este apartado se hará hincapié en las diferentes facetas de la construcción general del Whitetopping y las características únicas del TWT y UTW.

2.5.1 Procedimiento Constructivo

En la construcción del Whitetopping implica limitadas reparaciones antes de la colocación del hormigón en el pavimento existente ya sea con o sin adherencia. La colocación del PCC para el whitetopping es similar a la de nuevas construcciones, la cual se describirá brevemente en las siguientes secciones. (Han, 2005)

Reparación pre-recubrimiento

Las directrices (ACPA, 1998) para reparaciones antes de las aplicaciones del delgado y ultra delgado Whitetopping se dan en la tabla 2.5. Donde las técnicas de reparación de pre-recubrimiento son las mismas que las técnicas de reparación para un pavimento de asfalto en Caliente. (Han, 2005)

Condiciones del Pavimento	Reparaciones	
	Delgado	Ultra Delgado
	Fresado opcional y limpieza requerida	Fresado y limpieza requerida
Ahuellamiento < 5 cm	Ninguna	Ninguna
Ahuellamiento > 5 cm	Fresado o nivelación	Ninguna
Baches	Rellenar	Parche
Falla de subrasante	Remoción y preparación	Remoción y preparación
Agrietamiento piel de cocodrilo	Ninguna	Parche completo de espesor
Fisura en bloque	Ninguna	Llenado de grietas
Fisuras longitudinales y transversales	Ninguna	Llenado de grietas
Pérdida de árido en superficie	Ninguna	Ninguna
Exudación	Ninguna	Ninguna

Tabla 2.5 Reparación pre-recubrimiento en un pavimento de asfalto existente adoptada de: (Han, 2005)

Como muestra la tabla 2.5, se requiere una cierta reparación pre-recubrimiento del pavimento de asfalto existente para obtener el nivel deseado de rendimiento, ya que el pavimento HMA existente se lleva parte de la carga de tráfico. Si para el diseño se asume adherencia entre el asfalto y el hormigón, se recomienda el fresado de la base para garantizar adherencia. (Han, 2005)

Entre los tipos de actividades de reparación requerida para TWT y UTW antes de la capa de refuerzo de hormigón requerido son:

- Reparación localizada de zonas de falla, causadas por la pérdida de la base o soporte de la subrasante.
- Llenado medio y alto en los baches.
- Reparación localizada para fallas medias y severas en agrietamiento de cocolito. Si existe un agrietamiento significativo durante todo el proyecto, esto sugiere una insuficiencia estructural y el pavimento puede no ser un candidato adecuado para un TWT O UTW. (Han, 2005)

Reparación de la superficie

Si las distorsiones de la superficie en el pavimento de asfalto existente son excesivas (más de 5 cm), el fresado o la nivelación podrían ser necesarios para proporcionar la clasificación adecuada. Antes de colocar el whitetopping, la temperatura del asfalto preparado de la superficie debe ser considerada. (Han, 2005)

La colocación de PCC sobre una superficie de asfalto en caliente puede conducir a la formación de grietas debido a la contracción, así como las excesivas tensiones por restricción térmica resultando de la gran diferencia de temperatura entre el PCC en estado de endurecimiento y las bajas temperaturas durante la noche. (Han, 2005)

El Agua Nebulizada y el blanqueo son dos métodos utilizados por separado para reducir la temperatura del asfalto. Utilizar el agua nebulizada es una buena práctica si el calor de la superficie del asfalto hace que sea incómodo para tocar con la palma de la mano abierta. El agua nebulizada es adecuada para superficies de asfalto viejo y fresado. El Blanqueo puede reducir la adherencia entre el PCC y el HMA. (Han, 2005)

Colocación y acabado

Los procedimientos para la colocación y acabado del PCC para el Whitetopping delgado, son los mismos de aquellos de pavimentos de hormigón. (Han, 2005)

Se debe tomar especial atención a las condiciones de temperatura durante la colocación del hormigón, ésta debe estar garantizada para evitar los gradientes de temperatura excesivamente alta durante el curado. Los estudios han demostrado que un gradiente de temperatura excesivo a través del hormigón en el momento de endurecimiento, puede bloquear una cantidad significativa de curvaturas de losas, que pueden ser perjudiciales para el rendimiento de fatiga. (Han, 2005)

Curado

El Curado del Whitetopping es similar al curado de los pavimentos de hormigón convencional. El correcto curado del hormigón es fundamental para lograr un pavimento resistente, durable y de bajo costo de conservación, es decir, de buen comportamiento en servicio.

Es necesario para asegurar la hidratación del hormigón y consecuentemente el endurecimiento del hormigón y el mejoramiento de sus propiedades básicas de resistencia e inalterabilidad de volumen y durabilidad, bajo la acción de los agentes climáticos. El curado debe materializarse lo antes posibles después de las operaciones de terminación superficial, pues el mejoramiento de las propiedades citadas del hormigón es muy rápido durante su primera edad. (Cossio et al., 2012)

2.5.2 Consideraciones técnicas y colocación del hormigón

Para la construcción del Whitetopping, existen varias opciones con respecto a los equipos y la técnica de colocación del hormigón. Muchas veces el Whitetopping es diseñado bajo la colocación de un hormigón convencional, donde el trabajo es más denso y menos costoso. (Rasmussen, 2005)

La colocación del hormigón se lleva a cabo normalmente por dos métodos, encofrados fijos y de encofrado deslizante. Existen casos que la construcción del hormigón se ha realizado de manera manual, pero a continuación se analizaran solo los dos primeros métodos.

Encofrados Fijos

En el método fijo los encofrados deben estar asegurados de una manera rígida para soportar el hormigón, con el fin de evitar algún tipo de asentamiento u otro movimiento. Los encofrados también deben soportar la presión lateral del hormigón, ya que se colocan camiones de hormigones pre-mezclado, bombas y otros medios.

Cada formaleta se debe limpiar y aplicarle algún tipo de desencofrante antes de cada uso, y posteriormente limpiarse después de cada uso. Se deberán retirar cuidadosamente después de que el hormigón ha adquirido la resistencia necesaria. Se debe tener cuidado para evitar los daños en los bordes y en las esquinas del hormigón. (Rasmussen, 2005)

El hormigón debe ser colocado en el pavimento de asfalto existente lo más uniformemente posible, para evitar segregación y para minimizar la fuerza lateral

extendida a medida en que avanza la obra. Se utilizan esparcidores o enrasados de regla mecánica que se montan en los encofrados. Los vibradores también deben ser utilizados para asegurar consolidación adecuada. (Rasmussen, 2005)

Extendidora de Encofrado Deslizante

La gran mayoría de las extendidoras de encofrado deslizante extiende, concentra, enrasa y frota el hormigón en estado fresco, lográndolo en una sola operación sin el uso de las fijas, así como se muestra en la figura 2.3.



Figura 2.3 Extendidora de encofrado deslizante. Imagen extraída de GOMACO International.

Se conocen como maquinarias de última tecnología en la etapa de hormigonado. Se moviliza a través de orugas ubicadas a los costados. En su interior, un sinfín de distribución o una cuchilla de distribución extiende uniformemente el material depositado previamente en la extendidora mediante a una cinta transportadora, un sinfín alimentador, una bomba o delante de la extendidora, todo dependiendo del tipo de modelo. (Esteban Jamet., 2014)

Durante su transcurso, el encofrado deslizante le proporciona la forma adecuada a la capa de hormigón. Posee vibradores eléctricos que se hacen cargo, a la vez, de la compactación adecuada del material. (Esteban Jamet, 2014)

2.5.3 Ejecución de las Juntas

En las losas de hormigón, el tiempo oportuno para el corte de juntas es vital para evitar el agrietamiento en el Whitetopping. Las operaciones de los cortes de la losa deben comenzar inmediatamente después que el hormigón haya cobrado fuerzas suficientes para evitar la degradación o desprendimiento en la junta.

La profundidad de la sierra de corte es de mucha importancia para el Whitetopping porque las distorsiones en el pavimento asfáltico pueden lograr afectarlo como se muestra en la figura 2.4. Para evitar este tipo de daño se recomienda una profundidad mínima de sierra de corte de un tercio del espesor de la losa de hormigón.

Un corte más profundo podría hacerse donde el espesor de la losa varié mas de los 50 mm del espesor nominal. Con técnicas de corte a edades tempranas y un corte más superficial podría ser permisible.

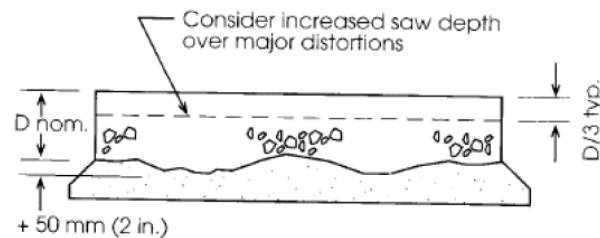


Figura 2.4 Corte donde las distorsiones exceden 50 mm. Extraída de (Han, 2005)

En cuanto a los selladores de juntas su objetivo es minimizar el ingreso de agua ya que podría reducir la capacidad global del pavimento, además minimizar el ingreso de materiales incompresibles (así como la arena), ya que podría ocasionar problemas de levantamiento de la losa y despostillamientos de los labios de las juntas. (Calo, 2012)

2.5.4 Obtención de la adherencia entre capas

La adherencia entre el asfalto y la nueva capa de hormigón tiene un rol fundamental en el comportamiento estructural del whitetopping. La adherencia perfecta asegura que el conjunto asfalto-hormigón trabaja de forma monolítica, provocando en el asfalto la absorción de una parte de los esfuerzos de tracción generados. Gracias a ello se optimiza el funcionamiento del conjunto estructural, disminuyendo los requisitos de espesor de la capa de hormigón colocada y reduciéndose así los costes finales de ejecución de la obra.

Estudios realizado por Rasmussen (Rasmussen, 2004) sobre las experiencias whitetopping realizadas en Estados Unidos hasta el año 2004, prácticamente en la totalidad de los casos se utilizan técnicas de adherencia mecánica. Éstas pretenden aumentar la rugosidad de la capa base para mejorar su coeficiente de fricción. Las más utilizadas son el fresado del asfalto y la aplicación de una capa de nivelación asfáltica.

Una de las técnicas de adherencia más utilizadas en el Whitetopping es la del fresado, la cual consiste en eliminar un espesor de entre 25 y 75 mm de la parte superficial del asfalto procurando dejar un acabado rugoso (Figura 2.5.a). Tras el fresado se limpia la superficie, ya sea aplicando un chorro de aire o agua o cepillando enérgicamente, para eliminar impurezas. Es la técnica cuyo uso está más extendido y se la que algunas administraciones estadounidenses recomiendan para la construcción de soluciones de menos de 100 mm de espesor (Rasmussen, 2004).

El fresado es el más utilizado ya que muestra varias ventajas que le hacen ganar competitividad ante otras soluciones. Por ejemplo, tras su ejecución se eliminan irregularidades en la superficie del pavimento original. Además, permite restablecer la rasante y la pendiente transversal del nuevo pavimento. Por el contrario, hay que tener especial cuidado de no reducir críticamente el espesor de asfalto eliminado para que siempre haya el mínimo requerido estructuralmente.

La aplicación de una capa de nivelación asfáltica sobre el asfalto y previa construcción del whitetopping (Figura 2.5.b) permite eliminar irregularidades. A pesar de ello, no se recomienda para la construcción de whitetoppings delgados y ultra-delgados. Puede emplearse este tipo de solución para modificar o corregir la pendiente transversal de las secciones de la vía y la capacidad de drenaje en el caso de que no se requiera adherencia asfalto-hormigón.

Cabe destacar que la colocación de una nueva capa asfáltica sobre el pavimento original puede dar pie a problemas como la aparición de huecos bajo el whitetopping. Como consecuencia, en el hormigón se puede desarrollar una fisuración prematura por no apoyarse las losas de forma completa sobre el asfalto (Tarr, Sheehan, & Okamoto, 1998). Si se quiere aplicar esta metodología hay que tomar medidas para asegurar la rigidez de la capa bituminosa. Cabe decir que puede resultar más caro emplear esta solución que construir directamente con un espesor mayor de hormigón sin recurrir a la adherencia.



Figura 2.5 Aspecto del asfalto tras fresado (Rasmussen, 2004) (a) y aplicación de asfalto para nivelación (b)

3 CAMPAÑA EXPERIMENTAL

3.1 INTRODUCCIÓN

Con la finalidad de validar los objetivos planteados, se planteó la necesidad de realizar un programa experimental con las probetas Whitetopping. Los resultados obtenidos deberían validar cual técnica de adherencia sería la más factible, para garantizar la adherencia.

Los ensayos recogidos en este capítulo han sido realizados entre los meses de julio y diciembre de 2015. Se planteó una campaña experimental en la que en primera instancia se caracterizaron los materiales por separados, luego se realizaron ensayos de PullOut, LCB, y Slant Shear, cada ensayo con sus diferentes técnicas de adherencia, tal y como muestra la tabla 3.1.

La finalidad de esta capítulo es la de explicar el procedimiento seguido en toda la campaña experimental. En primer lugar, se describe la metodología a seguir de la campaña, asimismo, se describe las fases de ejecución, en donde detallan los materiales a emplear, dosificaciones, fabricación de probetas y ensayos. De última instancia se describen los ensayos llevados a cabo y su método de ejecución.

3.2 METODOLOGÍA DE LA CAMPAÑA EXPERIMENTAL

Para alcanzar los objetivos deseados, se realizó un procedimiento seguido como se observa en la figura 3.1. Inicialmente se fabricaron las probetas de asfalto de una forma controlada en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras Luís Agulló de la UPC. Una vez fabricadas y curadas a un día, se procedieron a la preparación de las técnicas de adherencia, para poder fabricar el hormigón del Whitetopping. Una vez fabricada la probeta por completo, estas se llevaron a la cámara climática del laboratorio hasta el momento de la realización del ensayo.

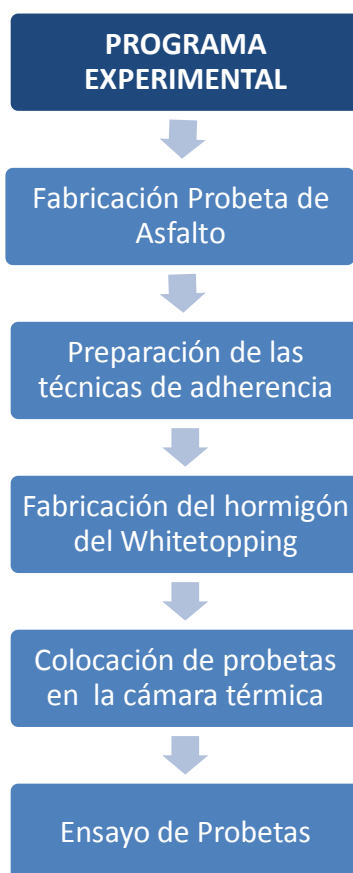


Figura 3.1 Procedimiento del programa experimental

Las probetas se prepararon y se identificaron con códigos para poderlas diferenciar. Luego de identificarlas, se colocaron en el interior de la cámara climática del laboratorio con una temperatura y humedad controlada. Después de ser curadas, se procedió a la realización de los ensayos a realizar junto con la caracterización de ambos materiales por separado.

3.2.1 Técnicas de adherencia a estudiar

En los ensayos de Whitetopping se utilizaron diferentes técnicas de adherencia entre capas a estudiar, las que aparecen en la Tabla 3.1. Todas las probetas tendrán de base el asfalto y como técnica de adherencia se tomará una técnica sin ningún tipo de tratamiento con la finalidad de obtener un valor de referencia con el resto de las demás soluciones.

Base	Técnica de adherencia
Asfalto	Sin Tratamiento (referencia)
	Abujardado
	Emulsión Bituminosa (ECR1)
	Emulsión Bituminosa + arena 2/5mm (ECR2)
	Imprimación Asfáltica + Polvo

Tabla 3.1 Métodos de adherencia a utilizar

Iniciado la técnica de referencia a tratar, se propondrá simular un fresado con pistola de agujas, ya que es una de las técnicas más empleadas en la construcción del Whitetopping. También se propone la utilización de un Betún adicionándole un árido grueso con el fin que trabaje como un anclaje de adherencia. Se propuso la idea de recurrir a un método totalmente químico, el cual sería el riego bituminoso ECR1. Por último, se propone realizar un denudado para dejar el árido fino (polvo) visto y así aumentar la rugosidad en la junta.

3.3 DOSIFICACIONES Y MATERIALES

Para la realización de la campaña experimental se emplearon un total de 67 probetas de Whitetopping, de las cuales 30 probetas eran para el ensayo LCB, 30 probetas para el ensayo Pull-out y 7 probetas para el ensayo Slant Shear, donde sus dimensiones fueron de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura. Para cada tipo de probeta se realizaron los diferentes tipos de adherencia como se muestra en la tabla 3.1. Las cuales como base fueron fabricadas con un asfalto con el tipo de mezcla AC 16 surf 50/70 S y un hormigón autocompactante.

