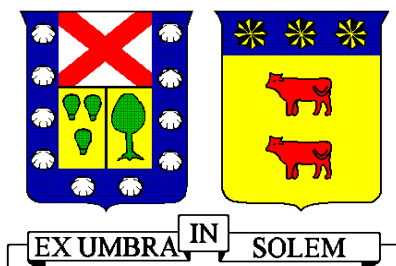


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
VALPARAÍSO-CHILE



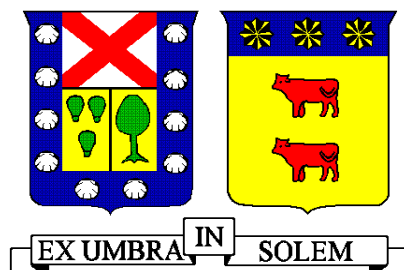
**IMPLEMENTACIÓN DEL ENSAYO DE CORTE LCB EN EL
CENTRO DE DESARROLLO E INVESTIGACIÓN (CDI) DE
BITUMIX, PARA EVALUAR ADHERENCIA DE TESTIGOS DE
ASFALTO DOBLE CAPA EXTRAÍDOS EN TRAMO DE PRUEBAS**

JAIRO GERMÁN GARÍN IGLESIAS

INGENIERO CIVIL

MAYO 2019

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
VALPARAÍSO-CHILE



**IMPLEMENTACIÓN DEL ENSAYO DE CORTE LCB EN EL
CENTRO DE DESARROLLO E INVESTIGACIÓN (CDI) DE
BITUMIX, PARA EVALUAR ADHERENCIA DE TESTIGOS DE
ASFALTO DOBLE CAPA EXTRAÍDOS EN TRAMO DE PRUEBAS**

Memoria de titulación presentada por
JAIRO GERMÁN GARÍN IGLESIAS

Como requisito para optar al título de
INGENIERO CIVIL

Profesor Guía
JUAN CEA CHACÓN

Profesor Correferente
CARLOS WAHR DANIEL

MAYO 2019

AGRADECIMIENTOS

A mi Universidad, por creer en la educación, en la formación óptima de sus educandos y en el desarrollo de la sociedad.

A mis maestros, por haber elegido, cada uno de ellos, la decisión de enseñar y ser MAESTROS. Por haber decidido la vocación de compartir sus conocimientos e instruir con disposición plena y excelencia académica. Gracias infinitas para los profesores de la comisión, señores Juan Cea, Carlos Wahr y Rodrigo Delgadillo.

A las Empresas, Gerencias y personalidades de sus diferentes áreas de PROBISA Y BITUMIX S.A., por todas las facilidades y oportunidades otorgadas para ejecutar todos los procesos de esta Tesis en sus dependencias, y por generar todos los recursos necesarios para realizar esta investigación.

A los Profesionales, Oscar Plaza, Juan Soto y Sergio Valverde, que fueron partícipes de este proceso, sea de manera directa e indirecta; y, que son responsables de realizar un elaborado aporte técnico y profesional con el que culmina mi paso por la universidad.

Reconocimiento especial para Renato Puga, por su apreciada experiencia entregada en terreno; a los laboratoristas Gustavo Aedo, Jaime Nahuel, Pedro Quezada; y a las memoristas, señoritas Millaray Guzmán, Jennifer Quezada y Pamela Jara, por su apoyo en el CDI.

No escapa a mi memoria agradecida, los valiosos aportes incondicionales entregados en las diferentes labores de este trabajo de los señores Francisco Rebolledo, Cristian Díaz y Juan Silva, todos distinguidos profesionales de las Empresas Bitumix y Probisa.

Gratitud y logro aparte, para el consejero eminente, para el maestro que, con acertada inteligencia, ilustró muchos pasajes de mi vida estudiantil: Profesor Herman Montaña Garviso.

A mis amigos y amigas, que de alguna u otra forma, han sembrado en mi persona una buena y sincera amistad que, con respeto y decencia, realizaron aportes en el desarrollo de esta tesis, ello permitirá a futuro, qué duda cabe, disfrutar la mejor de las cosechas.

Para mis compañeros de Plan Común de la UTFSM, amigos presentes, incluso en los contratiempos, verdaderos pilares de confianza, integridad y seguridad, siempre presente el apoyo invariable de Ismael Fauler y de mis compañeros de carrera Alemany, Nico, Norero, Ariel, Yaichi, Nahuel, Martín, Basu Musso, Diego, Gabo e Isadora, a quiénes declaro campeones del trabajo en equipo y de producción eficaz en la explosión de ideas.

Gracias infinitas a mis tíos Waldo Iglesias y Raquel Poblete por abrirme las puertas de su casa y por todo el apoyo brindado en este último proceso.

A mis hermanos, por sus aportes generosos y fraternales que me han permitido caminar por la hermosa senda cultural de íconos ejemplares a la luz de sus consejos y férreo apoyo en la toma de decisiones. Todo mi reconocimiento y cariño para Jaime, Jorge, Javier y Jan.

A mis padres, Germán Garín Zepeda y Sandra Iglesias Soto, promotores de mis sueños, por todo el cariño y dedicación brindado y basado en valores éticos y morales en la formación integral de mi persona, que me han abierto las puertas para transitar por la ruta del éxito y confianza de su amor infinito. A todas estas personas, ¡Gracias Totales!

RESUMEN

Los pavimentos asfálticos a lo largo de su vida útil, se encuentran sometidos constantemente a distribuciones de esfuerzo originadas por las cargas de tránsito, afectando la unión entre sus diferentes capas. En este sentido, la adherencia entre las distintas capas asfálticas, juega un rol fundamental en el desempeño de los pavimentos, ya que la ausencia de ésta, provoca una discontinuidad en la transmisión de tensiones provenientes de las cargas de tráfico, afectando de manera directa su serviciabilidad. Para que las diferentes capas estructurales actúen en conjunto, lo más parecido a un sólo sistema monolítico, se utiliza el “Riego de Liga”, que se define como la aplicación uniforme a presión de una delgada capa de material bituminoso, generalmente compuesto por una emulsión asfáltica, sobre una superficie de asfalto, losa de hormigón o base estabilizada, con el fin de proveer una unión entre dichas capas de soporte y la capa superior.

Por otro lado, en Chile no existe un criterio normativo y unificado que especifique, dependiendo de las circunstancias, cuáles son las emulsiones asfálticas más idóneas para utilizarse como un riego de liga adecuado que provea una unión satisfactoria. Actualmente, el Manual de Carreteras chileno, respecto al riego de adherencia, sólo indica un rango de aplicación recomendado entre 0,4 y 1 kg/m², por lo tanto, aun no existe claridad suficiente respecto a la optimización de la adherencia dependiendo de los factores climáticos, las condiciones impuestas por la disponibilidad de recursos y las metodologías constructivas. El siguiente trabajo, presenta un estudio y la respectiva evaluación de la adherencia de capas asfálticas en terreno, por medio del Ensayo de Corte LCB (Laboratorio de Caminos de Barcelona, mediante la norma NLT-382/08), a testigos de 6 pulgadas, extraídos en un tramo de pruebas. El estudio considera el análisis de la influencia en la adherencia de 6 variables: Tipo de Superficie (fresado y sin fresar), Tiempo de Curado (sin curar, 2 horas y 24 horas), Dosis Residual (0 g/m², 100 g/m², 200 g/m², y 400 g/m²), Tipo de Emulsión (CSS-1h y Termoadherente), Presencia de Humedad post fresado (Seco y húmedo) y Nivel de Limpieza antes del riego de liga (Sucio y Limpio). Para la representación de estas variables, se confecciona un tramo de pruebas ubicado en las inmediaciones del Centro de Desarrollo e Investigación (CDI) de Bitumix S.A y PROBISA, en la comuna de Maipú, compuesto por una capa inferior de mezcla tradicional IV-A-12 (CA-24) con 11 años de antigüedad y un recapado de carpeta de tránsito pesado IV-20 (CA 60/80). Además, este estudio contempla realizar una comparación entre la adherencia de testigos doble capa y la adherencia de elementos monolíticos y, finalmente, si existe una relación o no, entre las resistencias al corte para testigos de 4 y 6 pulgadas de diámetro, que pertenezcan a una misma condición.

De los resultados obtenidos, las variables que tuvieron una mayor influencia en la adherencia entre capas, en orden decreciente, corresponden al Tipo de Superficie, Tiempo de Curado, Dosis Residual y Tipo de Emulsión. En cuanto a los factores Nivel de Limpieza y Nivel de Humedad, se estimó que no se consideran como causantes de un efecto considerable en el grado de adhesión entre capas asfálticas. Centrándose en la determinación de una dosis residual óptima, los valores se encuentran en un rango situado entre los 250 y 300 g/m², tanto para estructuras sin fresar como fresadas. Por otro lado, comparando elementos doble capa con y sin emulsión asfáltica, se ha concluido que en ciertos casos específicos, si se puede prescindir del riego liga, no obstante, es obligatorio su uso sobre estructuras de soporte preexistentes. Finalmente, comparando el nivel de unión entre testigos de diferente diámetro, si existe una relación, no obstante, se necesita ahondar con mayor profundidad el tema para poder establecer una relación matemática producto de la geometría.

Palabras Claves: Riego de Liga, Adherencia de Capas Asfálticas, Tiempo de Curado, Emulsión Asfáltica.

ABSTRACT

Asphalt pavements throughout life, are constantly subjected to stresses which cause a stress distribution that gradually deteriorate the layers of these structures. Therefore, the adherence between the different asphalt layers, plays a fundamental role in the useful life of the pavements, since the absence of this, causes a discontinuity in the transmission of voltages coming from the traffic loads, affecting directly the pavement's serviceability. For the different asphalt layers to act together, the closest thing to a single monolithic system, "Tack Coat" is used, which is defined as the uniform application under pressure of a thin layer of bituminous material, generally composed of an emulsion Asphalt, on an asphalt surface, concrete slab, granular or stabilized base, before placing the upper asphalt layer.

On the other hand, in the Chilean Manual de Carreteras, regarding the tack coat, it only indicates a recommended range of application between 0,4 and 1 kg/m², in addition to not having an absolute and consensual criterion with respect to specifying how it can be provided adherence as appropriate as possible, depending on the conditions imposed by the principal, the materials used, the climate and the construction methodologies used.

The following work, presents a study and its respective evaluation of the adherence of asphalt layers in the field, by means of the LCB Cutting Test (Laboratorio de Caminos de Barcelona, through the norm NLT-382/08) to 6 inches extracted in a test section. The study considers the analysis of the influence on the adherence of 5 variables: Type of Surface (milling and without milling), Curing Time (uncured, 2 hours and 24 hours), Residual Dose (0 g/m², 100 g/m², 200 g/m², and 400 g/m²), Type of Emulsion (CSS-1h and Thermosetting) and Presence of Moisture on the surface (Dry and humid). For the representation of these variables, a test section is made located in the vicinity of the Centro de Desarrollo e investigación (CDI) of Bitumix S.A. and PROBISA, in the Maipú commune, composed of a lower layer of traditional mixture IV-A- 12 (CA-24) with 11 years of age and a re-mix of recoat of heavy traffic IV-20 (60/80). In addition, this study contemplates making a comparison between the adhesion of double layer witnesses and the adherence of monolithic witnesses, resistance that theoretically should be the maximum possible.

According to the obtained results in the analysis, the most influential variables on the adherence between layers are here decreasingly presented. Type of Surface, Curing Time, Residual Dose and Type of Emulsion. When it comes to other factors such as Cleanliness Level or Humidity Level, they are not considered as a significant cause of the degree of adhesion between asphalt layers. Focusing on the determination of an optimal residual dose, values must be in a range that goes from 250 g/m² up to 300 g/m², which applies for milled and unmilled structures. Additionally, when comparing double layer monolithic elements, it has been concluded that for some specific cases, it is possible to do without tack coat, however, its use is mandatory on structures of pre-existing support. Finally, when comparing the degree of union between samples of different diameters, it does exist a relation, however, it would be necessary to examine this subject in greater depth, in order to establish a mathematical relation based on the geometry.

Keywords: Tack coat, Adhesion of Asphalt Layers, Curing Time, Asphalt Emulsion.

Índice

1.	CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	11
2.	CAPÍTULO II: OBJETIVOS	12
2.1.	Objetivo general	12
2.2.	Objetivos específicos	12
2.3.	Alcances	12
3.	CAPÍTULO III: RECOPIACIÓN BIBLIOGRÁFICA	14
3.1.	Antecedentes	14
3.1.1.	Importancia de la Adherencia entre capas asfálticas	14
3.1.2.	Estudios realizados sobre el comportamiento de sistemas asfálticos multicapas	15
3.1.3.	Especificaciones actuales en Chile	16
3.1.4.	Variables de influencia en la adherencia	18
3.1.4.1.	Tipo de superficie	18
3.1.4.2.	Tipo de ligante asfáltico utilizado como riego de liga	19
3.1.4.3.	Dosis aplicada de riego de liga	20
3.1.4.4.	Tiempo de curado de la emulsión asfáltica	21
3.1.4.5.	Presencia de humedad en superficie	22
3.1.4.6.	Presencia de suciedad en superficie	23
3.1.4.7.	Temperatura de confección, compactado y edad de mezclas asfálticas	25
3.1.4.8.	Energía de compactación	26
3.1.4.9.	Factores de influencia en medición de la adherencia	26
3.1.4.9.1.	Velocidad de carga	26
3.1.4.9.2.	Temperatura de ensayo	27
3.1.4.9.3.	Estado del dispositivo de ensayo	27
3.1.4.9.4.	Operador	28
3.1.5.	Estado del arte a nivel nacional	28
3.2.	Marco conceptual	32
3.2.1.	Pavimentos asfálticos	32
3.2.2.	Cemento asfáltico (ligante asfáltico)	33
3.2.3.	Agregados pétreos	34
3.2.4.	Mezcla asfáltica	35
3.2.5.	Mezclas asfálticas en caliente (MAC o HMA)	35
3.2.6.	Capas estructurales asfálticas	36