3.3.1 Características del Asfalto

El Asfalto utilizado para todas las bases de Whitetopping fue un AC 16 SURF 50/70 S, proporcionado por la empresa Rubau, correspondiente a la norma UNE-EN 13108:2008 tal como se muestra en la tabla 3.2.

Mezcla bituminosa Rubau (1-7-2015)	
Tipo de mezcla:	AC 16 surf 50/70 S
Materiales (% peso)	
Árido granítico 12/20	13.0%
Árido granítico 4/12	45.0%
Árido calizo 0/4	39.0%
Filler calizo	3.0%
Betún 50/70 (sobre mezcla)	4.80%

Tabla 3.2 Dosificación Asfalto

En la mezcla Bituminosa se utilizaron áridos graníticos de 12/20 y 4/12 teniendo en total un 58% del peso de los materiales y se utilizó un árido tipo calizo 0/4 con un total del 39% de la mezcla. Una mezcla bituminosa semidensa según la norma (UNE-EN13108-1:2007, 2007). Además se añadió un filler calizo al 3% del peso de los materiales.

3.3.2 Características del hormigón

El hormigón empleado como refuerzo como se muestra en la tabla 3.3, fue un autocompactante de alta resistencia, con la finalidad de eliminar los medios de compactación y una facilidad en la colocación. Para la fabricación del hormigón se empleó un CEM I 52, 5R.

Material	Cuantía (kg/m3)
Cemento CEM I 52,5R	800
Arena silícea 2/4 mm	1,161
Agua	129
Relación agua/cemento aparente	0,16
Superplastificante BASF Glenium ACE 425	32
Suspensión de nanosílice BASF MasterRoc MS 685	40
Microfiller calcáreo tratado OMYA Betoflow	200

Tabla 3.3 Dosificación del hormigón

Arena Silícea

Las Arenas Silíceas tienen unas características físicas y químicas, principalmente su dureza y estabilidad, que le hacen imprescindible para un hormigón de alta resistencia. Para nuestro diseño se utilizaron arenas de Sibelco Minerales de 2 – 4 mm.

Aditivos

Se incorporaron aditivos a la mezcla para mejorar las prestaciones del hormigón en términos de trabajabilidad y resistencias iniciales. Los aditivos utilizados han sido proporcionados por la empresa BASF Construction Chemicals España, S.L.

El Aditivo MasterGlenium ACE 425 funciona como superplastificante / reductor de agua de alta actividad basado en policarboxilatos, ideal para aplicaciones en hormigón prefabricado, donde se demande alta resistencia inicial. En la tabla 3.4 muestra las principales características del aditivo.

Propiedades	MasterGlenium ACE 425
Aspecto físico	Líquido amarillento turbio.
pH, 20° C	5,5 ± 1
Densidad, 20° C	1,048 ± 0,02 g/cm ³
Viscosidad 20° C Brookfield Sp00/50rpm	< 100 cps.
Contenido en cloruros	< 0,1%

Tabla 3.4 Especificaciones técnicas del superplastificante.

La Nanosílice Meyco MS 685, actualmente llamado MastereRoc MS 685 es una mezcla líquida basada en una suspensión de nanosílice amorfa. Estas partículas ultra finas reaccionan tan pronto como se incorporan en la mezcla. La textura del slurry es similar a la de la pasta de cemento y crea un mineral microscópico estable. En la tabla 3.5 muestra las principales características del aditivo.

Propiedades	Nanosílice Meyco MS 685
Aspecto físico	Líquido blanco.
pH, 20° C	10 ± 1
Densidad, 20° C	1,134 ± 0,03 gr/cm ³
Viscosidad 20° C Brookfield Sp00/50rpm	< 30 cps.
Contenido en cloruros	< 0,1%

Tabla 3.5 Especificaciones técnicas del superplastificante.

Filler Calizo

Se utilizó el Betoflow D-CL, el cual se conoce como Carbonato Cálcico molido, fabricado a partir de una caliza marmórea de gran pureza química, procesada con equipos de alta tecnología.

3.3.3 Materiales empleados en las juntas

Para la obtención de la adherencia asfalto-hormigón del Whitetopping, se planteó unos tratamientos con el fin tener un valor de referencia para todas las soluciones. En cada caso se utilizaron ya sea técnicas o productos como se observa en la tabla 3.6.

Métodos de Adherencia	Material Empleado
Sin Tratamiento	Nada
Abujardado	Pistola de agujas de funcionamiento neumático
Emulsión Bituminosa (ECR1)	Riego Bituminoso ECR1
Emulsión Bituminosa + Árido arena (ECR2)	Riego Bituminoso ECR2 + Arena
Imprimación Asfáltica + Polvo	Igol A + Arena Q6

Tabla 3.6 Materiales empleados en las juntas

El la técnica del Asfalto-Sin tratamiento no se utilizó ningún producto ya que se tomo como referencia de las demás. Para el Asfalto-Abujardado se utilizó la máquina de pistola de aguja con funcionamiento neumático, ésta escariadora por su baja revolución nos permitió trabajar en la superficie del asfalto sin maltratarlo. La Emulsión Bituminosa se utilizó un Riego Bituminoso ECR1. En el método de la Emulsión Bituminosa + Árido arena se utilizó un Riego Bituminoso ECR2 + Arena gruesa tamaño 2/5mm. Además, en la técnica Asfalto- Imprimación Asfáltica + Polvo se utilizó un producto de Sika AG, en base a emulsión bituminosa de carácter anicónico llamado Igol A. homologado según norma (UNE-EN104-231, n.d.). En la tabla 3.7 muestra las principales características del producto químico.

Propiedades	Igol A
Aspecto físico	Líquido negro.
Densidad	0,9 a 1,1 kg/l
Viscosidad 20º C Brookfield Rut, husillo 1,20 rpm	1-5 poises
Contenido en sólidos	60%

Tabla 3.7 Especificaciones técnicas de la imprimación asfáltica

Además se adicionó un árido fino (polvo) Q6, de Sibelco llamado SilverBond para crear cierta rugosidad en la zona de tratamiento.

3.4 FABRICACIÓN DE LAS PROBETAS

La fabricación de las probetas Whitetopping se realizaron tal y como se muestra en la figura 3.2, mediante el empleo de moldes cilíndricos metálicos de una dimensión de $\phi 100 \times 200$ mm. Estas se fabricaron por 3 fases en donde la primera fase se fabricó las bases de la mezcla bituminosa para los ensayos de LCB, tracción pura y slant shear. En la segunda fase se les aplicaron los tratamientos de adherencia a tratar y para la tercera fase se fabricó la capa de refuerzo del hormigón.

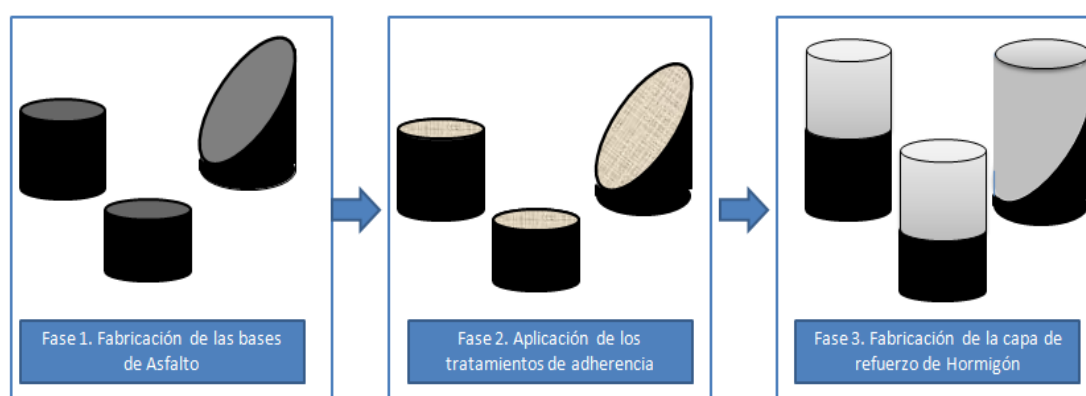


Figura 3.2 Fases de fabricación de las probetas

3.4.1 Fabricación de las bases de asfalto

La fabricación de la mezcla bituminosa se llevó a cabo por la empresa Rubau Tarrés S.A., debido a su gran experiencia en la fabricación de asfalto. Nos otorgaron una mezcla bituminosa semidensa, destinada a capas de rodadura del tipo AC 16 surf 50/70 S según la norma (UNE-EN13108-1:2007,). Dicha Mezcla Bituminosa corresponde a una mezcla tipo S12 según el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes, comúnmente conocido como PG-3. El material asfáltico fue entregado en capazos como se muestra en la figura 3.3.a al laboratorio de Tecnología de Estructuras Luís Agulló de la UPC, donde allí se procedió a la fabricación de la probeta del asfalto.

El moldeado de las semi-probetas de asfalto se hizo con los moldes cilíndricos metálicos de $\phi 100 \times 200$ mm. Para obtener la forma deseada en las probetas destinada al ensayo de corte "Slant Shear" se fabricaron unas piezas de material plástico que se introducían previo a la fabricación del asfalto. En la figura 3.3.b se puede observar el aspecto de los moldes de plástico.

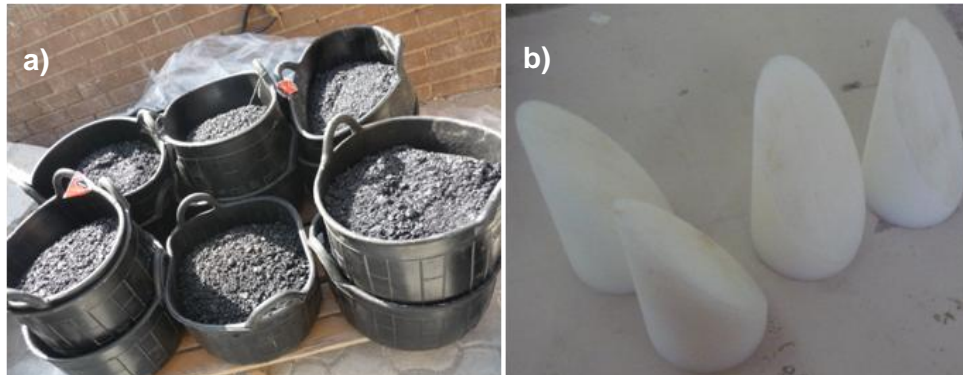
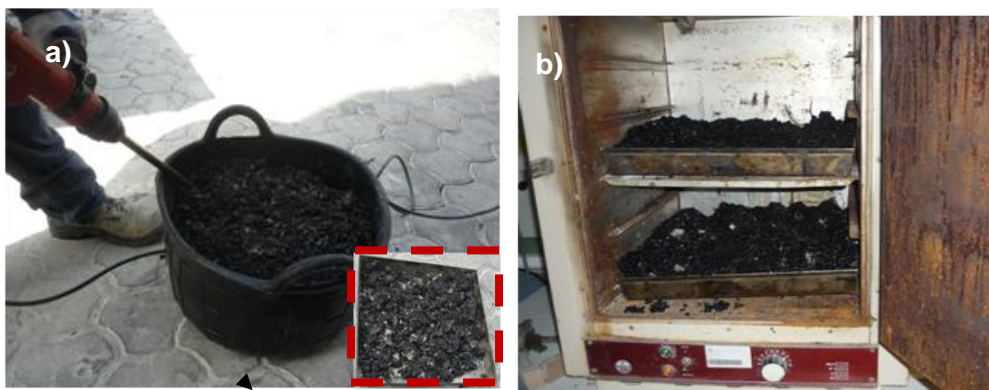


Figura 3.3 Capazos de mezcla Bituminosa (a), Piezas de plástico para ensayo “Slant Shear” (b).

La producción de las 5 fabricadas de asfalto se logró bajo a una misma técnica de trabajo, la cual se describirá a continuación. Inicialmente se procedía a triturar una porción de la mezcla bituminosa mediante a un taladro Hillti como se muestra en la figura 3.4.a con el fin de poder calentarla en el horno a unos 150°C unas 3 horas figura 3.4.b Simultáneamente se calentaban las probetas metálicas a la misma temperatura, con el fin de no enfriar la mezcla asfáltica, tal y como se muestra en la figura 3.4.c Posteriormente al calentamiento de la mezcla bituminosa se procedía mediante un cazo a medir la cantidad exacta de cada probeta mediante a una balanza de capacidad de 2 kg y una precisión de 0.1 gr. Acto seguido se procedía al calentamiento de la mezcla en el hornillo para asegurarnos de que tenga la temperatura y una homogeneidad deseada , tal y como se muestra en la figura 3.4.d



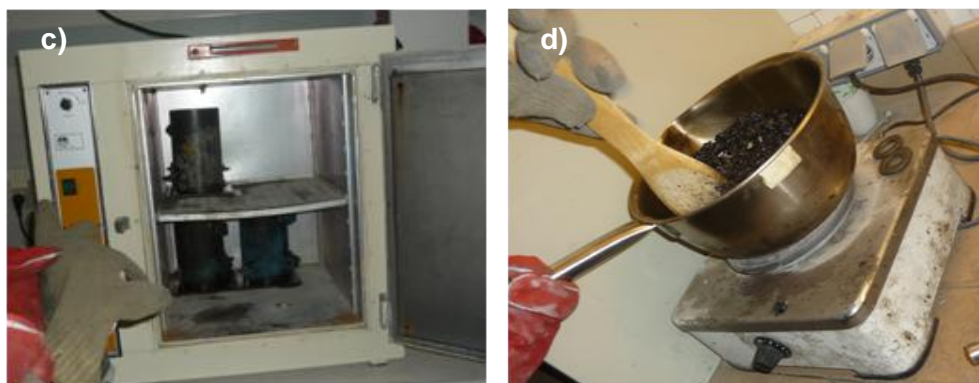


Figura 3.4 Trituración de la mezcla bituminosa (a), Calentamiento de la mezcla bituminosa en el horno (b), Calentamiento de las probetas metálicas en el horno(c), Calentamiento de la mezcla bituminosa en el hornillo(d).

Para el llenado de los moldes se colocaron las probetas en caliente al martillo percutor con pistón acoplado con el fin de verter el asfalto sin tener que desplazar el molde, antes de verterlo se le colocó al molde un papel cilíndrico para proteger la mezcla y parafina para evitar que el asfalto se impregne en el molde tal y como se muestra en la figura 3.5.a. Acto seguido se vertió la mitad de la mezcla en la probeta y se procedió a actuar el martillo por 30 segundos, asimismo la otra mitad colocando el segundo papel cilíndrico protector para volver a actuar el martillo por otros 30 segundos más, con el fin de obtener una compactación deseada. En la figura 3.5.b se puede apreciar el martillo compactador actuando.

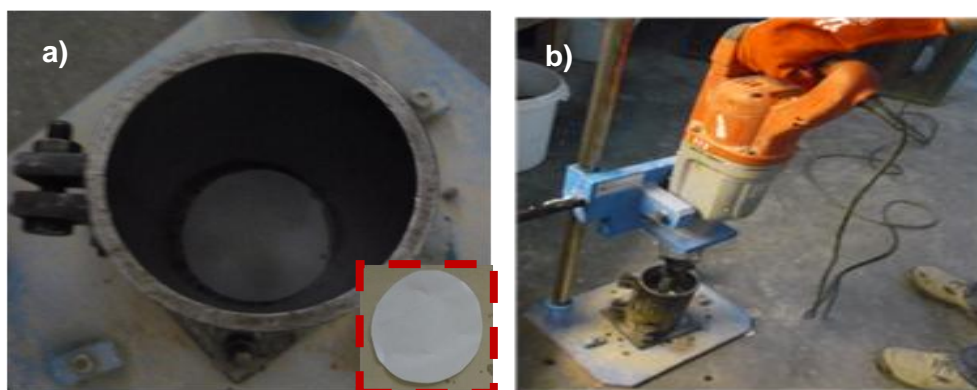


Figura 3.5 Preparación probeta de asfalto (a), Martillo percutor con pistón acoplado actuado (b).

3.4.2 Aplicación de los tratamientos de adherencia

Luego de desencofrar las semi-probetas de asfalto se procedieron a tratar cada junta con sus diferentes técnicas de adherencia. A continuación se detallarán cada fase de la fabricación de las juntas.

Asfalto-Sin Tratamiento

Para esta muestra de referencia no se le colocó nada, simplemente se encontró para proceder al vertido de hormigón.

Asfalto-Abujardado

Mediante a la pistola de agujas de funcionamiento neumático figura 3.6.a, se procedió a abujardar la superficie con el fin de obtener un relieve en la superficie de la semi-probeta. Para fijar la probeta se optó por colocarla en el molde metálico y así se facilitó el abujardado figura 3.6.b. En la figura 3.6.c se observa la aplicación y en la figura 3.6.d el terminado del mismo.



Figura 3.6 Maquina de pistola de agujas (a), Fijación de probeta en molde metálico (b), Abujardado de la semi-probeta asfáltica (c), Probetas abujardadas (d).