3.2.7.	Método Marshall	37
3.2.8.	Emulsiones asfálticas	37
3.2.8.1.	Emulsiones asfálticas catiónicas	39
3.2.8.2.	Emulsiones asfálticas aniónicas	40
3.2.8.3.	Emulsiones termoadherentes	41
3.2.9.	Riego de liga	41
3.2.10.	Imprimación	42
3.2.11.	Fresado	43
3.2.12.	Análisis ANOVA	43
4.	CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA Y MATERIALES	48
4.1.	Matriz de ensayo de testigos de 6 pulgadas	48
4.1.1.	Variables de influencia consideradas en estudio	48
4.2.	Matriz de ensayo de testigos de 4 pulgadas	51
4.3.	Matriz de ensayo de testigos de recapado monolítico	51
4.4.	Emplazamiento del tramo de pruebas	52
4.5.	Configuración del tramo de pruebas	52
4.6.	Pruebas de aplicación manual del riego de liga	54
4.7.	Materiales	56
4.7.1.	Emulsiones asfálticas utilizadas como riego de liga	56
4.7.1.1.	Emulsión CSS-1h	56
4.7.1.2.	Emulsión termoadherente (Emulclean)	57
4.7.2.	Polvo roca y material fresado como suciedad	58
4.7.3.	Carpeta preexistente del estacionamiento CDI	58
4.7.4.	Recapado de mezcla asfáltica tradicional	58
4.7.4.1.	Caracterización del árido utilizado como recapado	59
4.7.4.2.	Cemento asfáltico	59
4.7.4.3.	Diseño de mezcla	60
4.7.5.	Otros materiales	62
4.8.	Maquinaria	62
4.9.	Secuencia constructiva	64
4.10.	Extracción de testigos	70
4.11.	Metodología de ensayo de corte LCB	71
4.11.1.	Acondicionamiento térmico de testigos	71
4.11.2.	Confección de mordaza	71
4.11.3.	Procedimiento de ensayo	72
5.	CAPÍTULO V: RESULTADOS Y ANÁLISIS	75

5.1.	Resistencia v/s deformación en el tiempo y estado último	75
5.2.	Análisis de repetitividad del ensayo de corte LCB en CDI	75
5.3.	ANOVA para las variables del estudio (Resistencias doble capa)	80
5.4.	Capas con riego de liga v/s sin riego de liga	84
5.5.	Relación de dosis de liga v/s resistencia al corte	85
5.5.1.	Resultados de dosis con CSS-1h	86
5.5.2.	Resultados de dosis con E. termoadherente	89
5.6.	Influencia de variables del estudio	91
5.6.1.	Influencia del tipo de superficie: Fresada v/s Sin Fresar	93
5.6.2.	Influencia del tipo de emulsión: CSS-1h v/s E. Termoadherente	95
5.6.3.	Influencia de la condición de humedad: Seca v/s Húmeda	98
5.6.4.	Influencia de la condición de limpieza: Limpia v/s Sucia	100
5.6.5.	Influencia del tiempo de curado: 24 h., 2 h. y Sin Curar	103
5.6.5.1.	Influencia del tiempo de curado con CSS-1h para superficies Fresadas	104
5.6.5.2.	Influencia del tiempo de curado con CSS-1h para superficies Sin Fresar	106
5.6.5.3.	Influencia del tiempo de curado con E. Termoadherente para superficies Fresadas	107
5.6.5.4.	Influencia del tiempo de curado con E. Termoadherente para superficies Sin Fresar	108
5.6.6.	Variables más influyentes y niveles con mejores resultados	110
5.7.	Resistencia monolítica v/s resistencia doble capa	111
5.8.	Relación de resistencia entre testigos de diámetro de 4 y 6 pulgadas	112
6.	CAPÍTULO VI: DISCUSIONES	114
6.1.	Capas asfálticas con riego de liga v/s sin riego de liga	114
6.2.	Dosis de emulsión	114
6.3.	Tipo de superficie	116
6.4.	Tipo de emulsión	116
6.5.	Condición de humedad	117
6.6.	Condición de limpieza	118
6.7.	Tiempo de curado	118
6.8.	Resistencia monolítica v/s resistencia doble capa	120
6.9.	Relación de testigos de diámetro 4 v/s 6 pulgadas	121
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	122
	REFERENCIAS	126

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<i>Ilustración 1: Comparación de Elemento Monolítico y Elemento Multicapa, Fuente: Memoria UCh., Álvarez C. [1].</i>	14
<i>Ilustración 2: Esfuerzos Cortantes y de Tensión en interfaz producto de las cargas de tráfico, Fuente: NCHRP 2012.</i>	14
<i>Ilustración 3: Desligue de capas asfálticas en la iniciación y propagación de grietas para modelo de fatiga tradicional, Fuente: Khweir y Fordyce, 2013.</i>	15
<i>Ilustración 4: Desligue de capas asfálticas en la iniciación y propagación de grietas desde la superficie del pavimento, Fuente: Khweir y Fordyce, 2013.</i>	15
<i>Ilustración 5: Capas de un pavimento asfáltico, Fuente: Curso Laboratorista Vial Vol. N°5.</i>	33
<i>Ilustración 6: Esquema del comportamiento de pavimentos flexibles,</i>	33
<i>Ilustración 7: Sistema de fases agua, asfalto y agente emulsificante, Fuente: Curso Laboratorista Vial Vol. N°4.</i>	37
<i>Ilustración 8: Representación del proceso de quiebre en una emulsión asfáltica, Fuente: Curso Laboratorista Vial Vol. N°4.</i>	38
<i>Ilustración 9: Agentes emulsificantes radicales en emulsiones catiónicas, Fuente: Curso Laboratorista Vial Vol. N°4.</i>	39
<i>Ilustración 10: Aplicación de riego de liga con camión imprimante.</i>	42
<i>Ilustración 11: Dispositivo de aplicación de emulsión asfáltica mediante superposición de cobertura simple, doble y triple.</i>	42
<i>Ilustración 12: Regiones de aceptación y rechazo de hipótesis según significancia (izq.) y según p-valor (der.).</i>	47
<i>Ilustración 13: Diferenciación de superficie fresada y sin fresar en tramo de pruebas.</i>	49
<i>Ilustración 14: Diferenciación de dosis residuales de 100, 200 y 400 g/m² aplicadas en tramo de pruebas.</i>	49
<i>Ilustración 15: Diferenciación entre tiempos de curado de 24 h., 2h. y sin curar en tramo de pruebas.</i>	50
<i>Ilustración 16: Diferenciación entre superficie limpia y sucia en tramo de pruebas.</i>	50
<i>Ilustración 17: Plano del emplazamiento del tramo de pruebas (distancias en metros).</i>	52
<i>Ilustración 18: Esquema detallado de combinaciones del tramo de pruebas.</i>	53
<i>Ilustración 19: Vista en alzado frontal del tramo de pruebas.</i>	53
<i>Ilustración 20: Testigos de pista fresada y sin fresar (dimensiones referenciales).</i>	54
<i>Ilustración 21: Equipo soplador e hidrolavadora, utilizados para limpiar superficie del tramo de pruebas.</i>	63
<i>Ilustración 22: Fresadora de la división BTE de Bitumix S.A. utilizada para fresar tramo de pruebas.</i>	63
<i>Ilustración 23: Equipo barredor utilizado en pista fresada.</i>	63
<i>Ilustración 24: Camión tolva utilizado para provisión de mezcla asfáltica a terminadora.</i>	63
<i>Ilustración 25: Terminadora Vögele utilizada para colocar recapado en tramo de pruebas.</i>	64
<i>Ilustración 26: Rodillo mixto Hamm utilizado para compactar recapado en tramo de pruebas.</i>	64
<i>Ilustración 27: Carta Gantt para secuencia constructiva del tramo de pruebas (1).</i>	65
<i>Ilustración 28: Carta Gantt para secuencia constructiva del tramo de pruebas (2).</i>	65
<i>Ilustración 29: Esquema representativo de secuencia constructiva del tramo de pruebas (1-16).</i>	66
<i>Ilustración 30: Esquema representativo de secuencia constructiva del tramo de pruebas (17-20) y glosario.</i>	67
<i>Ilustración 31: Extracción de testigos del tramo de pruebas.</i>	71
<i>Ilustración 32: Mordazas de sujeción para testigos de 4 y 6 pulgadas (izq.) y detalle de encaje del dispositivo B (der.).</i>	72
<i>Ilustración 33: Representación de cargas aplicadas del dispositivo de ensayo de corte LCB a mordaza.</i>	73
<i>Ilustración 34: Dispositivo de corte LCB.</i>	73
<i>Ilustración 35: Detalle del dial utilizado para medir deformación.</i>	73
<i>Ilustración 36: Detalle del plano de corte en sistema mordaza-testigo.</i>	73
<i>Ilustración 37: Detalle de interfaz en testigo dentro de mordaza.</i>	74
<i>Ilustración 38: Testigo post-ensayo de corte LCB.</i>	74
<i>Ilustración 39: Esquema de variables y niveles del estudio de adherencia ordenados según influencia y resistencia.</i>	110

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Disminución de ciclos para fatiga v/s deslizamiento en interfaz, Fuente: Roffe y Chaignon [19].	16
Gráfico 2: Distribución de tensiones de corte en el espesor de un pavimento doble capa, Fuente: D. Timm, B. Birgisson y D. Newcomb.	16
Gráfico 3: Influencia de la graduación de la mezcla asfáltica en la adherencia, Fuente: NCAT [16].	19
Gráfico 4: Influencia de la condición de superficie (Fresado v/s Sin Fresar) en pavimentos existentes, Fuente: WCAT [10].	19
Gráfico 5: Resistencias al corte de diferentes emulsiones con dosis variable, Fuente: Memoria UCh., Álvarez C. [1].	20
Gráfico 6: Estimación de dosis óptima para emulsión CSS-1h con probetas doble capa IV-A-12/BINDER, Fuente: Memoria UCEN., Jara P. [11].	21
Gráfico 7: Estimación de dosis óptima para emulsión Termoadherente con probetas doble capa IV-A-12/BINDER, Fuente: Memoria UCEN., Jara P. [11].	21
Gráfico 8: Comparación de resistencias de emulsión quebrada v/s sin quebrar, Fuente: WCAT [10].	22
Gráfico 9: Resultados del análisis de humedad en resistencias al corte para condición Limpia, Fuente: NCHRP [12].	23
Gráfico 10: Resistencias de corte según distintas dosis de agua, Fuente: Memoria UCh., Álvarez C. [1].	23
Gráfico 11: Comparación de resistencias de corte limpias/sucias para condiciones no confinadas, Fuente: NCHRP [12].	24
Gráfico 12: Resistencias de corte para superficies con polvo, Fuente: Memoria UCh., Álvarez C. [1].	24
Gráfico 13: Tensión de corte máxima v/s Temperatura de Compactación de 2da capa para probetas con emulsión CRS-1, Fuente: Memoria UCh., Álvarez C. [1].	25
Gráfico 14: Incremento porcentual en resistencia debido a temperatura de capa asfáltica inferior, Fuente: Abd-El Naby, S.M Easa [18].	26
Gráfico 15: Influencia del nivel de compactación en adherencia entre capas asfálticas, Fuente: Raab y Partl [17].	26
Gráfico 16: Influencia de velocidad de carga en resistencia al corte, Fuente: Memoria UCh., Vargas P. [2].	27
Gráfico 17: Influencia de temperatura de ensayo en resistencia al corte, Fuente: NCAT [16].	27
Gráfico 18: Tensiones para probetas de 4" y 6" pulgadas con CRS-2, Fuente: Memoria UCEN., Jara P. [11].	29
Gráfico 19: Tensiones para probetas de 4" y 6" pulgadas con CSS-1h MOD, Fuente: Memoria UCEN., Jara P. [11].	29
Gráfico 20: Resistencias al corte de probetas con CSS-1h para distintas dosis residuales, Fuente: Memoria UTFSM, Roni M. [13].	32
Gráfico 21: Set de gráficos de diseño de MAC IV-20.	61
Gráfico 22: Curvas de carga v/s deformación para testigos sometidos a ensayo de corte LCB.	75
Gráfico 23: Repetitividad del ensayo de corte LCB para testigos monolíticos "idénticos".	76
Gráfico 24: Acople de desviaciones estándar para los diferentes niveles auxiliares, Fuente: Elaboración propia en MINITAB.	77
Gráfico 25: Diferencias de las medias para la resistencia de corte de elementos monolíticos similares, Fuente: Elaboración propia en MINITAB.	78
Gráfico 26: Probabilidad de los residuos del análisis ANOVA para testigos monolíticos, Fuente: Elaboración propia en MINITAB.	79
Gráfico 27: Residuos v/s Orden de observación del ANOVA para testigos monolíticos, Fuente: Elaboración propia en MINITAB.	80
Gráfico 28: Grafica de probabilidad de los residuos (Prueba de normalidad, MINITAB), Fuente: Elaboración propia.	83
Gráfico 29: Residuos v/s Orden de observación del ANOVA para testigos doble capa, Fuente: Elaboración propia en MINITAB.	84
Gráfico 30: Comparación de resistencias doble capa con liga v/s sin liga.	85
Gráfico 31: Dosis v/s Resistencia al corte detallado (CSS-1h, Fresado, Curado 2 h., Limpio y Húmedo).	86
Gráfico 32: Dosis v/s Resistencia al corte (CSS-1h, Fresado).	87
Gráfico 33: Dosis v/s Resistencia al corte (CSS-1h, Sin Fresar).	88
Gráfico 34: Dosis v/s Resistencia al corte (Termoadherente, Fresado).	89

Gráfico 35: Dosis v/s Resistencia al corte (Termoadherente, Sin Fresar).....	91
Gráfico 36: Influencia de Superficie del Pavimento (Sucio y Seco).....	93
Gráfico 37: Diferencia de Superficie del Pavimento (Sucio y Seco).	94
Gráfico 38: Influencia de Superficie del Pavimento (Limpio y Seco).	95
Gráfico 39: Diferencia de Superficie del Pavimento (Limpio y Seco).	95
Gráfico 40: Influencia del Tipo de Emulsión (Fresado y Seco).	96
Gráfico 41: Diferencia del Tipo de Emulsión (Fresado y Seco).	97
Gráfico 42: Influencia del Tipo de Emulsión (Fresado y Húmedo).	97
Gráfico 43: Diferencia del Tipo de Emulsión (Fresado y Húmedo).	97
Gráfico 44: Influencia del Tipo de Emulsión (Sin Fresar y Seco).	98
Gráfico 45: Diferencia del Tipo de Emulsión (Sin Fresar y Seco).....	98
Gráfico 46: Influencia de Humedad (Fresado y Sucio).	99
Gráfico 47: Diferencia de Humedad (Fresado y Sucio).....	99
Gráfico 48: Influencia de Humedad (Fresado y Limpio).	100
Gráfico 49: Diferencia de Humedad (Fresado y Sucio).....	100
Gráfico 50: Influencia del Nivel de Limpieza (Fresado y Seco).	101
Gráfico 51: Diferencia del Nivel de Limpieza (Fresado y Seco).....	102
Gráfico 52: Influencia del Nivel de Limpieza (Fresado y Húmedo).....	102
Gráfico 53: Diferencia del Nivel de Limpieza (Fresado y Húmedo).....	102
Gráfico 54: Influencia del Nivel de Limpieza (Sin Fresar y Seco).	103
Gráfico 55: Diferencia del Nivel de Limpieza (Sin Fresar y Seco).	103
Gráfico 56: Influencia del Tiempo de Curado (Fresado, CSS-1h, Sucio y Seco).....	104
Gráfico 57: Influencia del Tiempo de Curado (Fresado, CSS-1h, Sucio y Húmedo).....	105
Gráfico 58: Influencia del Tiempo de Curado (Fresado, CSS-1h, Limpio y Seco).	105
Gráfico 59: Influencia del Tiempo de Curado (Fresado, CSS-1h, Limpio y Húmedo).	105
Gráfico 60: Influencia del Tiempo de Curado (Sin Fresar, CSS-1h, Sucio y Seco).	106
Gráfico 61: Influencia del Tiempo de Curado (Sin Fresar, CSS-1h, Limpio y Seco).....	106
Gráfico 62: Influencia del Tiempo de Curado (Fresado, Termoadherente, Sucio y Seco).	107
Gráfico 63: Influencia del Tiempo de Curado (Fresado, Termoadherente, Sucio y Húmedo).	107
Gráfico 64: Influencia del Tiempo de Curado (Fresado, Termoadherente, Limpio y Seco).	108
Gráfico 65: Influencia del Tiempo de Curado (Fresado, Termoadherente, Limpio y Húmedo).	108
Gráfico 66: Influencia del Tiempo de Curado (Sin Fresar, Termoadherente, Sucio y Seco).....	109
Gráfico 67: Influencia del Tiempo de Curado (Sin Fresar, Termoadherente, Limpio y Seco).	109
Gráfico 68: Resistencias medias doble-capa v/s resistencia monolítica del recapado.	112
Gráfico 69: Resistencia de testigos de diámetro 4" v/s 6".	113