Asfalto-Emulsión Bituminosa

Para esta muestra se utilizó una emulsión bituminosa con el nombre conocido de riego Bit ECR1, donde ahora lleva el nombre de emulsión C60BP3ADH, tipo catiónica, módulo polímero 60%, con un índice de rotura de las emulsiones bituminosas de 3 según la norma (UNE-EN13075-1:2009, 2009), denominado del nombre según (UNE-EN13808:2013/1M:2014, 2014)

Previo a la aplicación se procedió a la limpieza de la superficie a tratar. Luego se procedió a la aplicación de la emulsión bituminosa mediante a una brocha, se aplicaron dos capas por probeta. Posterior a la aplicación se dejó curar aproximadamente 3 horas. (Figura 3.7)

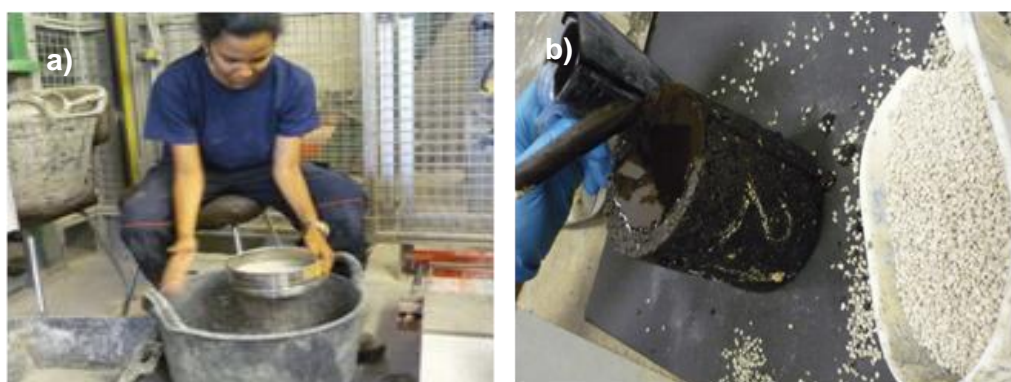


Figura 3.7 Técnica de emulsión asfáltica ECR1

Asfalto-Emulsión Bituminosa + Árido 2-5mm

Para esta muestra se utilizó la emulsión bituminosa para la adherencia del fabricante, junto con un árido de 2/5mm. Con un nombre conocido como riego ECR2, donde ahora lleva el nombre de emulsión C65bB3, según la norma tipo catiónica, módulo polímero 65%, con un índice de rotura de las emulsiones bituminosas de 3 según la norma (UNE-EN13075-1:2009, 2009)

De primera instancia se cernió el árido con el tamiz 2/5mm como se muestra en la figura 3.8.a, con un brocha se procede a darle una mano de la emulsión a la semi-probeta figura 3.8.b, seguido la colocación del árido (figura 3.8.c), asimismo se colocó una segunda capa con el árido visto como muestra la figura 3.8.d.



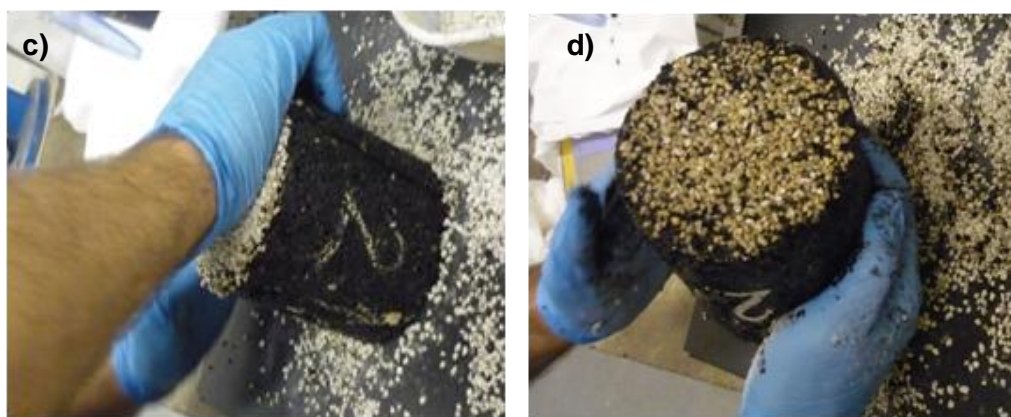


Figura 3.8 Cernido del árido (a), Colocación emulsión bituminosa (b), Colocación de los áridos (c), Técnica de emulsión asfáltica+ árido terminada (d).

Asfalto-Imprimación Asfáltica + Polvo

Para esta muestra se utilizó una imprimación asfáltica llamada Igol A fabricado por Sika Group el cual antes de utilizarlo se procedió a remover el producto con un taladro de bajas revoluciones como se muestra en la figura 3.9.a y un polvo Q6 de la empresa Sibelco Group, al igual que las otras técnicas de adherencia con productos bituminosos se aplicó mediante a una broncha, donde previo a su aplicación se limpio la superficie tal y como muestra la figura 3.9.b, luego se le aplicación dos capas figura 3.9.c y al instante la colocación del polvo, se dejó curar aproximadamente 3 horas y con un compresor se extrajo el polvo sobrante figura 3.9.d.

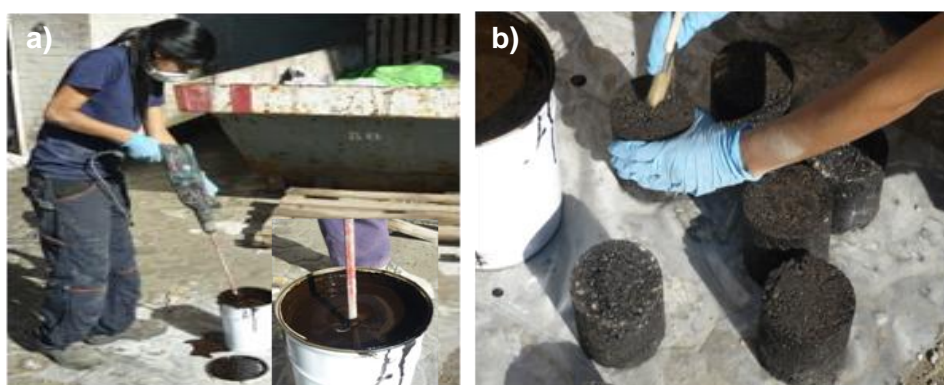


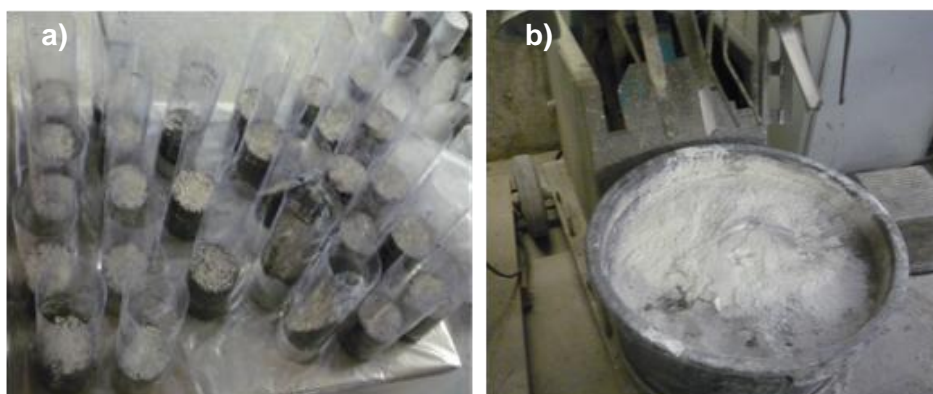


Figura 3.9 Removido del producto mediante a un taladro de bajas revoluciones (a), Limpieza de la superficie (b), Aplicación del producto + polvo (c), extracción del polvo sobrante mediante a compresor (d).

3.4.3 Fabricación del Hormigón

Luego de haber aplicado las técnicas de adherencia de las semi-probetas de asfalto, se procedió a moldearlas con láminas de PVC transparentes de 420 x 297 mm y 0,2 mm de espesor como moldes desechables, así podríamos obtener la geometría deseada de cada una de las probetas. En la figura 3.10.a muestra las probetas encofradas, listas para el vertido del hormigón.

La producción de las 5 fabricadas del hormigón de refuerzo, se logró bajo a una misma técnica de trabajo, la cual se describirá a continuación. Previo a la amasada del hormigón de refuerzo se procedió a la medición de cada uno de los materiales como muestra la tabla 3.3. Inicialmente mediante a una amasadora se introducía el árido, el cemento y el Microfiller calcáreo “Betoflow” en una amasadora figura 3.10.b, donde se mezclaban en seco durante unos 30 segundos. Sin detener la amasadora se procedía a añadir el 75% del agua, donde se deja aproximadamente 30 segundos figura 3.10.c. Luego se procedió a añadir el superplastificante figura 3.10.d junto con la nanosílice, acto seguido se introdujo el 25% del agua restante, donde se dejó amasar por un tiempo de 4 min.



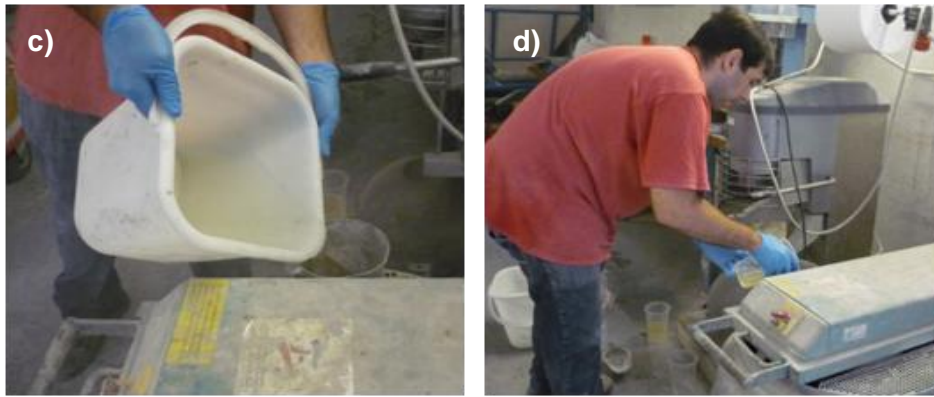


Figura 3.10 Probetas Preparadas (a), Materiales listos para amasar en seco (b), adición del agua (c), adición del superplastificante (d).

El relleno de estas probetas fue realizada mediante a palas de mano, estas no requerían vibrado ya que el hormigón era autocompactante figura 3.11.a. Para finalizar, se procedió a colocarles una manta de plástico, con el fin de evitar la pérdida de agua por evaporación figura 3.11.b. Luego de 24 horas se procedían a desencofrar para llevarlas a curar en la cámara de humedad.



Figura 3.11 Probetas hormigonadas (a), Conservación durante las primeras 24 horas (b).

3.4.4 Curado de las Probetas

Para realizar el curado de la probeta del Whitetopping de una forma efectiva, se realizó por Etapas. La primera etapa fue la base de asfalto, donde luego de haber sido fabricadas se dejaron en el molde protegidas por 24 horas con el fin de que se templaran (figura 3.12.a). Luego se desencofraron las probetas se asfalto (figura 3.12.b) para proceder a realizarles los tratamientos de juntas.

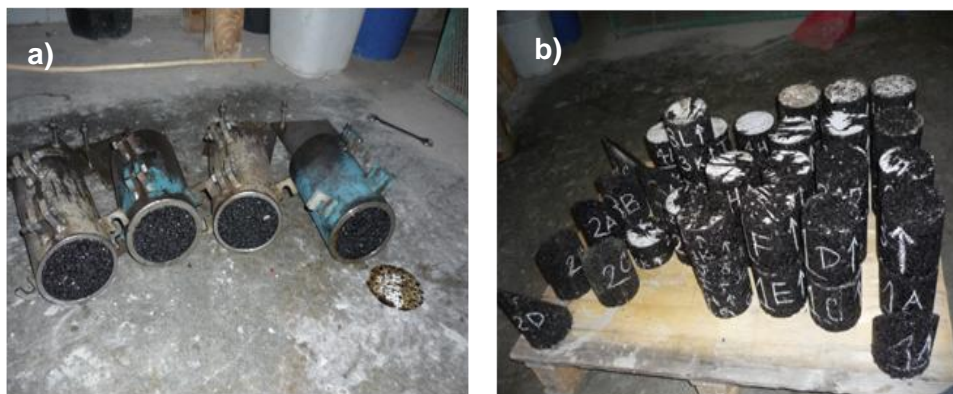


Figura 3.12 Probetas de asfalto protegidas por el molde (a), Probetas de asfalto desencofradas (b).

La segunda etapa del curado de las probetas fue las del tratamiento de juntas, donde las probetas sin tratamiento y las de abujardado no requerían ningún tipo de curado. En cambio las probetas de Emulsión Bituminosa con y sin arena y la de imprimación asfáltica, era necesario un curado del producto bituminoso al aire libre de 3 a 4 horas aproximadamente.

En la tercera etapa fue la del hormigón de refuerzo, donde luego de haberse fabricado se desmoldaron luego de 24 horas y para su curado ideal, se almacenaron en una cámara húmeda (figura 3.13.) a una temperatura $20 \pm 1^\circ \text{C}$ y una humedad relativa ambiente superior al 95%.

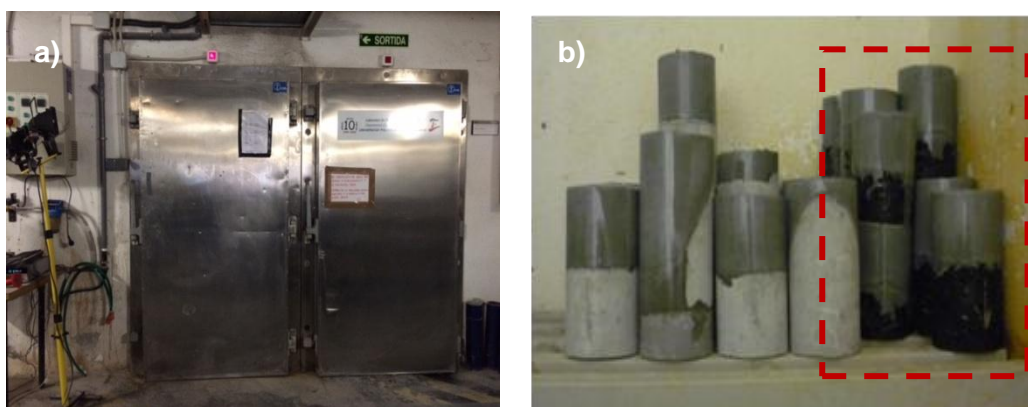


Figura 3.13 Cámara climática (a), Probetas en la cámara climática (b).

3.5 EQUIPOS DE ENSAYO

3.5.1 Prensa Hidráulica para el ensayo de tracción

Para someter las probetas a tracción se empleó mediante una prensa hidráulica de la marca INSTRON 8505, controlada mediante a un ordenador. Antes de la preparación del ensayo las probetas a traccionar, fueron pulidas y rectificadas

mediante a una máquina pulidora como muestra la figura 3.14.a. La parte inferior de la máquina es la que se queda fija, mientras que la parte superior es la que controla el ensayo.

La máquina está situada en un cuarto totalmente blindado, para una total seguridad industrial evitar daños al ensayar la probeta. En la figura 3.14.b puede observarse una vista general de la prensa.

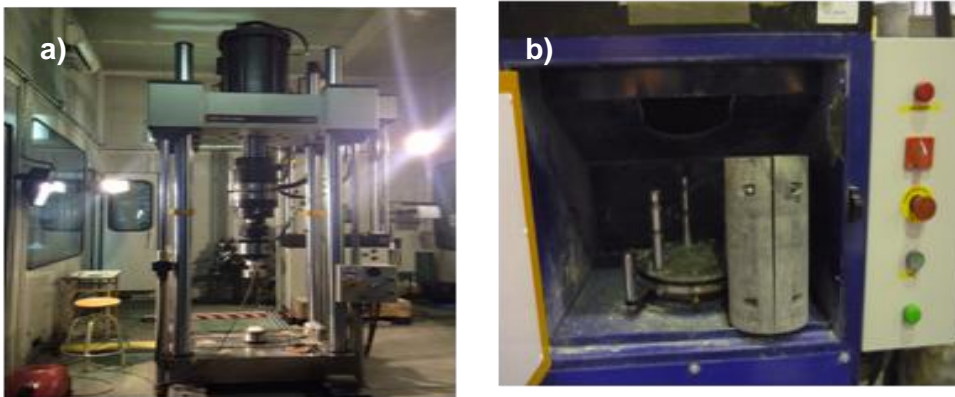


Figura 3.14 Máquina Pulidora (a), Prensa Hidráulica INSTRON (b).

3.5.2 Prensa hidráulica para caracterización de materiales, ensayo LCB y Slant Shear.

Para los ensayos LCB, Slant Shear y ensayos de caracterización del asfalto y hormigón de refuerzo se efectuaron bajo a la prensa hidráulica de marca IBERTEST modelo MEH 3000 W, controlada por un ordenador. La parte superior de la prensa es la parte fija, mientras que la inferior se situaba el émbolo. La máquina está completamente cubierta por una malla y una puerta de vidrio blindado para evitar que al ensayar las probetas salgan disparados restos del hormigón de refuerzo. En la figura 3.15 puede verse una vista de la máquina.



Figura 3.15 Prensa Hidráulica IBERTEST

La prensa fue utilizada para realizar el ensayo LCB, Slant Shear y para la caracterización de los materiales en donde se determinaron propiedades mecánicas como compresión y módulo de Young, tanto para el asfalto como el hormigón de refuerzo.

3.6 METODOLOGÍA DE LOS ENSAYOS

Para obtener unos valores representativos para la caracterización de la adherencia del Whitetopping, de primera instancia se realizaron ensayos de la caracterización de los materiales tanto del asfalto como del hormigón. Teniendo estos datos de caracterización, se procedió a realizarle los ensayos de tracción, LCB Y “Slant Shear” a las probetas de Whitetopping. A continuación se describirán cada tipo de ensayos y caracterización.

3.6.1 Descripción de los ensayos

Con el fin de lograr la caracterización de la adherencia en el Whitetopping, se propone realizar en todos los casos 3 tipos de ensayo: Ensayo de corte LCB figura 3.16.a, el ensayo a Tracción pura figura 3.16.b y el ensayo Slant Shear figura 3.16.c.

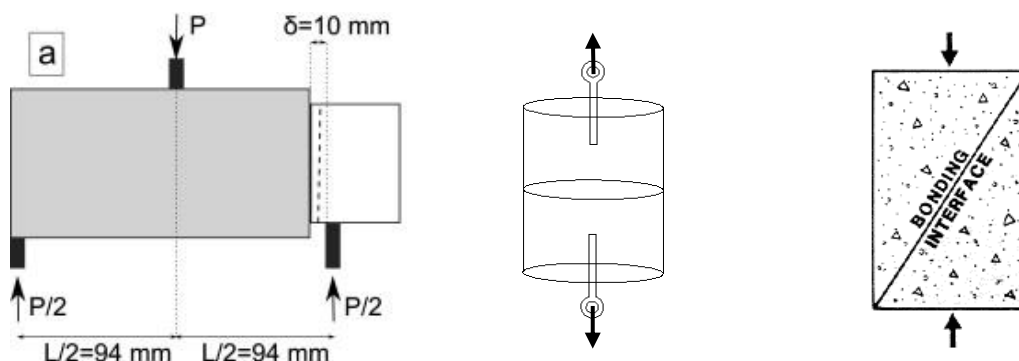


Figura 3.16 Ensayo LCB (a), ensayo de tracción pura (b) y ensayo “Slant Shear (c)”.

3.6.2 Caracterización del Asfalto

Densidad de las bases de Asfalto

Con el fin de caracterizar las probetas de asfalto, se midió la densidad de cada una de las probetas cilíndricas, con el fin de que el resultado pueda ser comparado con la densidad óptima de Marshall, la cual fue proporcionada por el fabricante de la mezcla. Se utilizó la normativa (NLT-168/90) sobre la densidad y huecos en las mezclas bituminosas compactadas.

El objetivo del método Marshall es determinar el contenido óptimo de asfalto, para una combinación específica de agregados. El método también provee información sobre las propiedades de la mezcla asfáltica en caliente, en este caso se utilizará para establecer las densidades.

La densidad de cada probeta se puede determinar tan pronto las probetas compactadas se hayan enfriado a la temperatura ambiente. Mediante a un pie de rey se miden tres alturas por cada probeta, como muestra la figura 3.17.a, y luego se pesan cada probeta con una báscula $\pm 0,1$ gramos figura 3.17.b.

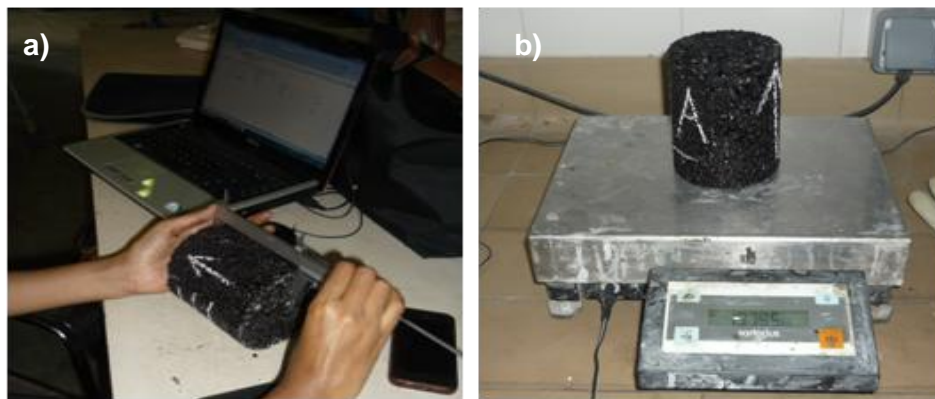


Figura 3.17 Medida de altura de probetas de asfalto (a), Pesado de una semi-probeta de asfalto (b).

Tracción Indirecta

El ensayo a tracción indirecta está realizado siguiendo las indicaciones de la normativa (NLT-346/90.) “Resistencia a compresión diametral (ensayo brasileño) de mezclas bituminosas”. Dicho ensayo se destaca por ser un método simple y representativo, que permite imitar la respuesta de un pavimento flexible y, obtener la carga máxima que aguanta una mezcla antes de romper.

Este ensayo consiste en someter a compresión diametral una probeta cilíndrica, igual a la definida en el ensayo Marshall, aplicando una carga de manera uniforme a lo largo de dos líneas o generatrices opuestas hasta alcanzar la rotura figura 3.18. Esta configuración de carga provoca un esfuerzo de tracción relativamente uniforme en todo el diámetro del plano de carga vertical, y esta tracción es la que agota la probeta y desencadena la rotura en el plano diametral. (Villar, n.d.)



Figura 3.18 Ensayo a Tracción Indirecta.

Compresión

El ensayo se realizó para determinar la resistencia a la compresión del asfalto, basándose en la normativa (NLT-161/98), sobre la resistencia a compresión simple de mezclas bituminosas. Se fabricaron en probetas de 100 mm x 160 mm. Este valor representa al esfuerzo máximo que presenta el asfalto antes de romper. El ensayo se realizó en la máquina IBERTEST modelo MEH 3000 W donde la carga aplicada estuvo controlada por un ordenador. Figura 3.19



Figura 3.19 Ensayo a Compresión.

3.6.3 Caracterización del hormigón

Módulo de Young

El módulo de Young también conocido como el módulo secante de elasticidad, seguida por las indicaciones de la normativa (UNE-EN12390-13:2014), donde los ciclos para la determinación del módulo se realizó bajo el criterio del método B.

El ensayo se realizó en la máquina IBERTEST MEH-3000 donde la carga aplicada y los resultados de la gráfica fueron controlada por un ordenador. En este caso el ensayo se realizó mediante transductores inductivos LVDT, tal y como muestra

la figura 3.20.a, los cuales median la deformación de la misma. En la figura 3.20.b muestra la probeta lista para proceder a la medición al modulo de elasticidad.

El software de forma automática realiza el proceso, de primera instancia se deben introducir los datos deseados al ordenador para que así sean controlados los ciclos, toma los datos, etc. Estos datos pueden ser visualizados en tiempo real durante la ejecución.

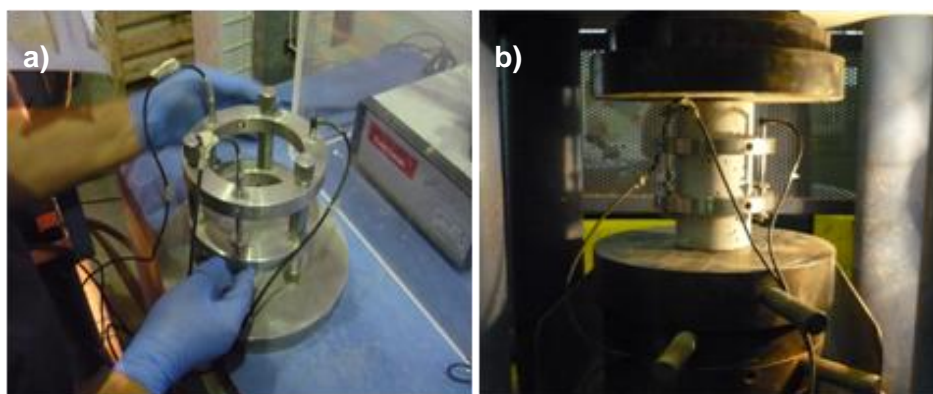


Figura 3.20 Transductores inductivos LVDT (a), Probeta de hormigón lista para ensayar (b).

Compresión

Para el ensayo a compresión simple del hormigón se utilizaron probetas de diámetro de 100 mm x 200 mm. El ensayo se realizó en la maquina IBERTEST donde la carga aplicada estuvo controlada por un ordenador. *Figura 3.21.*



Figura 3.21 Ensayo a Compresión simple del Hormigón.

Para el ensayo de la resistencia a compresión se hicieron a 28 y 60 días de edad. La fecha de 60 días corresponde a la edad del hormigón de refuerzo cuando se hicieron los ensayos para adherencia. En la tabla 3.8 se puede apreciar el valor promedio y el coeficiente de variación de los resultados obtenidos.

Parámetro	Edad días	Media (MPa)	C.V. (%)
Resistencia compresión	28	95,910	1,47
Resistencia compresión	60	101,960	8,69
Tracción indirecta	60	6,690	16,19

Tabla 3.8 Materiales empleados en las juntas

Para llegar a reducir el canto de UTW a valores entorno a los 30 mm, es necesario el empleo de hormigones de ultra-alta resistencia. Es por eso que el hormigón de refuerzo se diseñó para una resistencia a los 60 días de una media de 101,96 MPa.

3.6.4 Ensayo de tracción (“Pull-Out”)

El ensayo de tracción también llamado “Pull-out” consiste en someter la probeta a un esfuerzo axial de tracción creciente hasta que se produce la rotura de la probeta. Dicho ensayo se realizó en la máquina INSTRON 8805, con una velocidad de movimiento en el pistón de 0.001 mm/s.

Para la preparación del ensayo, tal y como muestra la figura 3.22.a la probeta a ensayar se debe de fijar en el disco metálico aplicable a la máquina, en este caso con un adhesivo bi-componente llamado HBM-X60, y se dejaba curar aproximadamente 15 minutos, y a la vez se le aplicaba peso para garantizar la adhesión. Luego la probeta se colocaba en la máquina y así se colocaba por segunda vez el adhesivo en la parte superior de la probeta (en el hormigón de refuerzo) y con la máquina una ligera carga de compresión de 0.4 kN. Al igual que la base se deja reposar por unos 15 minutos para esperar que el adhesivo cure, y luego se procedió a ensayar la probeta. En la figura 3.22.b muestra la probeta lista para iniciar el ensayo.

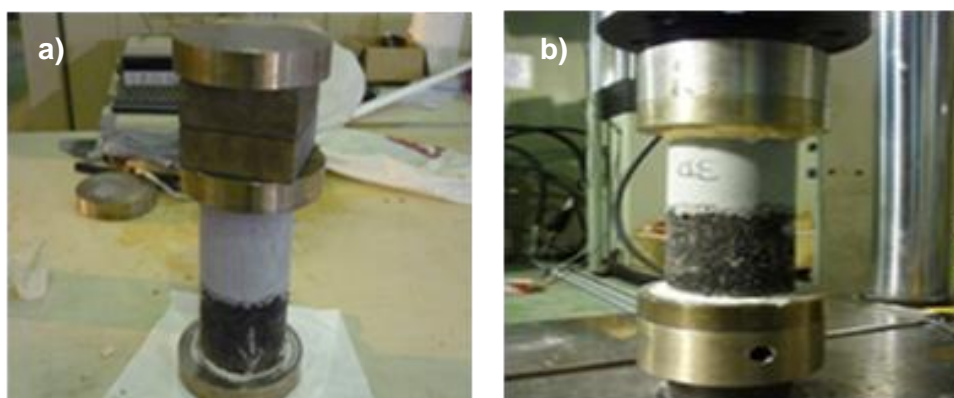


Figura 3.22 Fijación de la Probeta en la parte de la base de asfalto (a). Probeta lista a ensayar (b)

3.6.5 Ensayo LCB

El ensayo LCB (Laboratorio de Caminos de Barcelona), consiste en medir la resistencia a las tensiones tangenciales provocadas por la aplicación de una fuerza de corte que se producen en la unión de dos capas asfálticas, adheridas o no por un riego de adherencia. También se mide la deformación de una de las capas respecto la otra. (Calisto, 2007)

Se construirán probetas cilíndricas de 100 x 160 mm. Este ensayo permite tanto el control de la calidad alcanzada en obra mediante la rotura de testigos, como la evaluación del efecto de diferentes riegos de adherencia mediante la rotura de probetas fabricadas en el laboratorio. (Calisto, 2007)

El análisis de fuerzas se muestra en el modelo el indicado en la Figura 3.23.a. La parte A (la parte de la carcasa) se considera totalmente rígida, indeformable, mientras que la parte B para una probeta normal asfáltica representa la capa asfáltica superior. Se supone que se produce un esfuerzo de corte puro y que no existen esfuerzos de flexión. En el caso de las probetas Whitetopping la base de asfalto estaría en la parte A, mientras que la parte del hormigón de refuerzo queda visto en la parte B, tal y como se muestra en la figura 3.23.b.

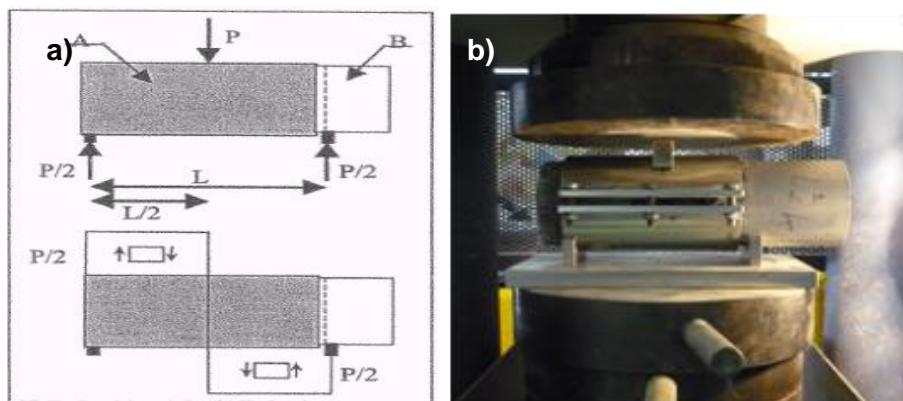


Figura 3.23 Esquema de fuerzas y tensiones actuantes sobre la disposición de la probeta. Fuente: (Calisto, 2007)(a). Probeta de Whitetopping lista para el ensayo LCB (b)

La carga aplicada deberá estar ubicada en el centro de los dos apoyos sobre la mordaza, como muestra la figura 3.24.a. el ensayo debe de seguir hasta que la capa superior de la probeta rompa, de modo que la junta quede en el exterior del molde, a 5 mm de separación. (Figura 3.24.b.)

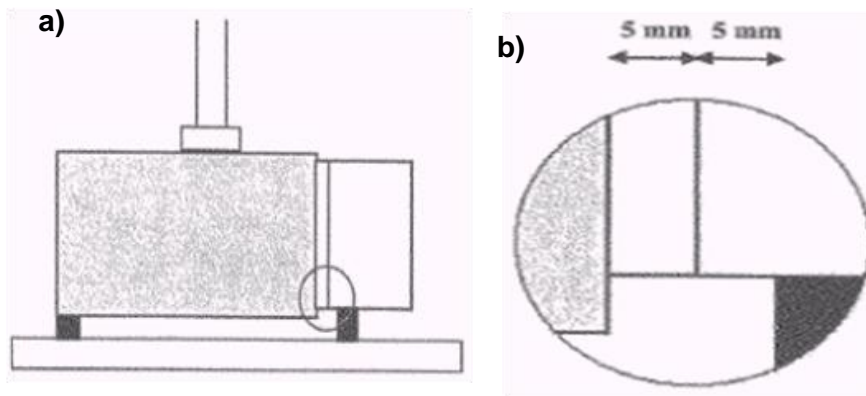


Figura 3.24 Disposición de la probeta en la prensa durante al ensayo (a), Distancia de la junta de la probeta al apoyo (b). Fuente: (Calisto, 2007)

3.6.6 Ensayo “Slant Shear”

El ensayo “Slant Shear”, también llamado por el ensayo de cizalle por compresión, en este caso de estudio se ha realizado basándose en las indicaciones de la normativa (C882/C882M-13, 2013)

Se construirán probetas cilíndricas de 100 x 200 mm, donde será sometida a carga de compresión hasta generar la falla, tomando el registro de la carga última. La probeta será fabricada en dos etapas independientes, en donde tendrá de base asfalto y la segunda mitad de hormigón, con el fin de generar la simulación de la junta Whitetopping, la junta formará un ángulo de 30° con respecto a la vertical. (Juan Pablo Rodríguez Ayuso, 2012).

En la figura 3.25.a se puede apreciar la vista en planta de la probeta Slant Shear, pulida para someterla a ensayar, asimismo la figura 3.25.b muestra la probeta colocada en la máquina lista para iniciar el ensayo.