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Resumen de variables y parámetros que afectan en la resistencia de corte, Fuente: Memoria UTFSM., Roni M. [13].	30
Tabla 2: Clasificación de resistencias al corte medida con equipo LCB, Fuente: Memoria UTFSM, Roni M. [13].....	32
Tabla 3: Requisitos para áridos combinados, Fuente: Tabla 5.408.201.D, Vol. N°5 MC.	34
Tabla 4: Clasificación de mezclas asfálticas según granulometría, Fuente: Curso de Laboratorista Vial, Vol. N°5.....	36
Tabla 5: Clasificación de mezclas asfálticas según porcentaje de vacíos, Fuente: Curso de Laboratorista Vial, Vol. N°5.	36
Tabla 6: Especificaciones para emulsiones asfálticas catiónicas, Fuente: Tabla 8.301.5.A Vol. N°8 MC.	39
Tabla 7: Especificaciones para emulsiones asfálticas aniónicas, Fuente: Tabla 8.301.4.A Vol. N°8 MC.	40
Tabla 8: Número de muestras para cada combinación de niveles del ANOVA.	45
Tabla 9: Valores de las muestras para cada combinación de niveles del ANOVA.	45
Tabla 10: Tabla de valores ANOVA, Fuente: Apunte Estadística Teórica UAM.	47
Tabla 11: Matriz de ensayos para testigos doble capa de diámetro de 6 pulgadas, Fuente: CDI.	48
Tabla 12: Matriz de ensayos para testigos doble capa de 4 pulgadas, Fuente: elaboración propia.	51
Tabla 13: Matriz de ensayo para estructuras monolíticas de recapado, Fuente: elaboración propia.	52
Tabla 14: Retención de emulsión en implementos según pruebas de aplicación manual.	55

Tabla 15: Cantidades requeridas de emulsión CSS-1h y Termoadherente para cada tiempo de curado en pista sin fresar.....	55
Tabla 16: Cantidades requeridas de emulsión CSS-1h y Termoadherente para cada tiempo de curado en pista fresada.....	55
Tabla 17: Especificaciones técnicas de emulsión CSS-1h, Fuente: Certificado Análisis CDI.....	57
Tabla 18: Especificaciones técnicas de emulsión termoadherente, Fuente: Certificado Análisis, PROBISA S.A.	58
Tabla 19: Cubicaciones para recapado del tramo de pruebas.	58
Tabla 20: Caracterización del árido utilizado para carpeta IV-20.	59
Tabla 21: Especificaciones técnicas para cemento asfáltico CA 60/80 utilizado, Fuente: Tabla 8.301.6.A, Vol. N°8 MC.....	59
Tabla 22: Dosificación de áridos para carpeta IV-20.	60
Tabla 23: Parámetros Marshall de carpeta IV-20.....	60
Tabla 24: Mezcla de trabajo, densidad Marshall y óptimo de MAC IV-20.....	61
Tabla 25: Densidades de testigos compuestos del recapado del tramo de pruebas.....	62
Tabla 26: Cantidades de emulsión aplicadas en franja de 24 h. en pista sin fresar.	68
Tabla 27: Cantidades de emulsión aplicadas en franja de 24 h. en pista fresada.	69
Tabla 28: Datos de entrada para análisis ANOVA de resistencias de testigos monolíticos.	76
Tabla 29: Análisis de varianza para testigos doble capa en MINITAB, Fuente: Elaboración Propia.	77
Tabla 30: Datos de entrada para análisis ANOVA de resistencias doble capa.	80
Tabla 31: Análisis de varianza para testigos doble capa en MINITAB, Fuente: Elaboración Propia.	81
Tabla 32: Prueba de homogeneidad de varianzas en MINITAB, Fuente: Elaboración propia.	83
Tabla 33: Dosis óptimas y coeficiente de correlación para CSS-1h en Pista Fresada.....	87
Tabla 34: Dosis óptimas y coeficiente de correlación para CSS-1h en Pista Sin Fresar.	89
Tabla 35: Dosis óptimas y coeficiente de correlación para E. Termoadherente en Pista Fresada.	90
Tabla 36: Dosis óptimas y coeficiente de correlación para E. Termoadherente en Pista Sin Fresar.....	91
Tabla 37: Promedios de resistencias según niveles.	111

1. CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

En Chile durante los últimos años, se ha podido apreciar un aumento considerable en la construcción de pavimentos gracias a la ley de Concesiones. Esto ha impulsado potentemente el área de la pavimentación y, como consecuencia, ha surgido la necesidad de incorporar al mercado nuevas tecnologías, dando pie a la investigación y al perfeccionamiento de las metodologías de construcción, junto con mejorar los materiales utilizados para construir estas estructuras.

Los pavimentos de asfalto son sometidos continuamente a cargas de tráfico. Para su diseño estructural, se hace el supuesto de que existe una adherencia perfecta entre las diferentes capas, comportándose como un sistema monolítico pero, lamentablemente, esto en la práctica no ocurre. Existe evidencia comprobada, que deterioros conocidos como el desprendimiento de la capa superior de rodadura, y corrugaciones en zonas de frenado, son problemas asociados a una mala adherencia entre capas asfálticas. Por lo tanto, la calidad de la adherencia tendría una relación directa con la vida útil del pavimento.

De acuerdo a las exigencias actuales, surge la necesidad de perfeccionar las especificaciones del riego de liga. Ello se ve plasmado en situaciones en las cuales los concesionarios de proyectos viales requieren valores de resistencia al corte mínimos para permitir la aprobación del proyecto. Un ejemplo claro es la concesionaria Vespucio Norte Express S.A., que exige una resistencia de corte mínima de 0,8 MPa para testigos de 4 pulgadas.

En la situación descrita, con el fin de complementar los conocimientos relacionados a la adherencia, apuntando a una futura normativa por desempeño, este estudio se centra principalmente en determinar cuantitativamente qué tan influyentes y predominantes son ciertos parámetros constructivos en el nivel de adhesión entre las capas asfálticas. Con la información obtenida, se podrá, en la medida de lo posible, tomar decisiones que permitan optimizar recursos y mejorar las metodologías constructivas de pavimentos asfálticos en la empresa Bitumix. S.A.

Para la realización de este trabajo, se confecciona un tramo de pruebas doble capa en función de una matriz de ensayo propuesta por el CDI, que considera distintas combinaciones en terreno, las cuales a priori, son determinantes en la adherencia de capas asfálticas y reflejan parte de las problemáticas cotidianas respecto a la secuencia constructiva de los pavimentos de asfalto. Una vez que se tenga el tramo construido, se debe realizar la extracción de 456 testigos de 6 pulgadas de diámetro y 24 testigos de 4 pulgadas, los cuales, posteriormente, formarán parte de las muestras a ensayar permitiendo realizar el análisis planteado en los objetivos generales y específicos de este estudio. A pesar de existir variados métodos de medición, la forma más común utilizada para medir el nivel de adherencia entre dos capas asfálticas, es someter probetas o testigos cilíndricos de dicha estructura a ensayos de corte directo, con el propósito de cuantificar la resistencia de la unión de las dos capas, la cual se opone a la carga ejercida por el dispositivo de corte, justo al momento previo antes de que éstas se separen.

Existen una serie de métodos utilizados para medir la adherencia entre capas asfálticas, tales como el Ensayo de Corte Normalizado del CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, España), el Ensayo de Corte Swiss Estándar (Laboratorio Suizo de Ensayos e Investigación de Materiales) y el Ensayo de Corte Superpave Shear Tester, entre otros. Para este estudio, se utilizará el Ensayo de Corte LCB (Laboratorio de Caminos de Barcelona), de la Universidad de Cataluña, España, el cual es de fácil implementación y se aplica actualmente en importantes laboratorios nacionales tales como el LEMCO, IDIEM y CDI.

2. CAPÍTULO II: OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Evaluar la influencia en la adherencia entre capas asfálticas de seis variables constructivas, especificadas en una matriz de ensayo propuesta por el CDI, mediante la implementación del Ensayo del Corte LCB a testigos de asfalto doble capa extraídos en un tramo de pruebas, construido en el mes de diciembre de 2017, compuesto de una capa asfáltica de soporte preexistente y un recapado, ubicado en la Planta Maipú de Bitumix S.A.

2.2. Objetivos específicos

- Determinar si existe o no, una correlación entre la dosis residual de riego de liga y la resistencia al corte y, por consiguiente, una dosis óptima residual para las Emulsiones CSS-1h y Termoadherente.
- Comparar y determinar qué factores tienen una mayor y menor influencia en la adherencia entre capas asfálticas.
- Determinar qué niveles, para cada variable, presentan mejores o peores resultados respecto a la resistencia al corte.
- Realizar una comparación entre las resistencias obtenidas de los testigos doble capa y los testigos monolíticos del recapado del tramo de pruebas confeccionado.
- Comparar resultados obtenidos con otros autores, con el fin de verificar si existen o no patrones en común.
- Verificar si existe una relación, entre las resistencias al corte de testigos de 6 pulgadas de diámetro, con las resistencias de testigos de 4 pulgadas de diámetro, para muestras de igual condición de adherencia.

2.3. Alcances

- El nivel de adherencia se estima de acuerdo a la resistencia al corte en MPa obtenida en el Ensayo de Corte LCB, por lo tanto, el análisis de optimización, considera además de la resistencia al corte, factores en términos económicos y prácticos.
- Debido a que la construcción del tramo de pruebas se realiza en el mes de diciembre, en la ciudad de Santiago, y que la temperatura ambiente tiene una influencia directa en los tiempos de quiebre de las emulsiones utilizadas como riego de liga, los resultados obtenidos se limitan a representar un set de combinaciones sólo en dicha época de altas temperaturas. Se debiese evaluar el efecto que tendría en la adherencia la confección del mismo tramo de pruebas en invierno u otra época del año a diferentes temperaturas.
- En este estudio, se debe considerar la diferencia de antigüedad entre las 2 capas asfálticas utilizadas como tramo de pruebas, por lo tanto, los resultados no representan condiciones, en las cuales, ambas capas fuesen colocadas de forma consecutiva.

- Los resultados de este trabajo, se acotan al análisis de adherencia sólo entre capas asfálticas de las mezclas de soporte IV-A-12 y recapado IV-20, por lo que los resultados no pueden extrapolarse necesariamente a otra combinación de estructuras de asfalto.
- Respecto al análisis de influencia de la variable Limpieza, para este estudio, se considera la comparación entre superficies limpias (mediante barrido y soplado), y superficies sucias (con polvo de fresado, para la pista fresada y polvo roca para la pista sin fresar) antes de la colocación del riego de liga, dejando de lado el análisis de suciedad con otros agentes invasivos y la influencia de éstos post colocación de la emulsión asfáltica.
- Respecto al análisis de influencia de la variable Humedad, para este estudio, se considera la comparación entre superficies húmedas (mediante pulverizadores convencionales) y superficies secas, después de la aplicación de suciedad, pero antes de la colocación del riego de liga, con el fin de estimar si la humedad, producto del fresado, en épocas invernales influye en el nivel de adherencia, dejando de lado las condiciones de humedad debido a inclemencias del clima tales como lluvia, vaguada costera, neblina o nieve.
- La falla por desprendimiento o slippage, no se produce sólo por la ausencia de adherencia entre las capas asfálticas. De hecho, más bien genera sólo un plano de falla horizontal, siendo necesario que aparezcan además dos planos de falla para la formación de grietas y el posterior desprendimiento de la capa superior. Por lo consiguiente, el análisis de adherencia de este trabajo, no tiene el alcance de describir la falla por desprendimiento en su totalidad.
- El nivel de adherencia adquirido por el riego de liga, corresponde a uno de los parámetros que otorgan resistencia en la interfaz de las muestras al ser sometidas al Ensayo de Corte LCB, en consecuencia, la resistencia al corte será el indicador utilizado para estimar la unión entre capas asfálticas, utilizándose como un sinónimo de adherencia, tomando en consideración que en la realidad son conceptos distintos. Además, no se considera el principio de Saint-Venant, el cual señala que las tensiones próximas a los apoyos no se distribuyen de forma simétrica ni uniforme. Éstas más bien, se asemejan a un tipo de paraboloide, ocurriendo el esfuerzo máximo en primera instancia, en una zona particular. Por ende, el comportamiento real de cómo se distribuyen y progresan las tensiones de corte no están al alcance de este estudio.

3. CAPÍTULO III: RECOPIACIÓN BIBLIOGRÁFICA

3.1. Antecedentes

3.1.1. Importancia de la Adherencia entre capas asfálticas

Cuando se construye un pavimento de asfalto, se tiene considerado como objetivo primordial, que sus capas estructurales queden unidas y trabajen de forma solidaria como una sola estructura. Para lograr dicho cometido, es que usualmente se utiliza el riego de liga, compuesto comúnmente por una emulsión asfáltica, la cual se aplica sobre un pavimento preexistente o una capa asfáltica recién colocada de soporte, en la que posteriormente se sobrepondrá la capa de rodadura. En la Ilustración 1, se puede observar la diferencia presente en el comportamiento, debido a cargas externas, para un elemento monolítico y un elemento doble capa en el cual no existe una adherencia efectiva.