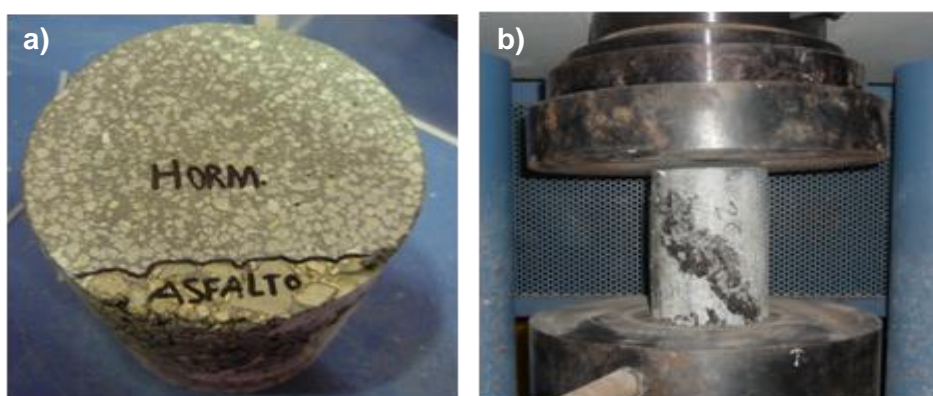


Figura 3.25 Vista en planta probeta Slant Shear (a), Probeta Slant Shear lista a ensayar (b).

4 ANALISIS DE RESULTADOS

4.1 INTRODUCCION

En el capítulo anterior se han presentado los ensayos realizados durante la campaña experimental. Mediante a la realización de dichos ensayos, se ha podido extraer numerosos resultados que caracterizan el comportamiento y las propiedades del Whitetopping, en específico la adherencia entre capas. Estos resultados se deberán tratar de un modo adecuado con la finalidad de realizar un análisis que permita extraer las conclusiones convenientes, que respondan a los objetivos planteados en el inicio del trabajo.

En el presente capítulo tiene como objetivo determinar la mejor técnica durable, para maximizar la adherencia entre el asfalto y el hormigón. Con esto se pretende conocer el comportamiento de la adherencia de la junta del Whitetopping. Mediante a este análisis se permitirá conocer las variables necesarias a tener en cuenta para la realización de una adherencia entre juntas ideal.

Este capítulo se distribuye realizando un análisis de resultados obtenidos en los ensayos de LCB, Pull-Out y Slant Shear. Cada ensayo será comparado con los

diferentes métodos de adherencia antes estudiados, los cuales nos proporcionarán la mejor técnica a recomendar.

Ya que se dispone de una enorme cantidad de datos, los resultados mostrados en este capítulo se considerarán como la recopilación de su estudio. Todos ellos aparecen en forma de gráficas y/o tablas. Todos los datos empleados en el estudio, se podrán visualizar de manera completa en los anejos.

4.2 CRITERIO DE CHAUVENET

En este caso al disponer una cantidad de forma normalizada, se pueden identificar valores atípicos en función de cuanto difieren los datos de la media. Para el análisis de resultados se empleó el Criterio de Chauvenet, que a partir de la distribución estándar del error y del número de datos permite identificar los valores atípicos.

El Criterio de Chauvenet expresa que un dato de error X_i debe ser descartado cuando se cumple la ecuación 4.1, donde \bar{x} es el valor medio de la serie de errores medidos, K_n el Coeficiente de Chauvenet y S la desviación estándar de los errores.

$$|X_i - \bar{x}| > K_n S \quad [\text{Ec. 4.1}]$$

El K_n depende del número de valores de la serie a analizar. La determinación del Coeficiente de Chauvenet se hace siguiendo la Ecuación 4.2. Donde n corresponde al número de valores.

$$K_n = 0,9969 + 0,404 \ln(n) \quad [\text{Ec. 4.2}]$$

4.3 ENSAYO DE TRACCIÓN (“PULL-OUT”)

El ensayo de “Pull-out” pretende determinar el esfuerzo máximo a tracción, donde se somete a deformación longitudinal y se mide la fuerza aplicada. Es necesario esperar hasta el momento de la rotura total de la probeta ensayada, con el fin de determinar si el lado más frágil de la probeta es de los materiales o de la junta. Se prevé que la rotura sea en la junta, ya que teóricamente es el lado más débil de la probeta.

En este tipo de ensayo se basa en determinar la resistencia en la adherencia entre la base asfáltica versus el hormigón de refuerzo Whitetopping, aunque el valor de la adherencia se considera una de las propiedades más variables e impredecibles,

este valor lo podemos determinar con el valor del esfuerzo normal donde por defecto la probeta haya roto en la junta.

Con el propósito de obtener los valores deseados, se ensayaron en este caso 30 probetas Whitetopping en total, en donde 6 de ellas representaban cada tipo de las 5 técnicas de adherencia estudiadas.

Este ensayo propone comparar los resultados del esfuerzo normal en cada tipo de probeta. Al inicio del ensayo se procedió a ensayar las probetas con una célula de carga de 200 kN, donde sus resultados mostraron una gran dispersión en sus resultados, es por eso que se optó por hacer un cambio de una célula de carga, a una de 5 kN. En la figura 4.1 presenta el valor medio de los resultados, en este caso con las probetas sin tratamiento.

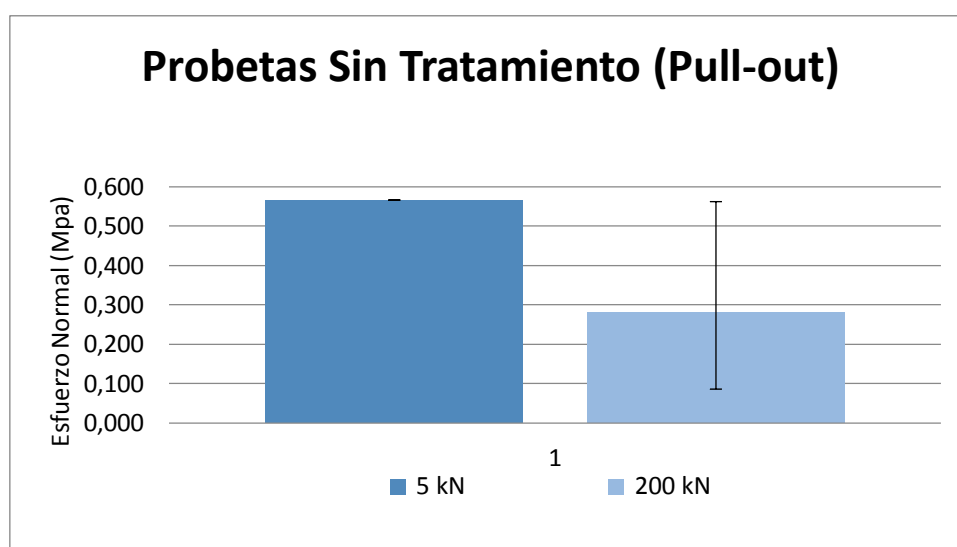


Figura 4.1 Gráfica Pull Out

Célula de Carga	Resultado		
	Promedio (Mpa)	Dev. Est. (Mpa)	C.V. (%)
5 kN	0,566	-	-
200 kN	0,281	0,195	69,44

Tabla 4.1 Resultados del ensayo Pull Out

La figura 4.1 muestra los resultados para los ensayos de las probetas sin tratamiento, donde fueron las únicas probetas que sus resultados fueron afectados. Como se puede observar en la figura 4.1, el cambio de la célula de carga se debió, a los resultados que estaba arrojando la de 200kN, es decir, los valores de rotura eran tan mínimos y dispersos que la célula de carga no determinaba un resultado verosímil.

Las únicas probetas que fueron influenciadas en los resultados por la célula de carga, fueron las probetas sin tratamiento, ya que se utilizaron 4 probetas de ellas con la célula de carga de 200kN, es por eso que en los resultados obtenidos en la figura 4.1 se puede apreciar una gran dispersión en los resultados.

En este estudio, la resistencia obtenida por el ensayo Pull out puede verse influenciado por dos factores: el tipo de técnica de adherencia en cada una de las juntas de las probetas y la precisión en los resultados por el cambio de la célula de carga.

Para poder obtener una comparación real de resultados, en la figura 4.2 se pueden apreciar los resultados obtenidos mediante a la célula de carga de 5 kN.

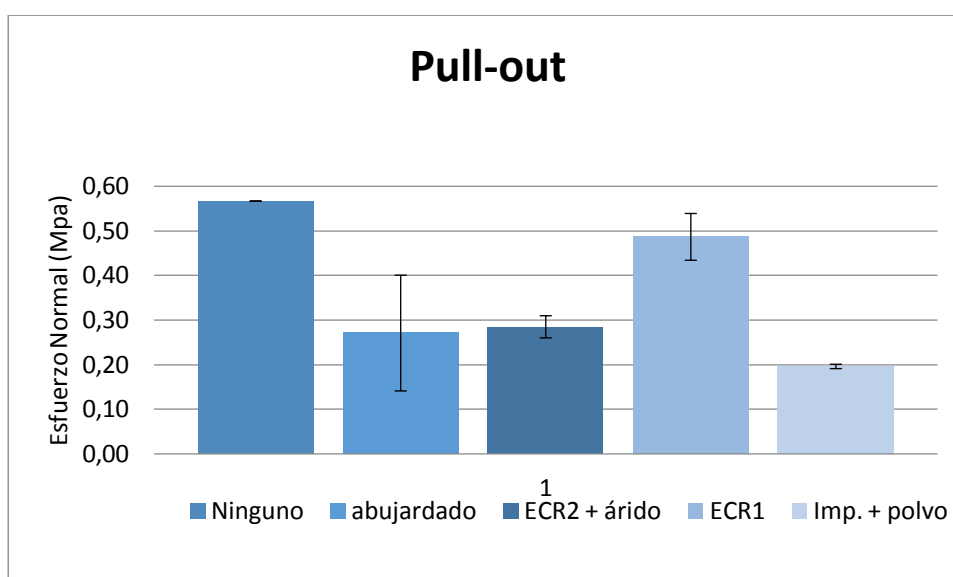


Figura 4.2 Gráfica Ensayo a tracción con célula de carga de 5kN

	Resultado		
	Promedio (MPa)	Desv. Est.(MPa)	C. V. (%)
Ninguno	0,570	-	-
Abujardado	0,270	0,129	48,01
ECR2 + árido	0,284	0,024	8,74
ECR1	0,490	0,052	10,80
Imp. + polvo	0,196	0,004	2,53

Tabla 4.2 Resultados del ensayo Pull Out con célula de carga de 5kN

Teniendo en cuenta los resultados en base a la célula de carga de 5 kN, como muestra la figura 4.2, las probetas de las juntas ECR2+árido al igual que el de la imprimación+polvo son las que representan la menor resistencias, esto se debe a que la resistencia del betún de la junta son menores a la del betún del asfalto.

Las probetas abujardadas en comparación con las probetas sin tratamiento, dieron un valor menor, esto se debe a que al abujardarse perdiera porosidad superficial que en este caso perdería adherencia. Mientras que las sin tratamiento tenían una cierta porosidad superficial, lo cual permitía que penetrara la lechada del hormigón de refuerzo, y esto provocó que en comparación con la de abujardado, resistiera más. Como muestra la figura 4.3.a todas las probetas sin tratamiento en la junta, rompía el asfalto, lo que corresponde a que sí había una superficie de anclaje que pudo resistir más que el asfalto. Así mismo como muestra la figura 4.3.b. la probeta abujardada rompe por su lado más débil que en este caso es la junta.



Figura 4.3 Ensayo Pull-out junta sin tratamiento (a). Ensayo Pull-out junta abujardada (b)

4.4 ENSAYO LCB

El ensayo LCB (Laboratorio de Caminos de Barcelona) pretende determinar los esfuerzos de corte, se considera un ensayo para cuantificar la resistencia de la adherencia. Del mismo modo del ensayo anterior se compararán los resultados de los diferentes tipos de tratamiento de juntas.

Si aplicamos una carga P en la mitad de la luz de la viga, la ecuación que da el valor de las tensiones tangenciales sobre la junta es:

$$\tau = \frac{P/2}{S} \quad [\text{Ec. 4.3}]$$

τ : Tensión tangencial sobre la junta

P : Carga Aplicada

S : Superficie de la Sección transversal de la probeta

Este ensayo se propone comparar los resultados del esfuerzo de corte en cada tipo de probeta. El valor medio de cada probeta se representa en la figura 4.4 en forma

de barra y ésta se determina mediante la [Ec. 4.3], donde se puede apreciar los resultados y la desviación estándar.

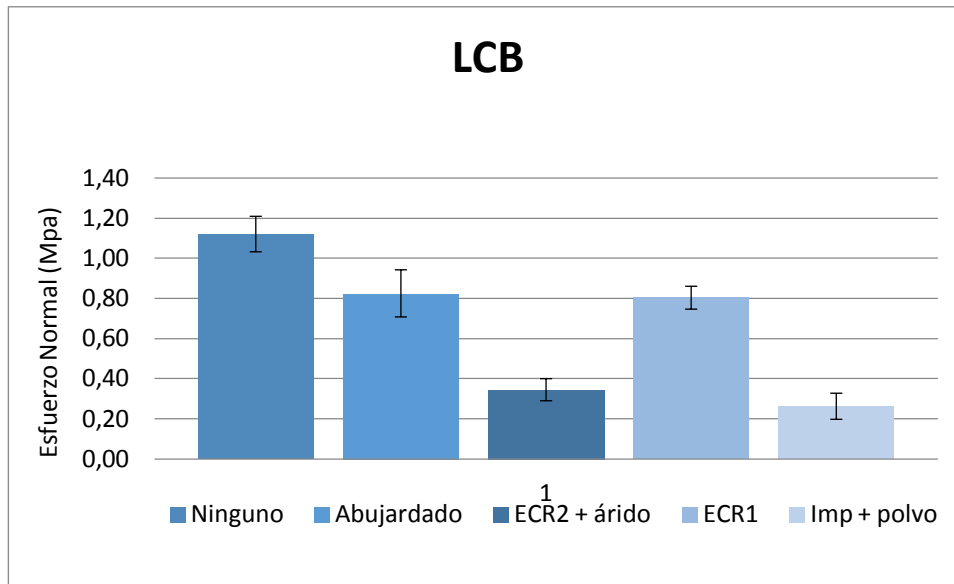


Figura 4.4 Gráfica Ensayo LCB

	Resultado (MPa)		
	Promedio	Desviación Estándar	Desviación Estándar (%)
Ninguno	1,12	0,09	7,90
Abujardado	0,82	0,12	14,27
ECR2+árido	0,34	0,06	16,05
ECR1	0,80	0,06	7,10
Imp +polvo	0,26	0,07	24,92

Tabla 4.3 Resultados del ensayo Pull Out

Las probetas Asfalto-Sin tratamiento presentan una tensión de corte de 1,12 MPa, siendo notablemente la técnica de adherencia con mayor resistencia a corte. Luego le siguen con valores similares el Abujardado con 0,82 MPa y el ECR1 con 0,80 MPa. Con la menor de las resistencias está la técnica de Imprimación+Polvo con 0,1955 MPa.

Al igual que el ensayo anterior se calculó su desviación estándar en donde los valores de las probetas Imprimación+Polvo fueron las que tuvieron mayor dispersión con una desviación estándar de un 24,92%, luego la probetas ECR2+Árido con un 16,05%, aproximándose al valor le siguen las probetas Abujardadas con un valor de 14,27%, siguiendo las probetas sin tratamiento con 7,90% y como una dispersión

mínima la técnica de ECR1 con una dispersión porcentual de 7,10% tal y como muestra la tabla 4.3.

En este caso, notablemente las probetas sin tratamiento resultaron ser las de mayor resistencia, esta al igual que ensayo anterior resultaron ser la más factible ya que al tener más porosidad superficial, resultó ser la que proporcionó mas superficie de anclaje. Siguiéndole el abujardado que a pesar que no nos proporcionó una porosidad superficial como si hubiese sido la de un fresado, resultó ser la segunda técnica más factible.

En cambio las probetas con las juntas ECR2+árido al igual que el de la imprimación+polvo, al igual que el ensayo anterior, fueron la que menos resistencia proporcionaron. Luego de ser ensayadas, como es el caso de las de ECR2+árido se despegó el betún junto al árido de la junta como muestra la figura 4.5.a y figura 4.5.b, pero no el asfalto, con esto se comprueba que el betún de las juntas contiene poca resistencia, y para poder alcanzar mejores resultados se requeriría de un betún de mayor resistencia.

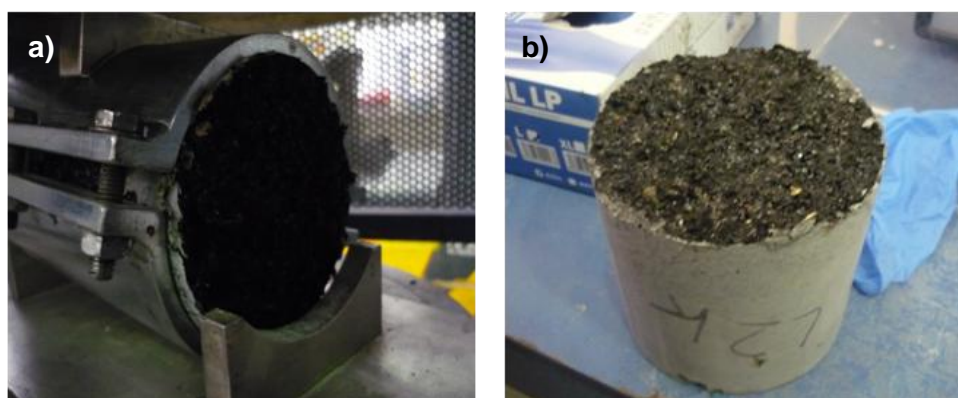


Figura 4.5 Ensayo LCB con junta de tratamiento de ECR2+árido (a). Parte del Hormigón de refuerzo de la probeta LCB con junta de tratamiento de ECR2+árido (b)

4.5 ENSAYO “SLANT SHEAR”

El ensayo Slant Shear, conocido como ensayo de cizallamiento oblicuo, ensayo que nos mide resistencia al corte en el ensayo de compresión. El ensayo pretende determinar la resistencia de la unión es decir un ensayo para cuantificar la resistencia de la adherencia, en este caso de la junta en el Whitetopping.

Para calcular la tensión de corte último primero es necesario calcular el área nominal de la superficie de la junta. Esto se hizo de la siguiente forma:

$$An = \frac{A}{\text{sen}(\phi)} \quad [\text{Ec. 4.4}]$$

De esta forma se calcula la tensión de corte última de la junta de hormigonado como se muestra a continuación.

$$Tu = \frac{Pu}{A} \cdot \cos(\phi) \cdot \text{sen}(\phi) \quad [\text{Ec. 4.5}]$$

Finalmente se obtiene,

$$Tu = \frac{Pu}{2 \cdot A} \cdot \text{sen}(2 \cdot \phi) \quad [\text{Ec. 4.6}]$$

T_u : Tensión de corte última en el plano de la junta [MPa].

P_u : Carga última de la máquina [ton].

A : Sección transversal del prisma [cm²].

ϕ : Ángulo entre el plano de la junta y la arista mayor del prisma [°].

El análisis tensional en el plano de la junta para la carga última se describe mediante el círculo de Mohr correspondiente como muestra la figura 4.6, (Juan Pablo Rodriguez Ayuso, 2012)

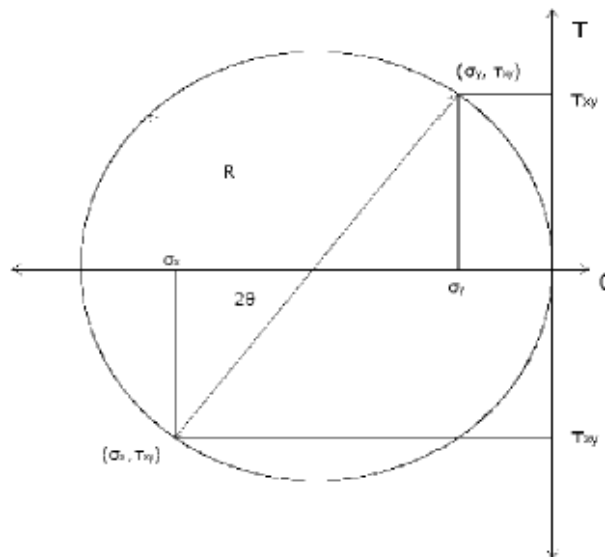


Figura 4.6 Círculo de Mohr. Fuente: (Juan Pablo Rodriguez Ayuso, 2012)

Al igual que los ensayos anteriores, este propone comparar los resultados, en este caso la tensión aplicada en cada tipo de probeta. El valor medio de cada probeta se representa en la figura 4.7 en forma de barra.

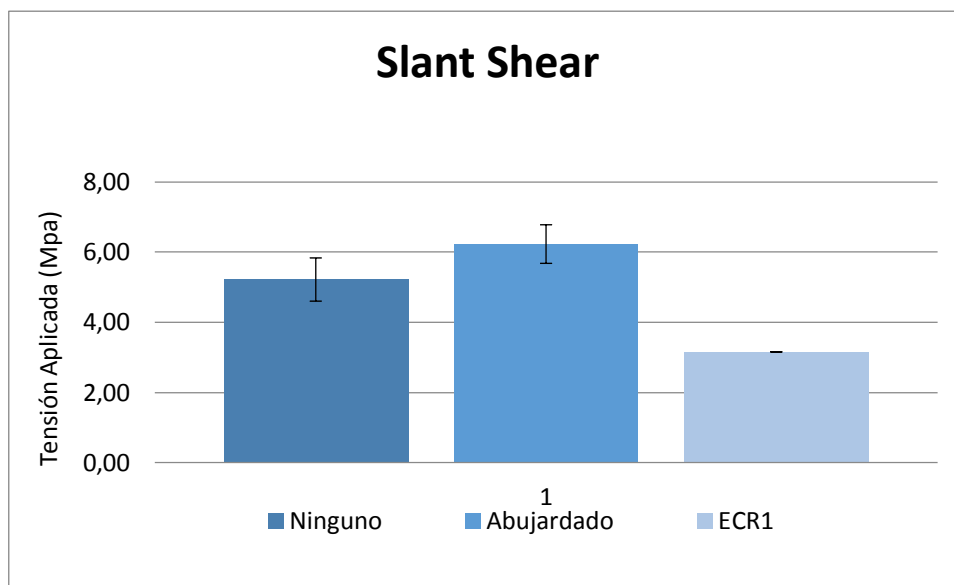


Figura 4.7 Gráfica Ensayo Slant Shear

	Resultado (MPa)		
	Promedio	Dev. Est.	Dev. Est. (%)
Ninguno	5,22	0,61540	11,79
Abujardado	6,23	0,54997	8,82
ECR1	3,16	0,00000	0,00

Tabla 4.4 Resultados del ensayo Slant Shear

En este caso solo se pudo analizar los resultados de 3 tipos de tratamientos de juntas, tal y como muestra la figura 4.7 los sin tratamiento, abujardado y el ECR1, donde el abujardado presenta la mayor aplicada de todas los tipos con un promedio de 6,23 MPa, siguiéndole el sin tratamiento con 5,22 y para finalizar con una resistencia menor notable, la técnica de ECR1 con 3,16 MPa.

Al igual que los ensayos anteriores se calculó su desviación estándar en donde los valores de las probetas sin tratamientos fueron las que tuvieron mayor dispersión con una desviación estándar de un 11,79%, luego la probetas abujardadas con un 8,82% y para finalizar con una dispersión nula, la técnica de ECR1 con un 0% y es debido a que solo hubo una sola muestra a ensayar. Estos valores se pueden observar en la tabla 4.4.

Las probetas Abujardadas parecen ser mejor que las de sin tratamiento, pero tampoco es que tengan una dispersión elevadas entre ellas. Mientras que la ECR1 al no tener un mínimo de probetas a comparar no se puede sacar ninguna conclusión

definitiva, pero si se observa que la resistencia obtenida es menor que las otras técnicas.

El resultado en la tensión aplicada se descompone en 2, en el esfuerzo normal y el de corte la cual se determina mediante la [Ec. 4.6]. En la tabla 4.5 se pueden observar los resultados correspondientes a dicha descomposición.

	Esfuerzo normal			Esfuerzo corte		
	Promedio (MPa)	Dev.Est. (MPa)	C.V. (%)	Promedio (MPa)	Dev. Est. (MPa)	C.V. (%)
Ninguno	1,31	0,15	11,79	2,26	0,27	11,95
Abujardado	1,56	0,14	8,97	2,70	0,24	8,89
ECR1	0,79	-	-	1,37	-	-

Tabla 4.5 Resultados del ensayo Slant Shear esfuerzo normal y de corte.

Al descomponer la tensión aplicada en el esfuerzo normal y de corte, se puede apreciar en la tabla 4.5 que el esfuerzo de corte presenta el promedio con mayor resistencia en los 3 tipos de casos de tratamiento de junta, donde el abujardado presentó una mayor superficie de anclaje con un promedio en el esfuerzo de corte de 2,70 MPa, siguiendo las probetas de asfalto sin tratamiento con 2,26 MPa, y para finalizar la probeta de ECR1 con la menor de las resistencias está la técnica de ECR1 con 1,37 MPa.

4.6 INFLUENCIA DE LA RUGOSIDAD

Con el objetivo de obtener información adicional sobre la adherencia, se propuso determinar si la rugosidad superficial de las bases de asfalto, puedan influir en los resultados de los análisis, se procedió a medir la rugosidad del asfalto con el fin de realizar un análisis comparativo sobre la rugosidad de la base de asfalto versus la tensión LCB.

El proceso de medida de la rugosidad se iniciaba limpiando la superficie de las bases con agua, con el fin de eliminar el posible polvo existente. Se dejaban secar al sol y, una vez secas, se pesaban con una báscula. Luego, se vertía la arena. La probeta de asfalto con la arena se volvía a pesar y, al conocer la densidad de la arena y el área de la superficie a tratar, se puede obtener la profundidad media de la arena.

Se considera que a mayor rugosidad en la capa de la base se puede lograr mejoras en la adherencia teniendo mayor fricción y superficie de anclaje. En este caso

se utilizaron las probetas de asfalto abujardadas que teóricamente son las más propensas a tener una mayor rugosidad.

Esta gráfica comparativa propone determinar si la rugosidad de la superficie de las semi-probetas de asfalto, pueda influir en los resultados de los ensayos de la adherencia (en este caso en el ensayo LCB), o tiene algún tipo de correlación rugosidad versus tensión LCB. En la figura 4.8 muestra la gráfica Rugosidad superficial-LCB en donde se calculó la rugosidad en mm versus la tensión de corte en MPa.

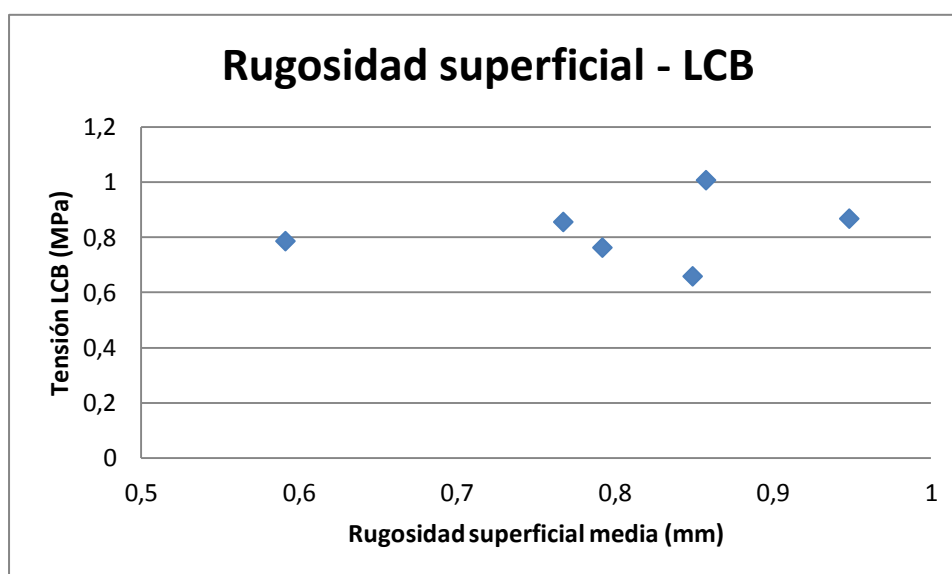


Figura 4.8 Gráfica Rugosidad Superficial-LCB

Gráfico rugosidad-LCB probetas Abujardadas		
Probeta	rugosidad (mm)	Tensión LCB (MPa)
1G	0,767207412	0,856
1H	0,849137531	0,659
1I	0,59124245	0,7865
1J	0,948294083	0,868
1K	0,857591863	1,0075
1L	0,791981871	0,763

Tabla 4.6 Resultados rugosidad-LCB probetas fresadas

En la tabla 4.6 se puede observar unos valores que oscilan, es decir, que los valores no fueron influenciados por la rugosidad de la junta. Esto se puede deber a que el abujardado no le incorporó la rugosidad necesaria para obtener una mayor superficie de anclaje, es posible que la rugosidad empleada por el abujardado sea tan mínima que para el ensayo fue una superficie rugosa poco significativa.

4.7 CORRELACIÓN DE ENSAYOS

Luego de obtener los valores de los ensayos antes descritos, en este apartado se propone realizar análisis de correlaciones de los ensayos entre sí, con el fin de determinar si algunos ensayos puedan depender del otro.

Se realizarán correlaciones en gráficas sobre PullOut-LCB, PullOut-Slant Shear, y LCB-Slant Shear, donde se pretende visualizar y analizar si existe una correlación entre los resultados, esta correlación se pretende verificar mediante a una pendiente promedio, obtener una ecuación y un R^2 que permita visualizar si los valores se correlacionan. Mientras más cercano este el R^2 al 1, se puede decir que existen una correlación de valores.

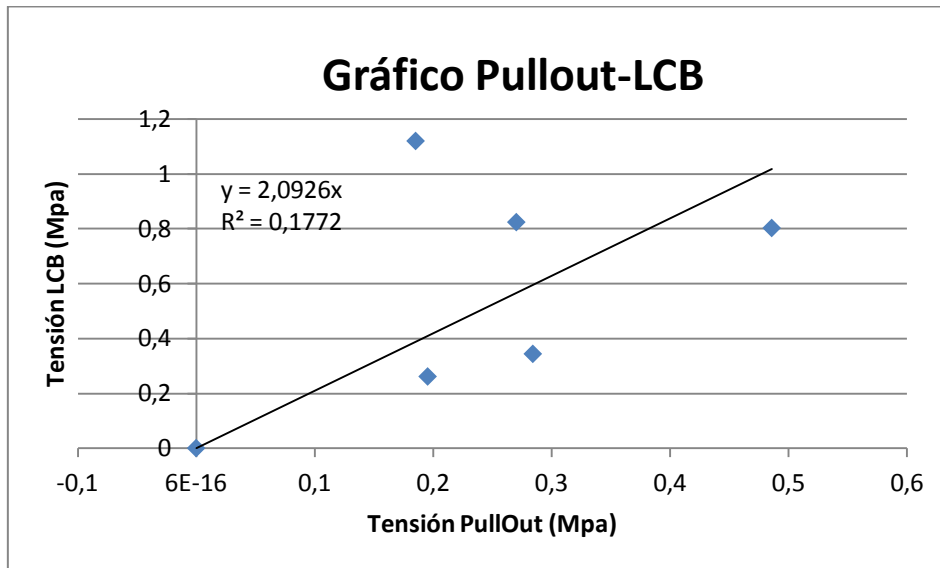


Figura 4.9 Gráfico Pullout-LCB

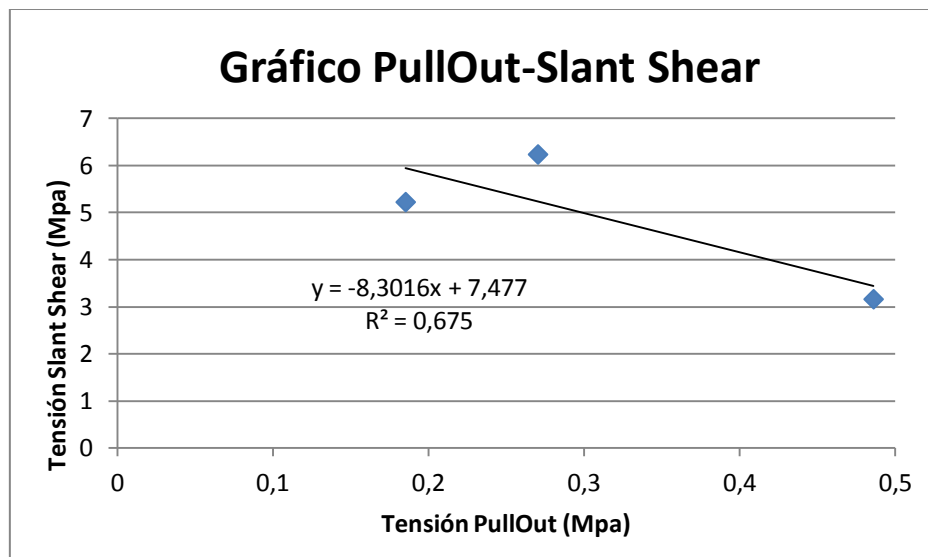


Figura 4.10 Gráfico Pullout-Slant Shear

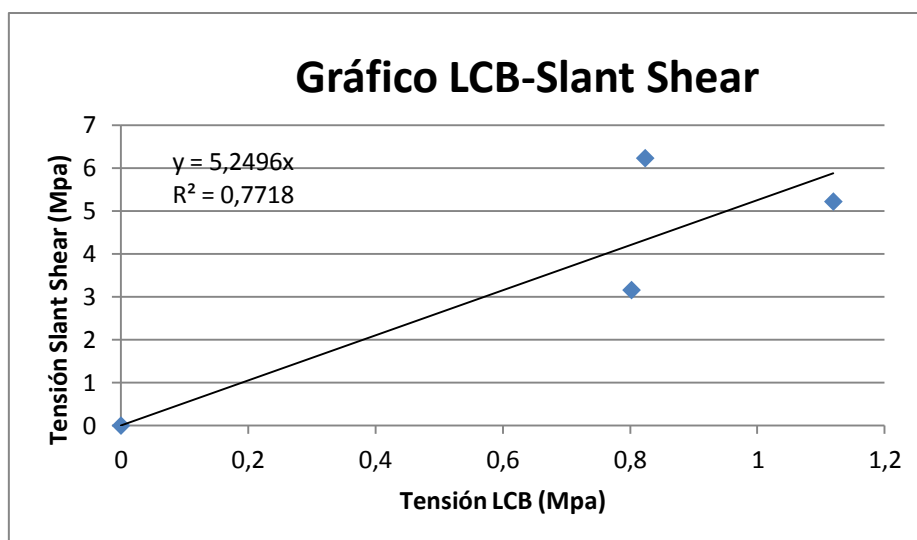


Figura 4.11 Gráfico Pullout-LCB

Luego de realizar estos tipos de correlaciones, no existe ninguna tendencia clara entre sus resultados, pero si se puede observar que en el caso de la figura 4.9, que a mayor resistencia Pullout incrementa la resistencia del LCB. En la figura 4.10 solo sin tener en cuenta el tratamiento de ECR1, se observa que a mayor resistencia a Pull Out mayor es el Slant Shear (teniendo en cuenta las probetas sin tratamiento y abujardadas). Y en la figura 4.11 aunque no muestre ningún tipo de correlación, los resultados son los que más se acercan a la línea de tendencia, con un $R^2 = 0,7718$.