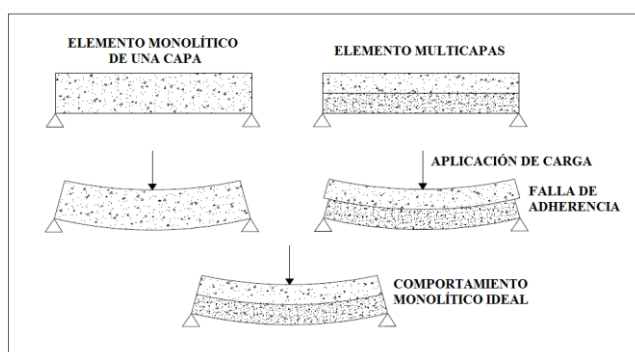


Ilustración 1: Comparación de Elemento Monolítico y Elemento Multicapa, Fuente: Memoria UCh., Álvarez C. [1].

La literatura internacional señala, en términos globales, la utilización del riego de liga como un material adherente para la colocación de sobrecapas, no obstante, existen autores que indican que en ciertos casos no es necesaria la utilización del riego de adherencia. A priori, tentativamente se pensaría que esta hipótesis, en caso de ser cierta, tendría validez sólo en la situación en que la capa inferior y superior se colocasen inmediatamente una después de la otra, con ambas mezclas encontrándose aun a altas temperaturas, y que al momento de compactarse la capa superior, se aprovecha esta condición para unir de forma “monolítica” estas dos estructuras. De forma intuitiva, se tiende a pensar que ocurriría lo contrario para estructuras de soporte preexistentes, ya que la capa inferior con cierta antigüedad, se encuentra a temperatura ambiente y no existiría una reactivación del cemento asfáltico suficiente que permita la unión entre ésta y la nueva capa de rodadura, haciendo necesaria la aplicación de un riego de liga. La adherencia de la interfaz entre la capa de soporte y la capa de rodadura, influye considerablemente en la distribución de esfuerzos y deformaciones en la estructura de pavimento. Estudios realizados y relacionados con el tema (Shanin et al., 1987 y Chen, 1992), han indicado que el riego de liga proporciona una adecuada unión entre las capas del pavimento, la cual es crítica para transferir los esfuerzos cortantes y radiales de tensión a la estructura del pavimento (ver Ilustración 2).

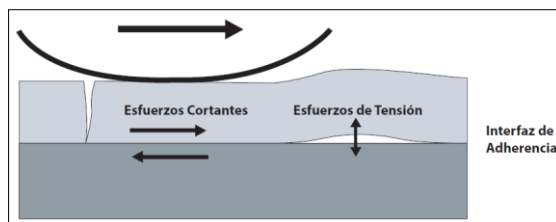


Ilustración 2: Esfuerzos Cortantes y de Tensión en interfaz producto de las cargas de tráfico, Fuente: NCHRP 2012.

Por otro lado, si la interfaz de adherencia entre la capa superior y la inferior no puede proveer la suficiente resistencia para soportar los esfuerzos transmitidos por las cargas de tránsito, puede ocurrir una falla por corte (NCHRP, 2012). La insuficiencia de adherencia entre estas capas, puede causar además, que los esfuerzos de tensión se concentren en la fibra inferior de la capa de rodadura. Esta concentración de esfuerzos acelera la aparición del agrietamiento por fatiga en la superficie y el deterioro del resto de la estructura del pavimento (Mohammad et. al, 2002). Lo anterior es explicado por nuevos modelos que contemplan el efecto de una pobre adherencia entre capas (Khweir y Fordyce, 2013). El modelo tradicional (Ilustración 3) de agrietamiento por fatiga, considera la concentración de esfuerzos de tensión, así como el inicio y propagación de grietas a la superficie en la última fibra del espesor del total de las capas asfálticas que constituyen la estructura del pavimento, al suponer que las capas se encuentran debidamente adheridas y que el pavimento funciona como un sistema monolítico. No obstante, los nuevos modelos sugieren que en capas asfálticas con pobre adherencia, la concentración de esfuerzos se presentará tanto en la última fibra de la capa inferior como en la última fibra de la capa de rodado colocada, al encontrarse estas dos desligadas, razón por la cual, las investigaciones consideran la aparición y propagación de grietas por fatiga para cada una de las capas asfálticas. Esto repercute, como se explicó anteriormente, en un deterioro acelerado de la estructura del pavimento.

Otro aspecto que se considera en los nuevos modelos con una adherencia deficiente, es cuando el agrietamiento se inicia sobre la superficie hacia la interfaz de adherencia, el agrietamiento no se propagará hacia debajo de las capas de la estructura existente, sino más bien generará un posible plano de deslizamiento en la interfaz de adherencia, como se puede observar en la Ilustración 4.

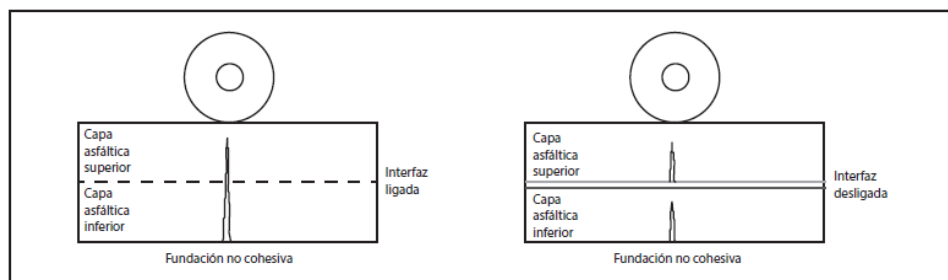


Ilustración 3: Desligue de capas asfálticas en la iniciación y propagación de grietas para modelo de fatiga tradicional, Fuente: Khweir y Fordyce, 2013.

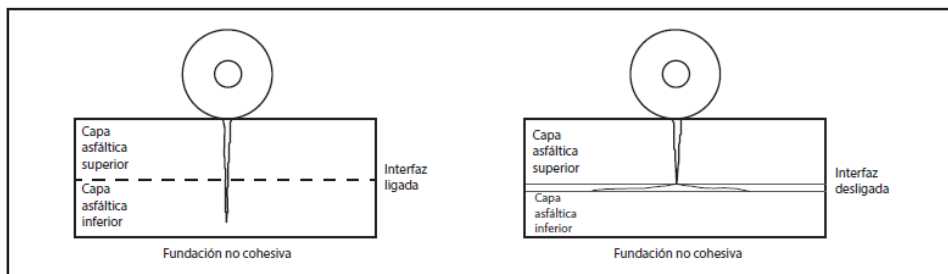


Ilustración 4: Desligue de capas asfálticas en la iniciación y propagación de grietas desde la superficie del pavimento, Fuente: Khweir y Fordyce, 2013.

3.1.2. Estudios realizados sobre el comportamiento de sistemas asfálticos multicapas

Como se ha mencionado, el nivel de adherencia entre capas asfálticas, tiene una directa relación con el desempeño y vida útil de los pavimentos. Una investigación realizada por Roffe y

Chaignon [19], mediante el programa de diseño estructural de pavimentos *Alize*, demostró que la vida útil de los pavimentos se ve comprometida reduciéndose de 20 a 7 años producto de una deficiente unión entre las capas de asfalto. En el Gráfico 1, se puede ver la disminución de ciclos necesarios para que el pavimento falle por fatiga, conforme aumenta el deslizamiento relativo de la interfaz de un sistema doble capa.

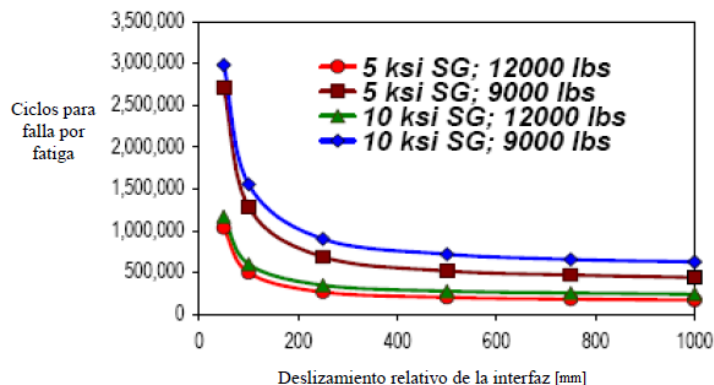


Gráfico 1: Disminución de ciclos para fatiga v/s deslizamiento en interfaz, Fuente: Roffe y Chaignon [19].

En otro estudio realizado por D. Timm, B. Birgisson y D. Newcomb, basándose en modelos mecanicistas, se comparó los niveles de tensión en las capas asfálticas unidas en un 0, 50 y 100%. En el Gráfico 2, se pueden observar los resultados del programa *WESLEA* para un pavimento de dos capas. Para una adherencia nula en la interfaz, cada capa responde de forma independiente de acuerdo a las solicitaciones, resultando valores de tensiones más altos en ese plano. Algo distinto ocurre para la unión del 100%, donde ambas capas responden de forma solidaria, soportando las tensiones de corte de forma más homogénea a través del espesor total del pavimento.

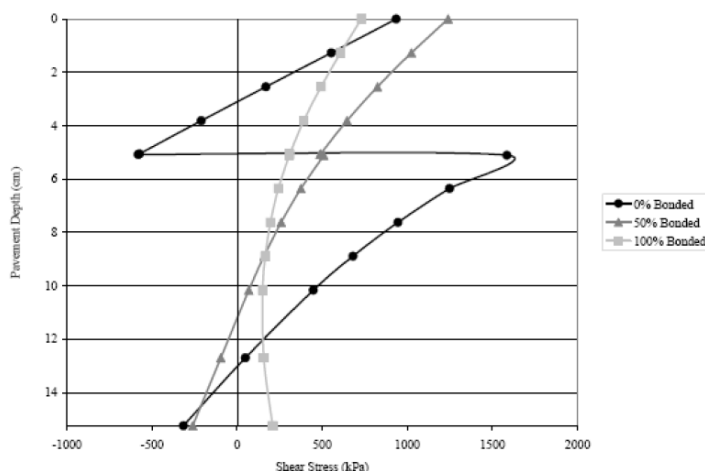


Gráfico 2: Distribución de tensiones de corte en el espesor de un pavimento doble capa, Fuente: D. Timm, B. Birgisson y D. Newcomb.

3.1.3. Especificaciones actuales en Chile

Las especificaciones chilenas actuales, respecto a la forma de proveer adherencia entre capas asfálticas, se encuentran en el volumen N° 5 del Manual de Carreteras (MC) para caminos interurbanos, y en el Código de Normas y Especificaciones Técnicas de Obras de Pavimentación del Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU) para obras urbanas, las cuales, indican las metodologías necesarias para aplicar el riego de liga en pavimentos asfálticos multicapas. La

sección 5. 402 del Manual de Carreteras, señala explícitamente que se debe aplicar un riego de emulsión asfáltica sobre una superficie pavimentada, con el objeto de producir adherencia entre ésta y la capa asfáltica que la cubrirá. Respecto al tipo de emulsión asfáltica, no restringe el uso de emulsiones de quiebre rápido, pero sugiere que preferentemente se utilicen emulsiones de quiebre lento, las que deben cumplir con las especificaciones referidas a su composición química, descritas en la sección 8.301.4 o 8.301.5 del MC-V8. Además, permite el uso de una emulsión asfáltica con polímero de quiebre lento u otra propuesta por el contratista. Toda verificación de materiales a utilizar debe ser responsabilidad del contratista, el cual mediante certificados de ensayos, debe comprobar ante el organismo de inspección competente, que los insumos sean utilizados correctamente.

En cuanto al procedimiento de trabajo, indica que para almacenar las emulsiones, éstas deben contenerse en estanques cerrados de hormigón armado, metal o fibra de vidrio. En caso de ser necesaria la aplicación de temperatura, bajo ninguna circunstancia debe aplicarse ésta de forma directa, prohibiendo el contacto entre las llamas del calentador y el material bituminoso. Antes de cargar las emulsiones a los camiones distribuidores, éstas deben agitar y homogeneizarse. Para la distribución de asfalto a presión, se deben utilizar depósitos aislados, montados sobre camiones que cuenten con un sistema de calentamiento, los que deben cumplir al pie de la letra con las disposiciones establecidas respecto al equipo distribuidor, evitando a como dé lugar, un riego de liga aplicado de manera no uniforme en el área intervenida. Éste debe desplazarse a una velocidad uniforme que permita una tasa de aplicación constante y por ende, cumplir con la dosis de riego preestablecida. El control de las velocidades, de la temperatura y de la bomba de asfalto se realiza mediante dispositivos incorporados al equipo, los cuales deben estar previamente calibrados.

Antes de la colocación del riego de adherencia, la superficie debe estar limpia de cualquier agente externo a la superficie asfáltica propiamente tal, mediante un equipo barredor. Quien tiene la facultad de decidir si la superficie se encuentra apta, es el inspector fiscal. No se deben efectuar riegos de liga si el tiempo se presenta neblinoso o lluvioso. Respecto a la temperatura ambiente, ésta debe ser a lo menos 10°C y la temperatura en la superficie mayor a 10°C. Tampoco se puede transitar en la superficie con el riego de emulsión aplicado y, en caso de ocurrencia, la zona alterada deberá repararse completamente mediante un riego adicional antes de colocar la capa de rodado. Las emulsiones asfálticas sean tradicionales o modificadas con polímero, deben aplicarse sin diluir, y su dosis debe estar comprendida entre 0,4 a 1 kg/m² de superficie, con una temperatura que debe estar en el rango de 20° y 50°C. La tolerancia de aplicación de dosis es de 5%, la cual se debe verificar. En caso de existir áreas que no fueron cubiertas satisfactoriamente, podrá aplicarse el riego de forma manual.

Por otro lado, las especificaciones del Código de Norma del MINVU, tienen en su mayoría una similitud a las disposiciones del MC, salvo por la preferencia del tipo de emulsión asfáltica a utilizar, ya que en este apartado se sugiere la utilización de emulsiones asfálticas de quiebre rápido, dejando en claro que estas sólo son sugerencias y la determinación del tipo de emulsión puede variar dependiendo del proyecto y de la inspección fiscal. Respecto a la dosis de emulsión asfáltica, se indica que ésta debe aplicarse también entre 0,4 y 1 kg/m² sin diluir, pero además se hace alusión a fijar la dosis mínima definitiva de residuo asfáltico, la cual debe ser de 250 g/m², y si se relaciona con el valor de dosis mínima de 0,4 kg/m² de emulsión, se estaría considerando, en este caso, que la emulsión asfáltica se compone de un 63% de asfalto. Esta normativa también fija la cantidad máxima de residuo asfáltico, el cual es de 500 g/m². Tomando en cuenta la misma configuración del porcentaje de asfalto, se considera que la cantidad de emulsión máxima sería de unos 0,8 kg/m², aproximadamente, valor que difiere de los 1 kg/m². En el caso de las emulsiones modificadas con elastómeros, la dosis se fija entre 0,4 y 1,1 kg/m² de superficie sin diluir en agua. Como se puede observar, existe cierta ambigüedad entre estas normas, ya que se habla de un rango de dosis de

emulsión y de un rango de residuo asfáltico recomendado, los cuales no son completamente consecuentes. Tampoco se hace una diferenciación para los distintos tipos de superficie donde se aplica el riego de liga, ya que, por ejemplo, una superficie fresada, al contar con una mayor superficie específica requeriría, a priori, una dosis mayor de emulsión que una superficie corriente con una rugosidad determinada sólo por la microtextura y macrotextura. Tampoco existe una fuente normada que recomiende los tiempos de curado necesarios, dependiendo del tipo de emulsión y las condiciones climáticas, para que la emulsión quiebre y maximice su adherencia entre las capas asfálticas. Estos parámetros son muy importantes, ya que la humedad ambiente, la temperatura, la velocidad del viento y el comportamiento físico-químico de la emulsión, pueden influenciar completamente el proceso de quiebre, y dependiendo de la época del año, estos factores pueden ser totalmente distintos. Las especificaciones, del mismo modo, no hacen referencia de la estimación de un umbral de resistencia para el control de adherencia y sólo se han determinado de forma arbitraria para algunos casos, como en Vespucio Norte, ciertos valores mínimos de resistencia que no han sido completamente fundamentados.