4.8 CRITERIO PARA UN MÉTODO DE ENSAYO ADECUADO

Según Van Mier, pueden existir varias razones para la elección de una prueba estándar. La primera es determinar ciertos parámetros que sean necesarios en un modelo aceptado, utilizado en práctica. En segundo lugar, el método de ensayo puede ser utilizado para comparar los resultados obtenidos. Por último, se podría utilizar como un medio de control de calidad en la práctica. (Walraven, 2000)

Luego de haber ensayado y obtenido los resultados, se definieron los siguientes criterios para evaluar el procedimiento de las pruebas entre sí: (Walraven, 2000)

- La complejidad de la configuración de prueba
- La complejidad de la preparación de los especímenes
- La complejidad de la ejecución
- La reproducibilidad de la prueba
- Los costes (de trabajo) y la aplicabilidad en la práctica

- Aceptación de método de prueba por los investigadores

La aplicabilidad de las mediciones ha sido evaluada sobre la base de:

- La complejidad de los resultados de pruebas de procesamiento
- La fiabilidad de los resultados

Para determinar el ensayo más adecuado con el fin de probar la adherencia en la interfaz asfalto-hormigón, se realizó una evaluación llamada Múltiples Criterios de Evaluación (MCA). En la tabla 4.7 los 3 ensayos de prueba, fueron evaluados utilizando los criterios del MCA.

Cada puntaje, serán indicado dependiendo el criterio. Esta puntuación puede variar entre 1 (el peor caso) y 5 (mejor de los casos) y se multiplica por un factor de peso para obtener valores ponderados. La puntuación total se muestra para cada prueba en la última fila de la tabla 4.6

Los criterios y factores de peso en la Tabla se eligieron subjetivamente. Sin embargo, fueron elegidos de acuerdo al punto de vista que la razón de las pruebas es desarrollar un modelo adecuado y fiable que se puede utilizar la práctica n edificio. (Walraven, 2000)

Criterio	Factor de peso	Ensayo Pull-out	puntuación Ensayo Pull-out	Ensayo LCB	puntuación Ensayo LCB	Ensayo Slant Shear	puntuación Ensayo Slant Shear
1. Complejidad de la configuración de prueba	1	3	3	1	1	1	1
2. Complejidad de la preparación de los especímenes	2	3	6	3	6	5	10
3. La complejidad de la ejecución	3	3	9	1	3	1	3
4. La reproducibilidad de la prueba	10	2	20	3	30	3	30
5. Costes de trabajo	1	4	4	2	2	2	2
6. Aceptación de método de prueba por los investigadores	6	3	18	3	18	3	18
7. Complejidad de los resultados de las pruebas	2	1	2	1	2	1	2
8. Fiabilidad de los resultados	10	3	30	4	40	2	20
Total puntuación Σ			92		102		86

Tabla 4.7 Criterios de Evaluación MCA

La tabla 4.7 demuestra que el LCB es el método de ensayo más adecuado de acuerdo con los criterios y factores de ponderación utilizados, con una puntuación 102. Además cabe destacar que el estudio del LCB considera uno de los más utilizados para la valoración de la adherencia entre capas. Luego con una puntuación de 92, el ensayo de Pull-out y para finalizar, el ensayo de Slant Shear, con una puntuación de 86, siendo esta el peor de los casos.

4.9 CRITERIO DE ROTURA

Robins y Austin presentaron la idea sobre la reparación de hormigón sobre fallas de adherencia. Esto se basa en los ensayos de Pullout, Slant Shear y Corte, que dan resultados a tracción pura y estados de compresión de esfuerzo o corte. (Austin, Robins, & Pan, 1999)

Con el fin de identificar el fallo mayor de adherencia, es útil tener en cuenta el comportamiento del material, con referencia a las teorías de fallos. En donde se propone, mediante a un criterio de rotura evaluar los esfuerzos normal/corte combinados, conduce naturalmente a la consideración de un enfoque de Mohr-Coulomb. (Austin et al., 1999)

El criterio de rotura se basa de una relación bilineal con una resistencia, a la tracción de corte. Obteniendo los datos experimentales, los círculos de Mohr puede ser una alternativa que se ajusta a los datos. Algunos investigadores optan por trazar curvas de potencia empírica de los datos para evitar el círculo de Mohr. (Austin et al., 1999)

En este caso se utilizarán tres modelos, donde ha de utilizarse la aplicación del criterio de Griffith, donde esta expresado en términos del cortante. Expresándose por la ecuación 4.7.

$$T = \sqrt{4T_o(\sigma_n + T_o)} ; T_o = \frac{LCB}{2} \quad [\text{Ec. 4.7}]$$

T: Criterio de Griffith (Valor Tau)

T_o: Esfuerzo a cortante entre dos

σ_n: Valor sigma

Un modelo de interpolación lineal entre los puntos promedios de los resultados y un modelo propuesto, la cual se expresa por la ecuación 4.8.

$$\gamma = \sqrt{\frac{\tau_{lcb}^2}{\sigma_{p-o}} (\sigma_{p-o} - x)} \quad [\text{Ec. 4.8}]$$

γ : Modelo Propuesto (Valor Tau)

τ_{lcb} : Esfuerzo a cortante

σ_{p-o} : Esfuerzo normal

X: Valor sigma

Mediante al criterio Mohr-Coulomb, se analizaron varios modelos comparativos como se presentarán a continuación, que mediante a las tres curvas comparativas se podrá indagar cual es la más factible ante las técnicas adherentes: sin tratamiento, abujardada y con el ECR1, teniendo en cuenta que los valores que pasan por debajo de la curva resisten.

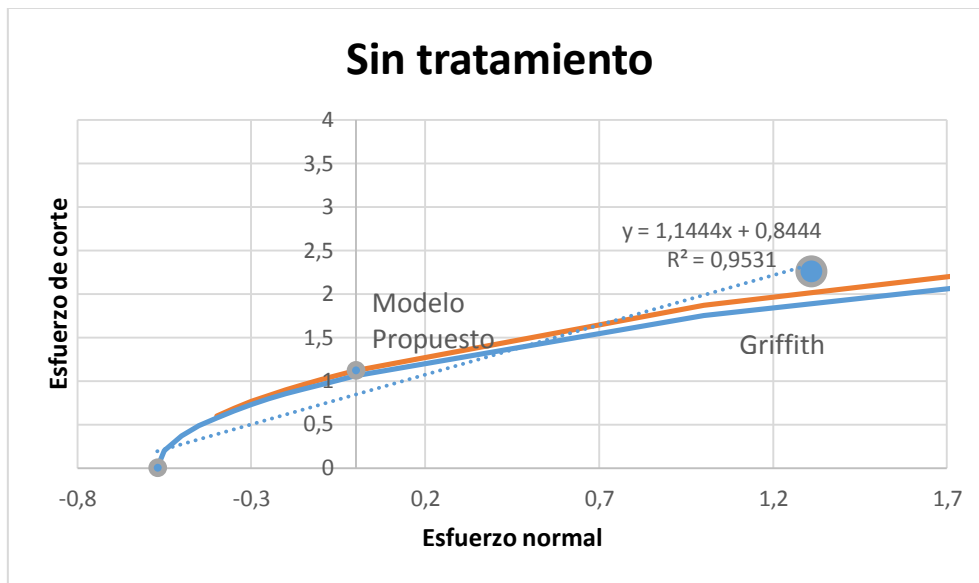


Figura 4.12 Criterio de rotura probetas sin tratamiento

En la figura 4.12 presenta el criterio de rotura de probetas sin tratamiento, como se observa, para los valores negativos, es decir para los valores de esfuerzo normal, el modelo que más va acorde sería el propuesto, seguido por el Griffith y de último la interpolación lineal. Por otro lado, para los valores positivos el mejor de los casos sería el de la interpolación lineal, seguido por el modelo propuesto y luego la interpolación lineal

Como es de esperar, el valor que pasa por el punto Pull-out es el modelo propuesto, donde en este caso también hace intersección con el punto Punto LCB. Para este caso el la interpolación lineal sobre valora mucho los esfuerzos normales negativos y es por esto que se recomendaría utilizar el modelo propuesto

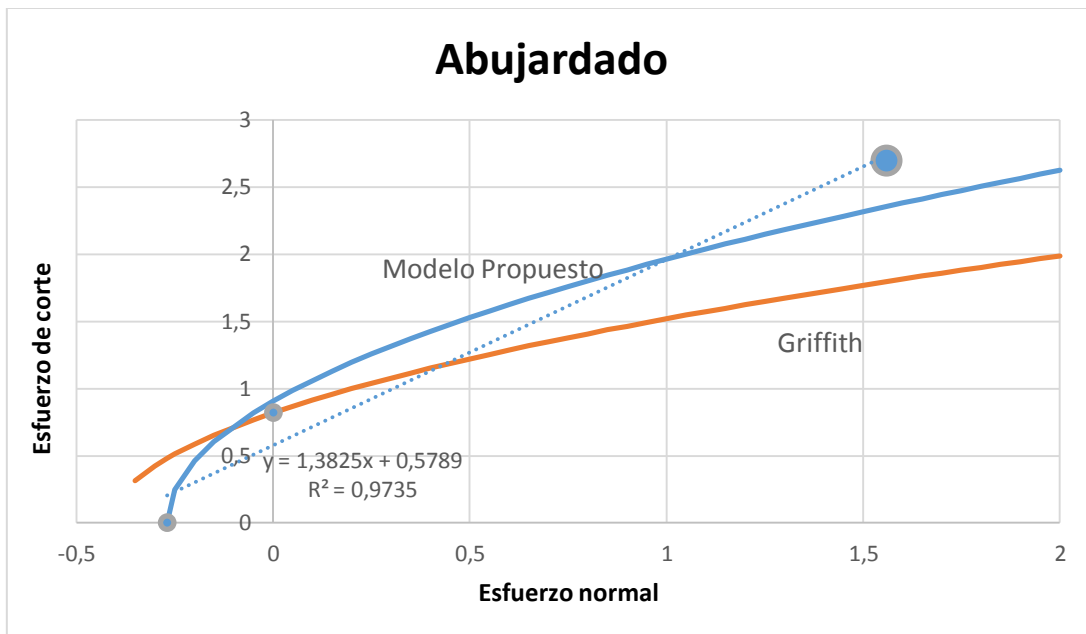


Figura 4.13 Criterio de rotura probetas Abujardadas

En la figura 4.13 presenta el criterio de rotura de probetas abujardadas, y al igual que para las probetas sin tratamiento, se observa, que para los valores negativos, la curva que más va acorde sería el modelo propuesto, seguido la interpolación lineal y el que presenta la mayor falla, el Griffith.

Por otro lado, para los valores positivos, el mejor de los casos sería el de la interpolación lineal, seguido por el parabólico y el Griffith, siendo el más desfavorable. Aunque el parabólico se aproxima a los tres puntos, en este caso se recomendaría utilizar la gráfica de interpolación lineal, ya que es la más conservadora

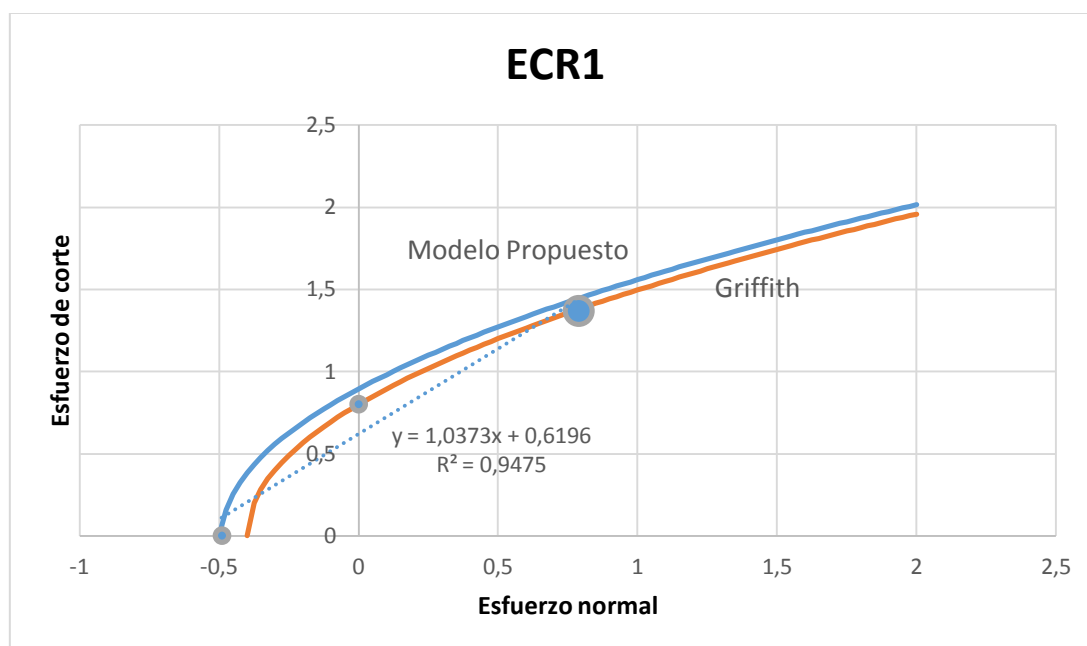


Figura 4.14 Criterio de rotura probetas ECR1

En la figura 4.14 presenta el criterio de rotura de probetas con la técnica de tratamiento ECR1, como se observa, las curvas, como la interpolación lineal representaron valores similares, en este caso siento el modelo propuesto el más conservador.

Resumiendo lo anterior, el modelo propuesto es el que más se ajusta para el análisis del criterio de rotura. Para todos los casos anteriores induce a pensar que para determinar un modelo de rotura, no es necesario realizar ensayos de Slant Shear. Para casos donde estos ensayos sean realizados mediante la extracción de testigos, siguen siendo factibles los ensayos de Pull-out y LCB.

En la tabla 4.8 muestra los valores correspondientes ante los tres tipos de modelos (Griffith, Propuesto e Interpolación lineal), donde se aprecia que la junta sin tratamiento es la que posee mayor esfuerzo normal y corte, luego con valores similares el abujardado y el ECR1.

	Griffith		Modelo Propuesto			Interpolación Lineal		
	T_o	σ	T_{lcb}	σ_{p-o}	x	a	b	R^2
Sin tratamiento	1,12	0	1,12	-0,57	0	1,144	0,844	0,953
Abujardado	0,82	0	0,82	-0,27	0	1,383	0,579	0,974
ECR1	0,80	0	0,80	-0,49	0	1,037	0,62	0,948

Tabla 4.8 Valores de Criterios de Rotura

En la tabla 4.9 se aprecian las coordenadas de cada uno de los puntos promedios de cada ensayo, referenciándose en este caso a los tres tipos de técnicas de tratamiento utilizadas (Sin tratamiento, abujardada y ECR1). Cabe destacar que para este análisis se descartaron los dos tratamientos restantes (ECR2 e Imprimentación+polvo) ya que no existían resultados de Slant Shear.