Respecto al proceso constructivo necesario para la colocación del riego de liga, durante su ejecución, se permite el ingreso de camiones con mezcla asfáltica a la pista con riego de liga, permitiendo en muchos casos, que la emulsión asfáltica quede adherida en los neumáticos del camión, dejando esa zona sin la cobertura necesaria para proveer adherencia. Además, rara vez se realizan pruebas de control de aseguramiento y de calidad del proceso de provisión de adherencia, lo que puede conllevar a que el pavimento tenga un desempeño no deseado. Es por estos motivos, que surge la necesidad de investigar y corroborar de forma empírica, cómo y cuánto pueden influir ciertos factores en la adherencia de capas asfálticas, ayudando así a complementar los conocimientos técnicos del tema y en caso de ser posible, mejorar los procesos constructivos en relación al riego de liga.

3.1.4. Variables de influencia en la adherencia

De acuerdo a la literatura existente, relacionada con la adherencia y el riego de liga, tanto de ámbito nacional como internacional, se ha establecido que la resistencia de corte entre capas asfálticas depende de diversos factores relacionados con los materiales utilizados, las metodologías constructivas implementadas y las condiciones atmosféricas. En función de diversos estudios realizados, se han compilado para este trabajo, las variables que más influyen en la adherencia entre capas de asfalto, las cuales se detallan a continuación:

3.1.4.1. Tipo de superficie

La condición de superficie de la capa asfáltica de soporte, tomando en cuenta sólo su textura, dejando de lado la presencia de otros agentes tales como la humedad y polvo, se considera como uno de los parámetros más influyentes en la adherencia entre capas. Es importante señalar, que la textura depende del tipo de mezcla utilizado como capa asfáltica (se frese o no) y de su edad. No es común que se frese una superficie si la capa de soporte es nueva, por lo tanto en dicho caso, el factor preponderante sería el tipo de árido utilizado en la mezcla, el cual puede ser fino o grueso. Un estudio realizado por la NCAT [16], demuestra la influencia existente en los niveles de adherencia producto de las variaciones de la graduación de las mezclas asfálticas. En el Gráfico 3, se puede observar, que al comparar distintas dosis de riego de liga (emulsiones CRS-2, CSS-1h y PG 64-22), las resistencias al corte de elementos doble capa son más altas para pavimentos de graduación más fina.

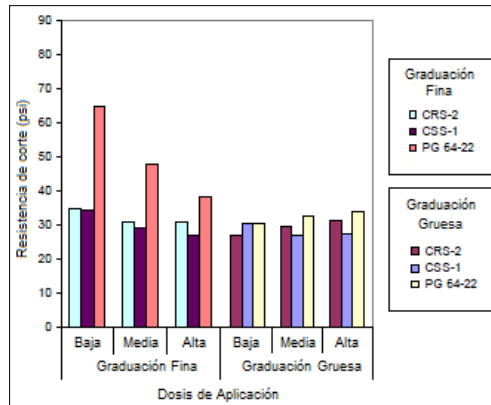


Gráfico 3: Influencia de la graduación de la mezcla asfáltica en la adherencia, Fuente: NCAT [16].

Atendido a que el tramo de pruebas de esta investigación, se compone de una capa de soporte preexistente y un recapado compuesto de características similares, se dejará de lado el estudio de superficies nuevas junto a la influencia del tipo de mezclas asfálticas utilizadas, centrándose sólo en la comparación de superficies sin fresar v/s fresadas para un mismo material. También se sabe, que el tipo de mezcla causa un efecto directo en la capacidad de absorción de emulsiones asfálticas utilizadas como riego de liga y, por ende, influyen también en la adherencia para cada dosis aplicada. Un estudio realizado por la WCAT[10] en Estados Unidos, para pavimentos existentes, señala la notoria diferencia entre las resistencias al corte obtenidas para testigos doble capa, los cuales fueron extraídos de un tramo de pruebas compuesto por un área fresada y otra sin fresar, denotando un aumento considerable en la adherencia debido a la corrugosidad del fresado. El Gráfico 4, muestra la comparación de Resistencias al Corte en psi (Mean Shear Strength) de las texturas de superficie Fresada (Milled) versus Sin Fresar (Non-milled), donde se puede apreciar esta gran diferencia en el nivel de adherencia.

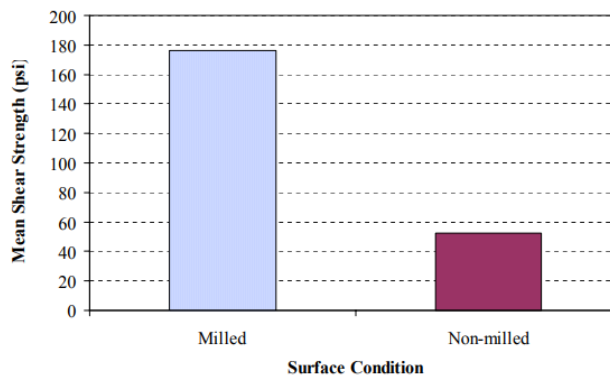


Gráfico 4: Influencia de la condición de superficie (Fresado v/s Sin Fresar) en pavimentos existentes, Fuente: WCAT [10].

3.1.4.2. Tipo de ligante asfáltico utilizado como riego de liga

Los ligantes utilizados comúnmente como riegos de liga, poseen características físico-químicas distintas entre sí, ya que su composición varía considerablemente. Tanto en el extranjero como en Chile, se han realizado diversas investigaciones, las cuales han determinado que el nivel de adherencia expresado en la resistencia al corte, tanto de probetas como de testigos, alcanza valores distintos dependiendo del tipo de ligante utilizado como riego de liga. Actualmente, por temas ambientales, los asfaltos cortados no se usan, permitiendo principalmente la utilización de las emulsiones asfálticas como adherente entre las capas de asfalto. El Gráfico 5, resume los resultados de resistencias al corte para distintas dosis, realizado en la memoria de la UCh. de Álvarez C.

(2007) [1]. En dicho trabajo, se puede observar la diferencia existente en los niveles de adherencia debido a la utilización de distintos tipos de emulsión asfáltica para probetas de laboratorio. De acuerdo a lo observado, la emulsión Termoadherente M1 presenta mejores resultados y mayor estabilidad. Luego siguen las emulsiones CRS-1 y CSS-1h, donde la primera alcanza un peak mayor, pero presenta menor estabilidad en función de la dosis aplicada, en comparación con CSS-1h. Finalmente, la emulsión Spramul (SPR) fue la que presentó peores resultados, los cuales tienden a ser similares a los valores de resistencias sin riego de liga.

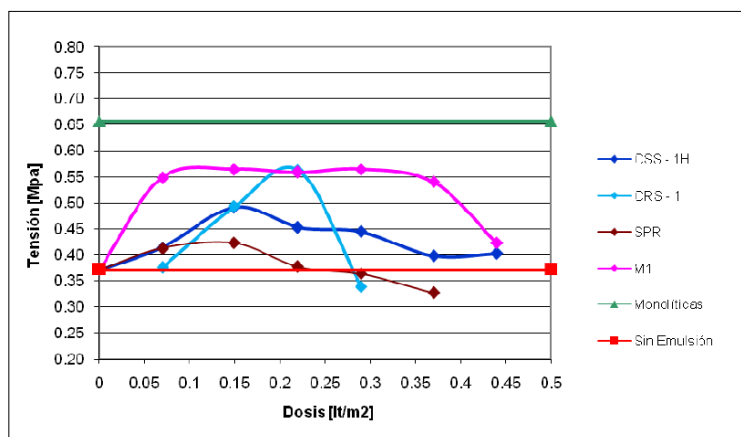


Gráfico 5: Resistencias al corte de diferentes emulsiones con dosis variable, Fuente: Memoria UCh., Álvarez C. [1].

Por otra parte, Jara P. (2017) en su Memoria de la Universidad Central [11], realizada en el CDI, analizó la adherencia entre capas para las emulsiones CSS-1h, CSS-1h MOD, CRS-2, CRS-2 MOD y Termoadherente, obteniéndose mejores resultados con CSS-1h MOD y peores resultados con CRS-2. En el extranjero existen numerosas investigaciones que mantienen la misma tónica de estos estudios, confirmando que el nivel de adherencia se ve diferenciado por el tipo de emulsión que se utilice como riego de liga y, en general, se obtienen mejores resultados con aquellas emulsiones de residuo asfáltico de mayor dureza.

3.1.4.3. Dosis aplicada de riego de liga

Se han realizado diversas investigaciones, a fin de estimar las cantidades óptimas de aplicación del riego de liga. Todas éstas, indican de forma unánime, que una cantidad baja e insuficiente de emulsión asfáltica, como también una cantidad excesiva de ésta (efecto lubricante), conduce a una pérdida de la adherencia, más aún, en algunos casos y para ciertas condiciones, algunos autores señalan que el riego de liga es innecesario. Se habla de óptimo, como el nivel de adherencia máximo posible utilizando la menor cantidad de emulsión. En términos prácticos, es usual que al momento de hablar de dosis aplicada, se hable de la dosis residual de asfalto que queda depositada como una delgada película de betún, luego del proceso de quiebre (evaporación del agua), por tanto, y con el fin de establecer con mayor facilidad las cantidades de dosis que se considerarán en este estudio, se hablará de la dosis residual de asfalto aplicada en cierta cantidad por unidad de área y no de la dosis total aplicada con agua, ya que una emulsión asfáltica en su totalidad contiene agua, un agente emulsificante y asfalto.

Es importante recalcar, que la tasa o dosis de aplicación óptima, depende de factores tales como las condiciones de la superficie, las cuales varían dependiendo del tipo de mezcla utilizado, de la edad de la estructura o si se trata de un pavimento fresado, con una mayor superficie específica. Tampoco se debe dejar de lado el tipo de emulsión utilizada, ya que puede influir directamente en esta variable. Debido a estas afirmaciones, es que se hace imposible realizar una

correlación genérica entre la adherencia y la dosis que represente todas las emulsiones y condiciones superficiales de la capa de soporte, por consiguiente, sólo queda ahondar con mayor profundidad las dosis óptimas para cada caso particular. Según la normativa actual, en Chile, se especifica que los rangos óptimos de dosis total de aplicación del riego de liga, se encuentran en el rango de 0,4 a 1 kg/m². Considerando hipotéticamente un 60% de contenido de asfalto en una emulsión estándar, el rango descrito anteriormente, en términos de dosis residual, queda comprendido entre 240 y 600 g/m² aproximadamente. Jara P. (2017) en su memoria realizada en el CDI [11], estimó de forma empírica las dosis residuales óptimas para 5 emulsiones, las cuales difieren significativamente entre sí. Según el Gráfico 6, que corresponde al análisis para la emulsión CSS-1h de probetas doble capa de mezclas IV-A-12(capa rodado)/BINDER(soporte), para diferentes dosis residuales, se puede observar un buen ajuste con la correlación Polinómica de segundo grado, interpolando de manera satisfactoria las resistencias al corte obtenidas en el ensayo de corte LCB, indicando claramente la existencia de un óptimo cercano a los 1,4 MPa, al aplicarse una dosis residual de 250 g/m² para dicha configuración. Algo distinto ocurre con la Emulsión Termoadherente, ya que el ajuste polinómico no representa de buena forma los datos obtenidos empíricamente. Tampoco se logra estimar un máximo absoluto de resistencia al corte, como se puede observar en el Gráfico 7, ya que no hay una variación considerable en la resistencia al corte, si se varía la cantidad de dosis residual.

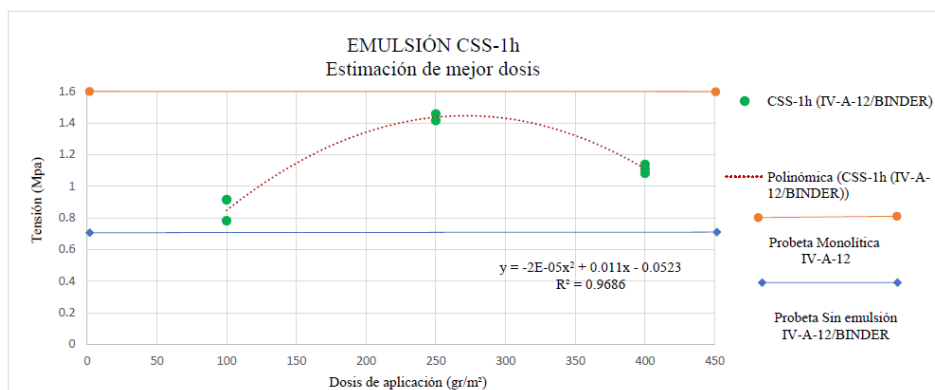


Gráfico 6: Estimación de dosis óptima para emulsión CSS-1h con probetas doble capa IV-A-12/BINDER, Fuente: Memoria UCEN., Jara P. [11].

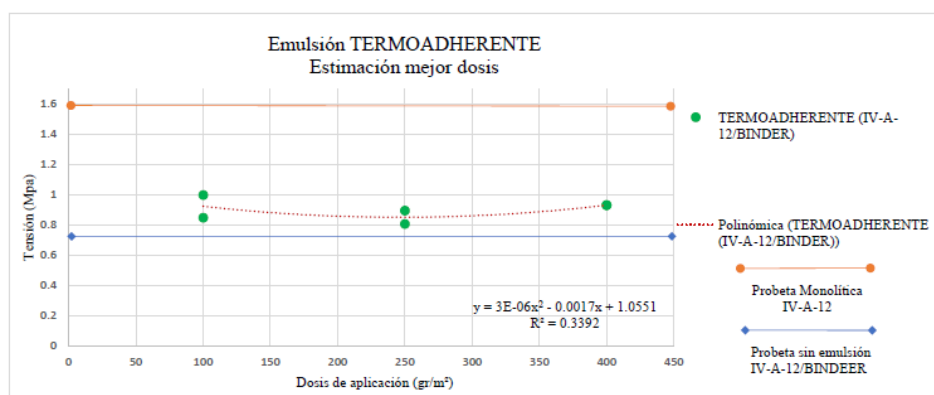


Gráfico 7: Estimación de dosis óptima para emulsión Termoadherente con probetas doble capa IV-A-12/BINDER, Fuente: Memoria UCEN., Jara P. [11].

3.1.4.4. Tiempo de curado de la emulsión asfáltica

En cuanto al tiempo de curado, existe controversia respecto a la forma de maximizar la adherencia entre capas asfálticas. La mayoría de los estudios realizados, afirma que las emulsiones utilizadas como riego de liga, deben presentarse como una película asfáltica ligante ya quebrada previa a la colocación de la capa superior. Otros autores, en menor número, señalan que no es aconsejable dejar que la emulsión cure demasiado tiempo, pues existe el riesgo de que ésta pierda sus propiedades adhesivas. Es importante definir, que las emulsiones son compuestos influenciados directamente por el tiempo de quiebre y, este factor a su vez, depende tanto de agentes externos de carácter climático (velocidad del viento, humedad ambiente, temperatura de aplicación, temperatura ambiente), como también de las características físico-químicas de la emulsión utilizada y la dosis aplicada. Investigaciones relacionadas con el tiempo de curado necesario para maximizar la adherencia entre capas, han concluido que a mayor tiempo que se deje curando la emulsión, la resistencia al corte se incrementa levemente. Por otro lado, algunas de las contrapartes, señalan incluso que no es necesario dejar curando el riego de liga, ya que éste quiebra inmediatamente debido a las altas temperaturas de la capa de asfalto superpuesta, evaporando las partículas de agua, las cuales se escurren a través de la mezcla sin compactar hacia la superficie. En el Gráfico 8, se puede observar las diferentes resistencias al corte (Mean Shear Strength) en psi, obtenidas en el estudio de adherencia de un tramo de pruebas confeccionado por la WCAT [10]. En él, se aprecian las diferencias sutiles de adherencia al utilizar la emulsión quebrada (broken) y sin quebrar (unbroken), tanto para una superficie fresada (milled) como para una superficie sin fresar (Non-milled), aplicadas a distintas dosis.

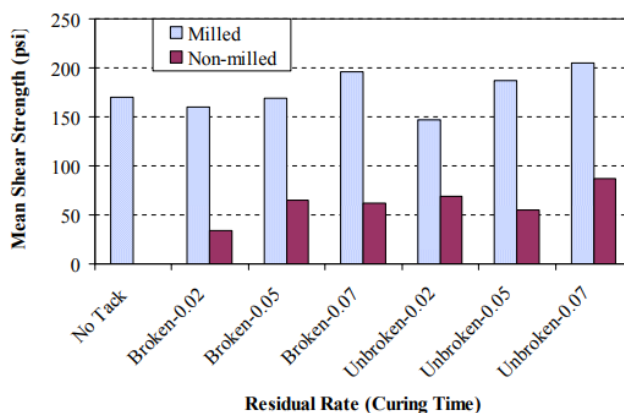


Gráfico 8: Comparación de resistencias de emulsión quebrada v/s sin quebrar, Fuente: WCAT [10].

3.1.4.5. Presencia de humedad en superficie

La humedad es un posible factor de influencia que debe ser considerado al momento de aplicar el riego de liga, ya que por diversas condiciones climatológicas, el agua se puede presentar como lluvia, llovizna, neblina, vaguada costera, entre otras, afectando la unión de las capas asfálticas al tener contacto con la emulsión asfáltica utilizada. Las normativas en general, prohíben el funcionamiento de faenas constructivas de obras viales si las condiciones atmosféricas son desfavorables, quedando a criterio del contratista, determinar si se debe continuar o no con la obra en estas circunstancias. También existe una condición constructiva particular en la que se puede presentar humedad, puesto que para superficies que requieren reparación, la fresadora debe utilizar agua para su funcionamiento, dejando con humedad la nueva superficie fresada, por lo tanto, si las condiciones atmosféricas son favorables a que se mantenga esta condición y, de acuerdo a la programación de obra, una vez que se frese, se debiese colocar inmediatamente la capa asfáltica superior, existe la posibilidad de que el riego de liga se aplique sobre una superficie fresada y húmeda. Es importante mencionar que la humedad puede presentarse antes de la colocación del riego de liga y/o después de esta aplicación. Por ende, queda abierto a investigar en qué situación

puede ser más considerable la presencia de humedad, o si realmente no lo es en ninguno de los casos. Uno de los estudios relacionados con el riego de liga, realizados por la National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) en el reporte 712[12], analizó la influencia que tiene la humedad en la unión de capas asfálticas. En un tramo de pruebas construido, se simuló la humedad de una lluvia ligera caída con $0,27 \text{ lt/m}^2$ ($0,06 \text{ gal/yd}^2$) sobre una superficie con riego de liga ya aplicado, y posteriormente se colocó la capa asfáltica superior. Según los resultados expuestos en el Gráfico 9, para condiciones limpias, con dosis de emulsión aplicadas con y sin confinamiento, se puede observar que en la mayoría de las situaciones, no se mostraron diferencias significativas entre las resistencias al corte de superficies secas y húmedas.

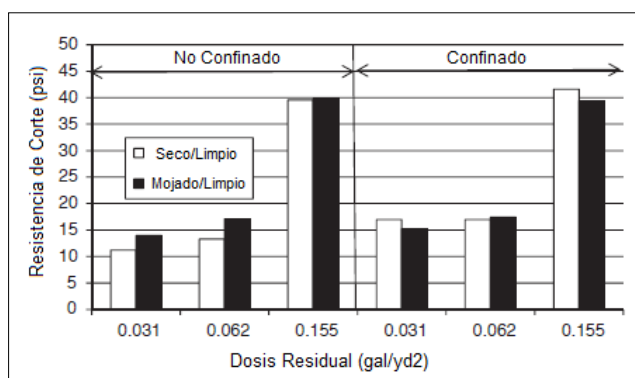


Gráfico 9: Resultados del análisis de humedad en resistencias al corte para condición Limpia, Fuente: NCHRP [12].

Algo distinto concluye Álvarez C. en su memoria realizada en IDIEM [1], donde analiza la influencia de la presencia de humedad, luego de que el riego de liga haya quebrado, con una dosis de agua de $0,2 \text{ [lt/m}^2\text{]}$. De acuerdo al Gráfico 10, se puede observar, que la presencia de agua, reduce considerablemente la resistencia al corte de las probetas ensayadas, situándose por debajo de las resistencias de las mismas sin emulsión. También se puede ver, que a medida que las dosis de residuo disminuyen, el efecto nocivo de la humedad aumenta.

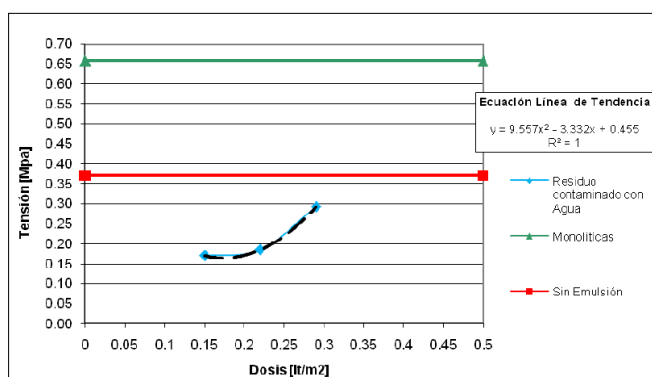


Gráfico 10: Resistencias de corte según distintas dosis de agua, Fuente: Memoria UCh., Álvarez C. [1].

Es importante acotar, que en estas investigaciones ([1] y [12]), la humedad se aplica después de la colocación del riego de liga, simulando cantidades de agua mayores que las necesarias para la simulación de la condición de post-fresado, por lo tanto, es esperable que los resultados no sean necesariamente similares, más aun si el agua en este caso se aplica antes del riego de liga.

3.1.4.6. Presencia de suciedad en superficie

Mientras se aplica el riego de liga en la superficie asfáltica de la capa de soporte, es probable que, debido al viento, al tránsito sin precaución de camiones con mezcla o a terceros, llegue a dicha superficie una cantidad indeseada de contaminantes ajenos, tales como material orgánico vegetal y, principalmente, áridos de bajo tamaño. Diversos estudios se han centrado en la contaminación por polvo, dejando constancia de que el efecto de éste puede ser variable dependiendo de la fuente de origen del árido y de la cantidad en que se deposite. Es importante mencionar, que la contaminación de agentes externos puede ocurrir antes de la aplicación del riego de liga y después de éste, por consiguiente, queda investigar qué tipo y en qué situaciones puede ser más o menos nociva la intrusión de polvo, puesto que se considera como el contaminante más común en el proceso de provisión de adherencia. La NCHRP [12], realizó una investigación sobre los efectos del polvo en la adherencia. En un tramo de pruebas, se aplicaron 342 g/m^2 ($0,07 \text{ lb/ft}^2$) de arcilla limosa antes de la colocación del riego de liga, y luego se aplicó humedad, tanto para superficies sucias como limpias. Como se puede observar en el Gráfico 11, la mayoría de los casos mostraron diferencias entre condiciones limpias y polvorientas. En general, las condiciones de polvo exhibieron una mayor resistencia de interfaz que las condiciones de limpieza, especialmente, cuando se probaron con una condición de confinamiento. Una posible explicación de estos resultados es que se formó una masilla arenosa de alta viscosidad, cuando se combinó la humedad con el polvo, proporcionando una mayor resistencia al movimiento de cizalle.

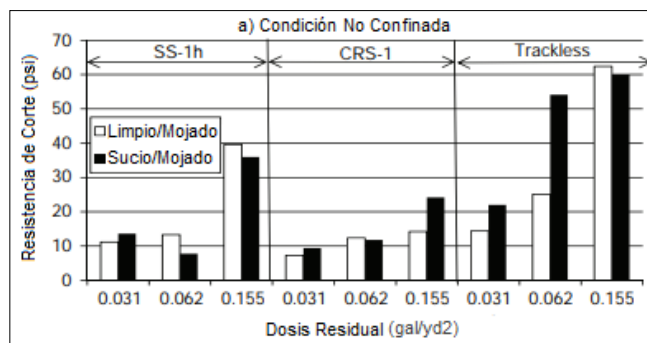


Gráfico 11: Comparación de resistencias de corte limpias/sucias para condiciones no confinadas, Fuente: NCHRP [12].

En Chile, Álvarez C. en su trabajo de memoria [1], analizó los efectos en el nivel de adherencia para superficies ensuciadas con polvo después del quiebre del riego de liga. En el Gráfico 12, se puede observar que, con cantidades bajas de emulsión, la curva presenta una pendiente plana, indicando que la nocividad, producto de la contaminación, se estabiliza.

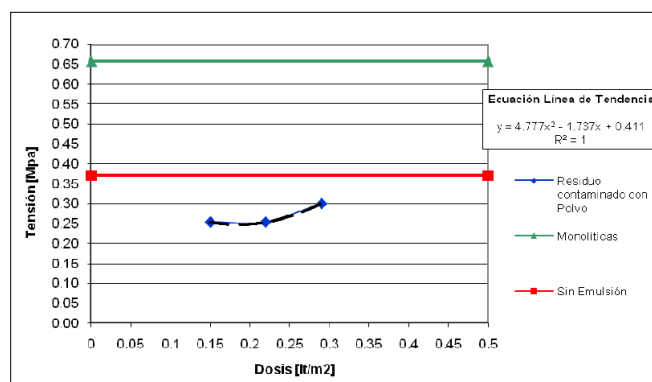


Gráfico 12: Resistencias de corte para superficies con polvo, Fuente: Memoria UCh., Álvarez C. [1].

Otro claro ejemplo, en el cual la adherencia se ha visto afectada considerablemente producto de materiales contaminantes, fue lo ocurrido en la segunda pista del Aeropuerto Arturo

Merino Benítez en el año 2006. La segunda pista inaugurada a mediados de dicho año, presentó graves fallas por deslizamiento al poco tiempo de su puesta en servicio, dado que el riego de liga aplicado se contaminó con pomacita, según un estudio realizado por IDIEM. La pomacita, que corresponde a un material de origen volcánico, posee una textura riquísima en poros y vacuolos, en parte cerrados y en parte canaliformes, lo que le confiere una gran ligereza. Debido a estas características, este contaminante es totalmente nocivo, puesto que absorbe con facilidad los materiales bituminosos, disminuyendo considerablemente las características adhesivas del riego de liga.

3.1.4.7. Temperatura de confección, compactado y edad de mezclas asfálticas

De acuerdo a diversos estudios realizados, se ha determinado que la temperatura de las mezclas asfálticas y la edad de éstas entre sí, influyen directamente en el nivel de adhesión presente en la interfaz de los sistemas multicapas; ya sea por condiciones constructivas debido a problemas de coordinación en el transporte, por distancias excesivas entre el lugar de producción de mezcla a la faena o simplemente por un tema de disponibilidad, es posible que sea complicado mantener la temperatura recomendada de una mezcla para su colocación y posterior compactación. Un estudio realizado por Álvarez C. [1], analizó las tensiones de corte máximas para probetas doble capa confeccionadas con un mismo material y emulsión asfáltica (CRS-1), variando sólo la temperatura de compactación de la segunda capa (superior). En el Gráfico 13 se puede observar, que al disminuir la temperatura de la capa de rodado, se reduce también el nivel de adherencia entre las capas asfálticas de estas probetas, llegando incluso a valores por debajo de las probetas sin emulsión, ratificando la importancia de esta variable respecto a la unión en la interfaz de pavimentos asfálticos.

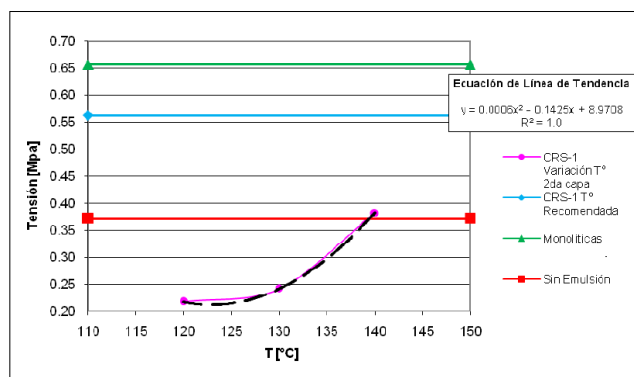


Gráfico 13: Tensión de corte máxima v/s Temperatura de Compactación de 2da capa para probetas con emulsión CRS-1, Fuente: Memoria UCh., Álvarez C. [1].