		Puntos	
		x	y
Sin tratamiento	Pull-out	-0,57	0
	LCB	0	1,12
	Slant Shear	1,31	2,26
Abujardado	Pull-out	-0,27	0
	LCB	0	0,82
	Slant Shear	1,56	2,7
ECR1	Pull-out	-0,49	0
	LCB	0	0,8
	Slant Shear	0,79	1,37

Tabla 4.9 Puntos de los diferentes tipos de técnicas de tratamiento de juntas

5 CONCLUSIONES

5.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan las conclusiones obtenidas, fruto del trabajo desarrollado en esta Tesis de Máster. Éstas se relacionan con los objetivos planteados al inicio del documento, y lo que deriva todos los estudios realizados. Las conclusiones se derivan de la general a la específica, y a raíz de esto, se plantean las posibles futuras líneas de investigación, que puedan dar continuidad a un estudio más profundo.

Las conclusiones generales dan respuesta a los objetivos generales que se han planteado en la introducción del trabajo. Trataba básicamente en determinar las propiedades resistentes de las diferentes técnicas de adherencia entre la mezcla bituminosa y hormigón.

En cuanto a las conclusiones específicas, muestran con mayor detalle los logros obtenidos. Éstas acopian los aspectos más relevantes del análisis de los resultados obtenidos de la campaña experimental.

5.2 CONCLUSIONES GENERALES

Como conclusión general a este trabajo, puede decirse que mediante a los ensayos realizados, se pudo obtener con éxito la determinación de las propiedades resistentes de las diferentes técnicas de adherencia entre la mezcla bituminosa y el hormigón de refuerzo. El capítulo 4 de este documento, muestra el análisis de los resultados, para la obtención de la mejor técnica durable, donde se realizaron ensayos de Pull-Out, LCB y Slant Shear.

En el caso del ensayo "Pull-Out", las probetas sin tratamiento fueron las que presentaron mayor resistencia a tracción de 0,56 MPa. Así mismo en el ensayo LCB, las probetas de Asfalto-Sin tratamiento presentaron una resistencia mayor de corte de 1,12 MPa. Para el ensayo Slant Shear, las probetas abujardadas presentaron una resistencia mayor con un promedio de 6,23.

Con la finalidad de determinar si la rugosidad superficial de las bases de asfalto abujardadas influyen en los resultados, se realizó una gráfica de rugosidad superficial versus LCB, y se pudo determinar que los valores no fueron influenciados por la rugosidad de la junta. Esto se puede deber a que el abujardado no le incorporó la rugosidad necesaria para obtener una mayor superficie de anclaje, es posible que la rugosidad empleada por el abujardado sea tan mínima que para el ensayo fue una superficie rugosa poco significativa.

Luego de obtener los valores de los ensayos antes descritos, se realizó un análisis de correlaciones de los ensayos entre sí, con el fin de determinar si algunos ensayos puedan depender del otro. Se realizaron correlaciones en gráficas sobre PullOut-LCB, PullOut-Slant Shear, y LCB-Slant Shear, donde después de analizar las gráficas, no se pudo determinar ningún tipo de correlación significativa.

Con el fin de probar el ensayo más adecuado en la determinación de la adherencia en la interfaz asfalto-hormigón se realizó una evaluación llamada Múltiples Criterios de Evaluación (MCA), el cual demostró que el ensayo LCB es el método de ensayo más adecuado de acuerdo con los criterios y factores de ponderación utilizados, con una puntuación 102.

Para finalizar se realizó un criterio de rotura, donde se utilizaron tres curvas, donde ha de utilizarse la aplicación del criterio de Griffith, una interpolación lineal y modelo propuesto. Mediante al criterio Mohr-Coulomb, se analizaron varias gráficas comparativas ante las técnicas adherentes: sin tratamiento, abujardada y con el ECR1.

Se concluye que el modelo propuesto es la que más se ajusta para el análisis del criterio de rotura.

5.3 CONCLUSIONES ESPECÍFICAS

Las conclusiones específicas responden a los objetivos específicos antes planteados en el primer capítulo, donde las conclusiones obtenidas son las siguientes:

- Existen pocos estudios sobre la adherencia entre los pavimentos Whitetopping, donde se hace interesante realizar estudios más profundos sobre el tema para poder potenciar su uso.
- Se ha realizado una extensa campaña experimental con ensayos de Pull-Out, LCB, y Slant Shear, de ella se ha visto que la fabricación del Pull-out como los del LCB fueron sencillas de fabricar en el laboratorio, mientras que las de Slant Shear ha dado problemas en su fabricación. A cada ensayo se estudiaron cinco técnicas de adherencia que son las sin tratamiento, abujardadas, ECR1, ECR2 e Imprimación+polvo.
- En el caso del ensayo "Pull-Out", las probetas sin tratamiento fueron las que presentaron mayor resistencia a tracción, y en este caso fueron las únicas que rompían en el asfalto, a lo que corresponde a que la junta contiene cierta porosidad superficial permitía que penetrara la lechada del hormigón de refuerzo.
- El ensayo LCB, las probetas de Asfalto-Sin tratamiento presentaron una tensión de corte de 1,12 MPa, siendo notablemente la técnica de adherencia con mayor resistencia a corte. Luego le siguen con valores similares el Abujardado con 0,82 MPa y el ECR1 con 0,80 MPa. Con la menor de las resistencias está la técnica de Imprimación+Polvo con 0,1955 MPa.
- El ensayo Slant Shear las probetas Abujardadas con una resistencia promedio de 6,23 MPa, aparentemente presentaron ser mejor que las de sin tratamiento con una resistencia promedio de 5,22 MPa, pero tampoco es que tengan una dispersión elevadas entre ellas. Mientras que la ECR1 con 3,16 MPa, al no tener un mínimo de probetas a comparar no se puede sacar ninguna

conclusión definitiva, pero si se observa que la resistencia obtenida es menor que las otras técnicas.

- Se han representado los datos en plano de Mohr-Coulomb, y se ha hecho un estudio del ajuste con tres criterios de rotulas diferente (lineal, parabólico y Griffith), de los resultados se observa que el que mejor ajusta es el modelo propuesto.
- Para obtener el modelo de ajuste en módulo propuesto, no es necesario realizar ensayos de Slant Shear, por tanto para caracterizar la adherencia entre asfalto y hormigón, resultaría suficiente con realizar ensayos de LCB y Pull-Out.

5.4 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

El trabajo reflejado en esta Tesis de Máster, ha propiciado al estudio y entendimiento de la adherencia del pavimento asfáltico con el hormigón de refuerzo, donde se han apreciado detalles que hasta el momento no se tenían en cuenta.

Por medio de esta investigación ha surgido la realización de nuevos análisis, con la finalidad de poder obtener un trabajo con mayor profundidad que ayude a reafirmar los resultados obtenidos en este estudio. Debido a esto se recomienda:

- Por el hecho de obtener algunos resultados no tan precisos, se recomienda realizar una campaña experimental más amplia, con el fin de tener un mayor margen de error ante los resultados.
- Si se prevé resistencias muy por debajo de lo que pueda leer una célula de carga, se recomienda utilizar una célula de carga adecuada al ensayo a tratar, con la finalidad de obtener resultados más precisos.
- Plantear una técnica de adherencia, que en vez de abujardar la superficie de las semi-bases de asfalto, recomendar fresarla para estudiar su comportamiento.

REFERENCIAS

- AASHTO. (1993). Guide for Design of Pavement Structures. American Association of State Highway and Transportation Officials., 1993.
- ACPA. (1998). Whitetopping – State of Practice. ACPA Publication EB210P, American Concrete Pavement Association., 1998.
- Austin, S., Robins, P., & Pan, Y. (1999). Shear bond testing of concrete repairs. *Cement and Concrete Research*, 29(7), 1067–1076. [http://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00088-5](http://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00088-5)
- Boardman, V. J. H., York, N., & Dot, S. (2004). *Thin and Ultra-Thin Whitetopping*. Transportation Research Board.
- C882/C882M-13, A. (2013). Standard Test Method for Bond Strength of Epoxy-Resin Systems Used With Concrete, 882, 1–4. <http://doi.org/10.1520/C0882>
- Calisto, C. F. A. (2007). Universidad de Chile, 120.
- Calo, D. H. (2012). Diseño y construcción de juntas. Retrieved from <http://www.actualizarmiweb.com/sites/icpa/publico/files/02.pdf>
- Cossio, M. L. T., Giesen, L. F., Araya, G., Pérez-Cotapos, M. L. S., Vergara, R. L.,

- Manca, M., ... Héritier, F. (2012). Curado del Hormigón de Pavimento. *Uma ética Para Quantos?*, XXXIII(2), 81–87. <http://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>
- Dale Harrington, G. F. (2014). Guide to Concrete Overlays, (May).
- Gucunski, N. (2001). Development of a Design Guide for Ultra Thin Whitetopping. FHWA 2001-018, Federal Highway Administration., 2001.
- Han, C. (2005). Synthesis of Current Minnesota Practices Of Thin and Ultra-Thin Whitetopping.
- Juan Pablo Rodriguez Ayuso. (2012). Estudio comparativo del comportamiento mecánico y permeabilidad de juntas frías de hormigonado materializadas con mallas metálicas.
- NLT-161/98. (n.d.). Resistencia a compresión simple de mezclas bituminosas.
- NLT-168/90. (n.d.). Densidad y huecos en mezclas bituminosas compactadas, 168.
- NLT-346/90. (n.d.). Resistencia a compresión diametral (ensayo brasileño) de mezclas bituminosas., 346.
- Rasmussen, R. O. (2005). *COOPERATIVE HIGHWAY PROGRAM A Synthesis of Highway Practice*.
- Tarr, S. M., Sheehan, M. J., & Okamoto, P. A. (1998). Guide-lines for the Thickness Design of Bonded Whitetopping Pavement in the State of Colorado., Report No. CDOT-DTD-R-98-10, Colorado Department of Transportation, 1998.
- UNE-EN104-231. (n.d.). Emulsión para imprimación (Tipo EA) DBI 2282, 2282.
- UNE-EN12390-13:2014. (2014). Ensayos de hormigón endurecido. Parte 13: Determinación del módulo secante de elasticidad en compresión., 12390.
- UNE-EN13075-1:2009. (2009). Betunes y ligantes bituminosos. Determinación del comportamiento a la rotura. Parte 1: Determinación del índice de rotura de las emulsiones bituminosas catiónicas. Método de la carga mineral., 13075.
- UNE-EN13108-1:2007. (2007). Mezclas bituminosas. Especificaciones de materiales. Parte 1: Hormigón bituminoso., 13108.
- UNE-EN13808:2013/1M:2014. (2014). Betunes y ligantes bituminosos. Especificaciones de las emulsiones bituminosas catiónicas, 13808.
- Uniland cementera, s.a., fcc construcción, S.a., fundación cidaut, universitat

- Politecnica de catalunya, instituto español D. cemento y sus aplicaciones. (2012). DESARROLLO DE MEJORES REHABILITACIONES LOCALES DE INFRAESTRUCTURAS. *Uma ética Para Quantos?*, XXXIII(2), 81–87. <http://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>
- Villar, E. G. (n.d.). Capítulo 2 el ensayo de tracción indirecta 2.1, 5–14.
- Walraven, P. dr. J. C. (2000). Design, Modelling Steel Fibre Reinforced Concrete for Structural.
- Wu, C. L., Tarr, S. M., Refai, T. M., Nagai, M. A., & Sheenan, M. J. (1998). Development of Ultra-Thin Whitetopping Design Procedure. Report RD 2124, Portland Cement Association., 2124.

ANEJOS

A. RESULTADOS DEL ENSAYO PULL-OUT

Base	Tratamiento adherencia	Código	Tipo ensayo	Probeta	Resultado ensayo (kN)	Superficie de rotura	Resultado ensayo (MPa)
Asfalto	Ninguno	3	Pull-out	A	1,162	Asfalto	0,148
Asfalto	Ninguno	3	Pull-out	B	4,449	Asfalto	0,566
Asfalto	Ninguno	3	Pull-out	D	0,885	Asfalto	0,113
Asfalto	Ninguno	3	Pull-out	E	1,297	Asfalto	0,165
Asfalto	Ninguno	3	Pull-out	F	1,906	Asfalto	0,243
Asfalto	Abujardado	1	Pull-off	A	1,606	Asfalto	0,204
Asfalto	Abujardado	1	Pull-off	B	2,258	Junta	0,287
Asfalto	Abujardado	1	Pull-off	C	0,721	Junta	0,092
Asfalto	Abujardado	1	Pull-off	E	2,623	Junta	0,334
Asfalto	Abujardado	1	Pull-off	F	3,410	Junta	0,434
Asfalto	ECR2 + árido	2	Pull-off	A	2,152	Junta	0,274
Asfalto	ECR2 + árido	2	Pull-off	B	1,720	Junta	0,219
Asfalto	ECR2 + árido	2	Pull-off	C	1,730	Junta	0,220
Asfalto	ECR2 + árido	2	Pull-off	D	1,759	Junta	0,224
Asfalto	ECR2 + árido	2	Pull-off	E	4,036	Junta	0,514
Asfalto	ECR2 + árido	2	Pull-off	F	1,674	Junta	0,213
Asfalto	ECR1	4	Pull-off	A	3,205	Junta	0,408
Asfalto	ECR1	4	Pull-off	B	3,594	Junta	0,458
Asfalto	ECR1	4	Pull-off	C	4,210	Junta	0,536
Asfalto	ECR1	4	Pull-off	D	1,701	Asfalto	0,217
Asfalto	ECR1	4	Pull-off	E	4,007	Junta	0,510
Asfalto	ECR1	4	Pull-off	F	4,072	Junta	0,518
Asfalto	Imp+polvo	5	Pull-off	A	0,711	Junta	0,091
Asfalto	Imp+polvo	5	Pull-off	B	1,508	Junta	0,192
Asfalto	Imp+polvo	5	Pull-off	C	1,563	Junta	0,199
Asfalto	Imp+polvo	5	Pull-off	D	0,847	Junta	0,108
Asfalto	Imp+polvo	5	Pull-off	E	1,979	Junta	0,252
Asfalto	Imp+polvo	5	Pull-off	F	2,055	Junta	0,262

B. RESULTADOS DE ENSAYO LCB

Base	Tratamiento adherencia	Código	Tipo ensayo	Probeta	Resultado ensayo (kN)	Superficie de rotura	Resultado ensayo (MPa)
Asfalto	Ninguno	3	LCB	G	12,027	Junta	0,766
Asfalto	Ninguno	3	LCB	H	19,14	Junta	1,218
Asfalto	Ninguno	3	LCB	I	15,567	Junta	0,991
Asfalto	Ninguno	3	LCB	J	17,112	Junta	1,089
Asfalto	Ninguno	3	LCB	K	17,475	Junta	1,112
Asfalto	Ninguno	3	LCB	L	18,585	Junta	1,183
Asfalto	Abujardado	1	LCB	G	13,443	Junta	0,856
Asfalto	Abujardado	1	LCB	H	10,353	Junta	0,659
Asfalto	Abujardado	1	LCB	I	12,357	Junta	0,787
Asfalto	Abujardado	1	LCB	J	13,632	Junta	0,868
Asfalto	Abujardado	1	LCB	K	15,825	Junta	1,007
Asfalto	Abujardado	1	LCB	L	11,982	Junta	0,763
Asfalto	ECR2 + árido	2	LCB	H	5,469	Junta	0,348
Asfalto	ECR2 + árido	2	LCB	I	4,2	Junta	0,267
Asfalto	ECR2 + árido	2	LCB	J	6,627	Junta	0,422
Asfalto	ECR2 + árido	2	LCB	K	8,442	Junta	0,537
Asfalto	ECR2 + árido	2	LCB	L	5,481	Junta	0,349
Asfalto	ECR1	4	LCB	G	8,151	Junta	0,519
Asfalto	ECR1	4	LCB	H	12,759	Junta	0,812
Asfalto	ECR1	4	LCB	I	12,135	Junta	0,773
Asfalto	ECR1	4	LCB	J	14,091	Junta	0,897
Asfalto	ECR1	4	LCB	K	12,075	Junta	0,769
Asfalto	ECR1	4	LCB	L	11,922	Junta	0,759
Asfalto	Imp+polvo	5	LCB	G	3,903	Junta	0,248
Asfalto	Imp+polvo	5	LCB	H	3,335	Junta	0,212
Asfalto	Imp+polvo	5	LCB	I	2,9059	Junta	0,185
Asfalto	Imp+polvo	5	LCB	J	4,0766	Junta	0,260
Asfalto	Imp+polvo	5	LCB	K	5,8197	Junta	0,370
Asfalto	Imp+polvo	5	LCB	L	4,5601	Junta	0,290

C. RESULTADOS DEL ENSAYO SLANT SHEAR

Tratamiento adherencia	Código	Probeta	Resultado (kN)	Resultado (MPa)	Esfuerzo normal (Mpa)	Esfuerzo corte (MPa)
Ninguno	3	S3A	48,117	6,126	1,532	2,653
Ninguno	3	S3B	38,868	4,949	1,237	2,143
Ninguno	4	S3C	39,657	5,049	1,262	2,186
Ninguno	5	S3D	37,383	4,760	1,190	2,061
Abujardado	1	S1A	37,49	6,38	1,60	2,76
Abujardado	1	S1B	33,02	5,62	1,41	2,43
Abujardado	1	S1C	39,29	6,69	1,67	2,90
ECR1	4	S4A	24,810	3,159	0,790	1,368