Por otro lado, Abd-El Naby y S.M. Easa, (2002) [18], comprobaron que la adherencia es mayor cuando la capa de soporte o capa inferior aún se encuentra caliente al momento de colocar la capa superior. En el Gráfico 14, se puede observar el incremento porcentual comparativo al utilizar un tipo de mezcla respecto de otro, afirmando que el hecho de utilizar distintas mezclas puede influir considerablemente en la unión de capas asfálticas. Lo importante de este punto, es mencionar que al colocar las capas asfálticas superiores, cuando las capas inferiores ya se encuentran frías, la adherencia disminuye independientemente si se ocupa o no riego de liga.

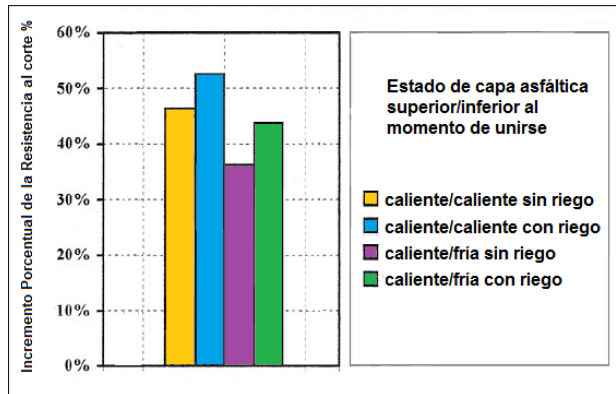


Gráfico 14: Incremento porcentual en resistencia debido a temperatura de capa asfáltica inferior, Fuente: Abd-El Naby, S.M Easa [18].

3.1.4.8. Energía de compactación

Como se ha mencionado, los tipos de mezcla asfáltica utilizadas influyen en el nivel de adherencia entre sus capas donde, en general, se ha demostrado que mientras más densas y cerradas sean las mezclas, mayor será la resistencia al corte. Un estudio realizado por Raab C. y Partl M.N. [17] en Suiza, comparó las resistencias de distintas probetas confeccionadas en laboratorio, las cuales, para mezclas asfálticas iguales, diferentes dosis y tipos de riego de liga, se compactaron mediante el compactador giratorio con 50 y 204 giros respectivamente. En el Gráfico 15, se puede observar que en todos los casos, independiente de la dosis de emulsión aplicada, los resultados con 204 giros, presentan resistencias más altas que los de 50 giros, afirmando una diferencia sustancial en el nivel de adherencia por causa de una mayor compactación de las mezclas asfálticas. También se destacan los buenos resultados que se obtienen para probetas doble capa sin riego de liga, considerando que ambas capas se encuentran a altas temperaturas al momento de unirse.

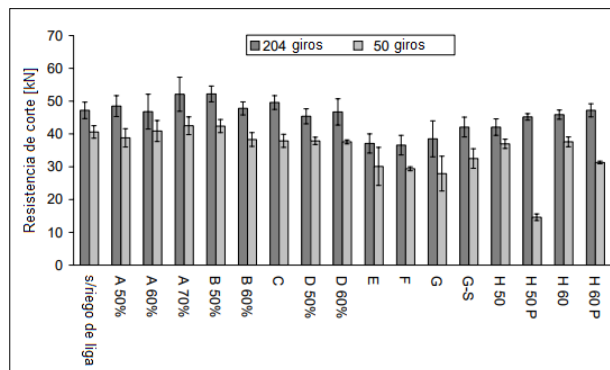


Gráfico 15: Influencia del nivel de compactación en adherencia entre capas asfálticas, Fuente: Raab y Partl [17].

3.1.4.9. Factores de influencia en medición de la adherencia

3.1.4.9.1. Velocidad de carga

De acuerdo a estudios anteriores que utilizan dispositivos de corte, se ha demostrado que a mayor velocidad de carga, mayor será la resistencia de corte obtenida. En el Gráfico 16, correspondiente a un estudio realizado por Vargas P. [2], se puede observar la relación existente entre la velocidad de carga y la resistencia, donde se aprecia un aumento considerable en más de un 100% si la velocidad de carga se aumenta de 0,57 a 8 mm/min.

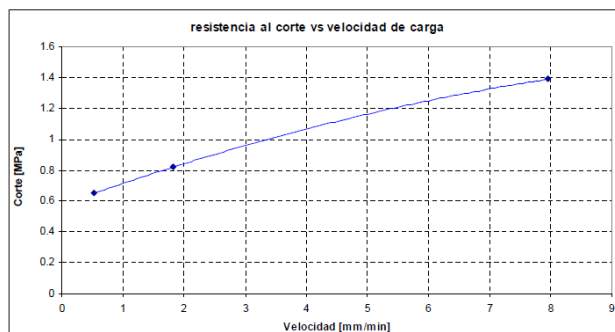


Gráfico 16: Influencia de velocidad de carga en resistencia al corte, Fuente: Memoria UCh., Vargas P. [2].

Es importante mencionar que, para el dispositivo utilizado en el CDI, la velocidad de carga se regula de manera análoga mediante una manilla para que se alcance una velocidad de carga de 2,5 mm/min, tal como lo señala la norma. De acuerdo a ensayos previos realizados, se estimó que no existe una diferencia considerable entre la deformación al minuto en “vacío” (sin testigo) y con un testigo, por tanto, la regulación de la manilla se realizó sin muestra, a modo de facilitar la calibración.

3.1.4.9.2. Temperatura de ensayo

De acuerdo a estudios que han utilizado dispositivos de corte, tanto para probetas como testigos asfálticos, se ha consensuado que la temperatura de ensayo tiene una gran influencia en los resultados. El Gráfico 17, muestra las resistencias al corte obtenidas para probetas de un mismo material, pero ensayadas a distintas temperaturas, para niveles de presión normal de 0, 10 y 20 psi, observándose que a mayores temperaturas, menor es la resistencia al corte y por lo mismo, el nivel de adherencia.

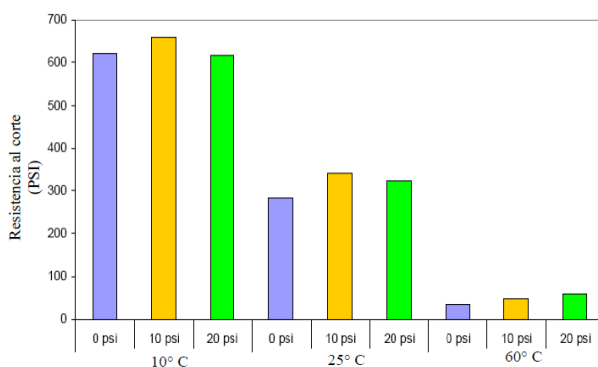


Gráfico 17: Influencia de temperatura de ensayo en resistencia al corte, Fuente: NCAT [16].

Para evitar esta problemática, en el CDI se ha instalado el dispositivo de ensayo de corte LCB dentro de una sala aislada, con control de temperatura, por las razones observadas, las muestras ensayadas se acondicionarán en dicha sala de acuerdo a la temperatura de ensayo de 20°C, especificada por norma y posteriormente se ensayarán en esta misma, manteniendo constante el parámetro de temperatura de ensayo en todo momento.

3.1.4.9.3. Estado del dispositivo de ensayo

Además de la calibración de la velocidad de la prensa, es importante tener en buenas condiciones el dispositivo de ensayo el cual, para este caso, se compone de la prensa hidráulica, el software de control y un elemento de sujeción de las muestras. Para un funcionamiento correcto, se

debe tener al día el estado de mantención tanto del hardware como del software de control de la prensa hidráulica, además de contar con las cantidades requeridas de aceites y lubricantes. Cualquier falta de mantención en la maquinaria descrita, puede inducir errores en la medición.

3.1.4.9.4. Operador

A pesar de no existir suficiente información respecto a estudios que cuantifiquen la influencia del operador en la medición de la adherencia, no se debe ignorar una posible diferenciación en los resultados debido a la implementación del ensayo por distinto personal. Cada operador, a pesar de seguir al pie de la letra la normativa establecida, puede utilizar distintas metodologías y diferentes formas de maniobrar las herramientas necesarias para realizar el ensayo. Esto abarca una serie de procedimientos desde la extracción de las muestras hasta la obtención de los valores requeridos para el estudio. Por tal razón, para evitar alteraciones de los resultados debido a este factor, en este estudio, el ensayo de corte LCB será implementado sólo por un operador.

3.1.5. Estado del arte a nivel nacional

Dentro de las investigaciones relacionadas con la adherencia entre capas asfálticas, realizadas a nivel nacional, destacan entre otras:

- Estudio de la Universidad de Chile (Álvarez C., 2007):

Este trabajo considera el análisis del nivel de adherencia de probetas doble capa, confeccionadas en laboratorio, concluyéndose que es prácticamente imposible lograr que un pavimento doble capa alcance la resistencia monolítica (se consideró como 100% de adherencia a la estructura monolítica de este estudio). El ensayo de corte LCB se realizó a una temperatura de 20°C, con una velocidad de carga de 1,27 mm/min, obteniéndose resistencias al corte de 0,66 MPa para la estructura monolítica y 0,34 MPa para interfaces sin emulsiones asfálticas. En cuanto a la dosis residual óptima, ésta alcanzó un valor de 0,16 lt/m² para CSS-1h, logrando porcentajes de adherencia entre 60 y 75% respecto a la estructura monolítica. Para la Emulsión Termoadherente, los valores de adherencia se encontraron en torno al 85%, con una dosis óptima de 0,21 lt/m². Finalmente, respecto a la influencia de agentes contaminantes, tales como polvo sobre el riego de liga quebrado y humedad sobre el riego de liga quebrado también, éstos afectan el nivel de adherencia en torno al 40 y 50% respectivamente.

- Estudio de la Universidad de Chile (Vargas P., 2007):

Esta investigación también considera las variables de influencia más importantes en el nivel de adherencia de probetas doble capa. De los resultados obtenidos, se destaca la resistencia al corte obtenida con la emulsión CSS-1h, la cual es más alta que las correspondientes a Spramul MR y CRS-2. También, cabe mencionar, que la adherencia en probetas sin riego de liga, resultó ser mayor que la de probetas con riego, demostrando que para algunas situaciones, si se puede prescindir del riego de liga.

- Estudio del CDI y la Universidad Central de Chile (Jara P., 2017):

Ya se han presentado en la descripción de estudios relacionados con la dosis aplicada de riego de liga (3.1.4.3.), los resultados de la investigación de Jara P. respecto a las dosis residuales óptimas de la Emulsión CSS-1h y Termoadherente, en ausencia de suciedad y humedad para probetas doble capa confeccionadas en laboratorio. En virtud de los resultados obtenidos, en general

las resistencias al corte de probetas doble capa con emulsión, se encuentran comprendidas entre los valores de sus pares sin emulsión y el valor de resistencia monolítica, salvo por algunas excepciones puntuales. Además de ello, se establece, que la mejor dosis residual en general se encuentra comprendida entre 100 y 250 g/m², tomando en cuenta las 5 emulsiones analizadas (CSS-1h, CSS-1h MOD, CRS-2, CRS-2 MOD y Termoadherente), considerando además que son diferentes combinaciones de estructuras asfálticas las que se estudian (IV-A-12/IV-A-12, IV-A-12/IV-12, IV-A-12(R.A.P.)/BINDER y M10/IV-A-12).

Además, se estimó que la emulsión CSS-1h MOD, entregó mejores resultados de adherencia en comparación a CRS-2, la cual se consideró como la peor emulsión. Respecto a las estructuras asfálticas utilizadas, éstas tienen una relación directa con la dosis de liga, ya que las bandas granulométricas (gruesa, semi-densa y densa) se ven reflejadas en la macrotextura de la interfaz de la capa de soporte, existiendo una diferencia notoria en la superficie específica de cada estructura. En cuanto al estudio comparativo de las resistencias de corte en igualdad de condiciones, entre probetas de 4 y 6 pulgadas, se concluyó que existe una diferencia en los valores de esfuerzo de corte producto de la geometría dada por el diámetro de las probetas, presentándose en todos los casos una superioridad en la resistencia de corte de las probetas de 4 por sobre las de 6 pulgadas. En el Gráfico 18 y el Gráfico 19 se pueden observar los valores de resistencia para estructuras compuestas de mezcla IV-A-12/BINDER con CSS-1h MOD y CRS-2, denotando una diferencia sostenida para cada dosis residual.

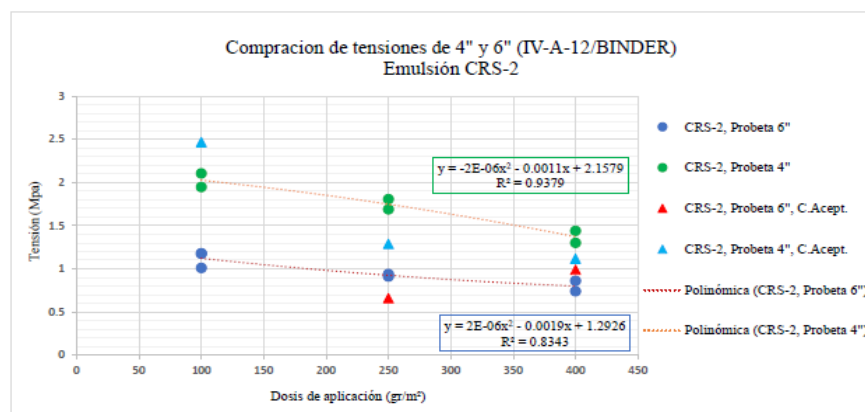


Gráfico 18: Tensiones para probetas de 4" y 6" pulgadas con CRS-2, Fuente: Memoria UCEN., Jara P. [11].

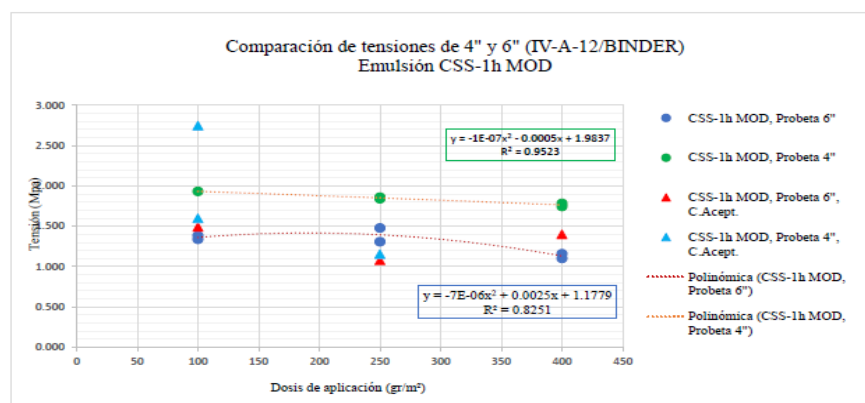


Gráfico 19: Tensiones para probetas de 4" y 6" pulgadas con CSS-1h MOD, Fuente: Memoria UCEN., Jara P. [11].

- Estudio de la Universidad Técnica Federico Santa María (Roni, 2007):

Este trabajo se centra en conceptualizar y diferenciar el mecanismo de resistencia al corte entre capas asfálticas, además de analizar la incidencia de las solicitaciones provenientes de cargas de avión en la interface de capas de la pista de aterrizaje. También como objetivos específicos, considera la investigación de los parámetros que afectan la adherencia, la definición de un criterio de aceptación e implementación del ensayo de corte LCB y la propuesta de una cantidad de riego de liga óptima para maximizar la adherencia. El mecanismo de resistencia al corte real, se ve influenciado no sólo por la adherencia dada del riego de liga, sino que también influyen la Fricción Pura, debido al roce interno por la trabazón de agregados e irregularidades de las capas de mezcla asfáltica; la Cohesión Interna por la naturaleza visco-elástica del cemento asfáltico y, la Dilatancia, fenómeno relacionado con el cambio de volumen en la interface cuando actúa el esfuerzo de corte en el plano de falla. Estos efectos se pueden caracterizar mediante modelos de superposición.

El estudio de la incidencia de cargas, considera las fuerzas límite horizontales generadas por el frenado instantáneo (con un coeficiente de roce máximo de 0,7) y las fuerzas centrípetas producidas cuando la aeronave realiza las maniobras de giro. Debido al comportamiento visco-elástico de la mezcla asfáltica, el problema se sensibiliza considerando la variabilidad del módulo de elasticidad. También se analizan las tensiones de corte cuando la profundidad de la interface se modifica. Esto se lleva a cabo, en primera instancia, con un modelo de adherencia total entre capas y, en una segunda instancia, se utiliza un criterio de resistencia para considerar la pérdida eventual de adherencia, observando cómo influye esto en las tensiones de tracción al fondo de la capa de rodadura. Del estudio, se concluye que la situación más desfavorable respecto a los esfuerzos de corte, es una interface a 5 cm de profundidad para altos valores del módulo de elasticidad de la mezcla. Por otro lado, las tensiones de corte disminuyen a 8 cm de profundidad, disminuyendo el riesgo que las capas se desprendan. Los resultados de la modelación en el programa BISAR para las cargas, indican que el caso más desfavorable corresponde al frenado instantáneo, aumentado la tracción y deformación al fondo de la capa superior, lo que se incrementa a medida que la adherencia entre capas disminuye. De acuerdo a ciertos antecedentes teóricos y a los ensayos realizados, la Tabla 1 resume y muestra cómo los factores que afectan a la resistencia al corte inciden en las componentes que aportan a ésta, según el modelo de superposición de los efectos de la adherencia:

Tabla 1: Resumen de variables y parámetros que afectan en la resistencia de corte, Fuente: Memoria UTFSM., Roni M. [13].

	Componentes que Aportan a la Resistencia al Corte			
	Riego de Liga	Cohesión Interna	Dilatancia	Fricción Pura
Cantidad de Emulsión	•			
Tipo de Emulsión	•			
Tiempo de Quiebre	•			
Temperatura	•	•		
Esfuerzo Normal			•	•
Tamaño Máximo Nominal			•	•
Tiempo de Carga		•		
Vacios de Aire en la Mezcla		•		

Como se puede observar, el riego de liga es un compuesto muy importante en el aporte de resistencia por medio de la adherencia entre capas asfálticas. Los factores que influyen a su vez en este componente son:

- El tipo de emulsión: influye en el desempeño en base a cómo responden sus diferentes características físico-químicas, dependiendo de las condiciones constructivas y climáticas.

- El tiempo de quiebre: el cual depende de la cantidad y el tipo de agente emulsionante que contiene la emulsión asfáltica.
- La cantidad de emulsión utilizada: pues se debe encontrar un óptimo en la cantidad de riego de liga, ya que una falta y un exceso de ésta, afectan el desempeño de la unión en la interface.
- La temperatura: ya que este factor influye directamente en el tiempo de quiebre de la emulsión.

La cohesión interna, producto de la naturaleza visco-elástica del asfalto, es otro componente que aporta a la resistencia al corte. Los parámetros que influyen en este componente son los siguientes:

- Temperatura: esta variable influye directamente en la viscosidad de los materiales asfálticos.
- El tiempo de carga: también afecta la cohesión interna de las mezclas asfálticas, tal como se vio anteriormente. Si el tiempo es mayor, la velocidad decrece lo que produce una mayor disminución en la tenacidad o capacidad de disipación de energía de las muestras, lo que también provoca una disminución en la resistencia al corte.
- Vacíos de aire en la mezcla: provocan una discontinuidad de transmisión de esfuerzos, afectando directamente la cohesión interna producida por el cemento asfáltico.

La Dilatancia, que se define como el efecto del cambio de volumen de la interface entre las capas asfálticas, es determinada por la relación entre el desplazamiento horizontal (eje longitudinal del testigo) y el desplazamiento vertical (dirección de la carga en el punto medio entre apoyos). Su comportamiento se ve afectado directamente por:

- Tamaño máximo nominal: el agregado de mayor tamaño ubicado en la interfaz, ya sea de una capa u otra, influye directamente como una singularidad en la zona, afectando los desplazamientos relativos entre capas asfálticas.
- Esfuerzo normal: el incremento de fuerza normal, a pesar de que no ayuda a la contribución de la Dilatancia, si aumenta la resistencia al corte. Cabe mencionar que el ensayo de corte LCB que se utiliza en este estudio, no considera la aplicación de este esfuerzo.

Finalmente, la componente de la fricción pura, la cual se debe al efecto de la trabazón mecánica de agregados pétreos en la interfaz. Los parámetros que influyen en su comportamiento son:

- Tamaño máximo nominal: los agregados de mayor tamaño son los que más aportan en la fricción pura.
- Esfuerzo normal: este factor aumenta la componente de la fricción pura, ya que toda fuerza de roce depende de la fuerza normal, lo que aumenta la resistencia al corte.

Del ensayo de corte LCB, en función de los datos de resistencia y deformación por corte de testigos extraídos en una pista de aterrizaje, se estableció un criterio de falla para caracterizar el

nivel de adherencia, según la Tabla 2, donde se estima, considerando la distribución de datos y la frecuencia acumulada, que las resistencias menores a 0,5 MPa son consideradas malas, ya que ninguno de los datos ensayados en la sección monolítica presenta una resistencia menor que ese valor. Por otro lado, valores superiores a 0,9 MPa se pueden considerar muy buenos. Para el rango intermedio no está clara la clasificación dejando abierta su discusión.

Tabla 2: Clasificación de resistencias al corte medida con equipo LCB, Fuente: Memoria UTFSM, Roni M. [13].

Rango de Resistencia [MPa]	Clasificación
Menos que 0,50	Mala
Entre 0,50 y 0,70	Regular
Entre 0,70 y 0,90	Buena
Mayor que 0,90	Muy Buena

Respecto a la búsqueda de una dosis residual óptima, se ensayaron mediante el equipo de corte LCB, con una velocidad de carga de 1,25 mm/min, doce probetas con emulsión CSS-1h en su interfaz, con un tiempo de curado mínimo de 24 horas, dejando que el riego de liga quiebre totalmente. La mezcla utilizada para ambas capas, corresponde a una granulometría específica de tres pilas de acopio (Gravilla 3/4, Integral ½ y Arena Negra), de característica semidensa, con cemento asfáltico 60-80. Según el Gráfico 20, se puede observar una buena correlación polinómica de segundo grado y un óptimo en el nivel de adherencia de 0,52 MPa con una dosis residual de 0,3 lt/m², lo que equivale aproximadamente a 300 g/m².

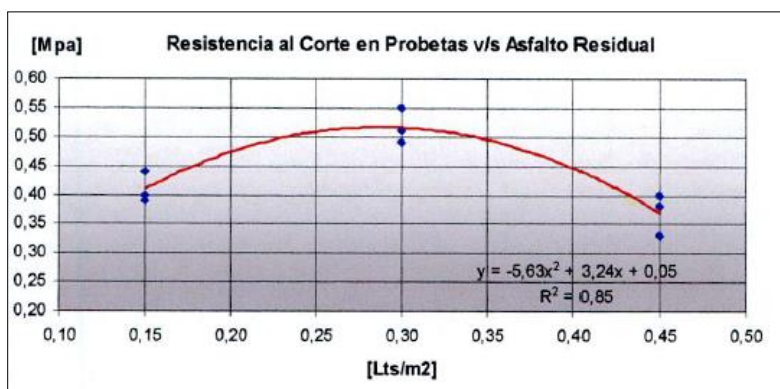


Gráfico 20: Resistencias al corte de probetas con CSS-1h para distintas dosis residuales, Fuente: Memoria UTFSM, Roni M. [13].

3.2. Marco conceptual

Con el fin de comprender de mejor forma los conocimientos y herramientas necesarias para realizar este trabajo de investigación, se detallarán los siguientes conceptos: Pavimentos asfálticos, cemento asfáltico, agregados pétreos, mezcla asfáltica, mezclas asfálticas en caliente (HMA), capas estructurales asfálticas, método Marshall, emulsiones asfálticas, emulsiones asfálticas aniónicas, emulsiones asfálticas catiónicas, emulsiones termoadherentes, riego de liga, imprimación, fresado, análisis ANOVA.

3.2.1. Pavimentos asfálticos

Los pavimentos asfálticos se componen de un sistema multicapa que permite la transmisión de las cargas de tránsito hasta el terreno natural o de fundación, sin que éste se deforme. A medida

que aumenta la profundidad, la calidad estructural de las capas va decreciendo. En un pavimento de asfalto, las capas pueden ser granulares y/o asfálticas, y su configuración junto con la cantidad de capas, dependerá de diversos factores tales como tránsito, tipo de suelo, requerimientos del mandante, disponibilidad de recursos, requerimientos técnicos, entre otros. La Ilustración 5, indica la estructuración típica de las distintas capas que componen un pavimento asfáltico.

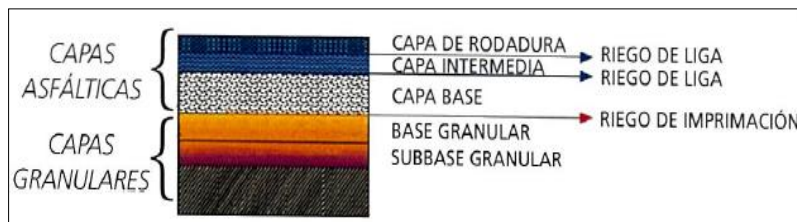


Ilustración 5: Capas de un pavimento asfáltico, Fuente: Curso Laboratorista Vial Vol. N°5.

Dentro de las funciones principales de las capas asfálticas, se considera la impermeabilización de la superficie, con el fin de impedir el ingreso de agua a las capas inferiores y asegurar la protección de la estructura ante la acción abrasiva del ambiente. También proporciona una superficie de rodadura cómoda y segura, que resista las cargas del tránsito a lo largo del tiempo.

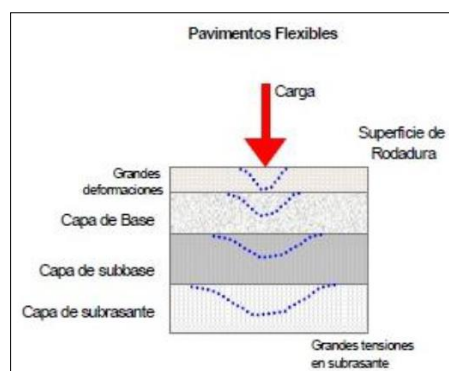


Ilustración 6: Esquema del comportamiento de pavimentos flexibles,

Fuente: <http://libropavimentos.blogspot.com/elementosdelaestructura-de-pavimento.html>.

Una de las características que destaca en los pavimentos de asfalto, es que sus capas constitutivas son sometidas a bajos valores de resistencia a la flexotracción, tal como se puede observar en la Ilustración 6, absorbiendo las solicitaciones mediante su resistencia al esfuerzo de corte, dependiendo del espesor y calidad de estas capas. Por lo general, estos pavimentos se encuentran formados por una carpeta de rodado, base, sub-base y el material de sub-rasante.

3.2.2. Cemento asfáltico (ligante asfáltico)

Los cementos o ligantes asfálticos, corresponden a un líquido viscoso o sólido oscuro obtenido a partir del proceso de destilación fraccionada del petróleo crudo, consistiendo esencialmente en hidrocarburos y sus derivados principalmente del tipo naftenos y aromáticos. Este producto, es un material ampliamente utilizado en Ingeniería Civil, por sus características visco-elásticas para la pavimentación de caminos, carreteras, autopistas, entre otros. Sus propiedades de ligante dúctil, y sus características reológicas, lo hacen el material ideal para las diferentes soluciones que se necesitan hoy en la pavimentación de todo tipo de caminos.

El transporte del cemento asfáltico desde las plantas asfálticas a las obras, se realiza generalmente en camiones estanques con aislamiento térmico y un sistema de calentamiento incorporado. En Chile, se utilizan generalmente como ligantes asfálticos el CA 24 y CA 14, según la zona y el clima del lugar donde se empleen. El número que acompaña la sigla CA corresponde a la viscosidad absoluta del ligante a 60°C. Alternativamente, si el proyecto lo especifica, se pueden utilizar cementos asfálticos modificados con polímero CA 60-80 y CA 80-100, y los ligantes asfálticos multigrado CA 40-60 y CA 60-80.

3.2.3. Agregados pétreos

Los agregados pétreos que se requieren para la confección de pavimentos asfálticos, deben ser limpios, tenaces y durables, con una granulometría pertinente. Las especificaciones generales de estos elementos deben cumplir los requisitos de: granulometría, resistencia al desgaste, solidez, limpieza, pureza, rozamiento interno que impida el desplazamiento de las partículas por carga, y propiedades superficiales que permitan una adherencia apropiada entre el ligante y el árido. Los áridos deben clasificarse y acopiarse separadamente en canchas habilitadas especialmente para este efecto, de manera que no se produzca contaminación de agentes externos ni segregación de los materiales. Éstos deben ajustarse a los siguientes requisitos:

- **Fracción Gruesa:** Corresponde a la fracción retenida en el tamiz 2,5 mm (ASTM N°8), la cual debe constituirse por partículas chancadas, tenaces, limpias de materia orgánica, arcilla y agentes extraños. La fracción gruesa debe ajustarse a los requisitos que se indican en el inciso 5.408.201.C del capítulo 5 del Manual de Carreteras.
- **Fracción Fina:** Corresponde a la fracción que pasa por el tamiz 2,5 mm (ASTM N°8), la cual debe estar constituida por agregados provenientes de la trituración de rocas o gravas, las que deben cumplir con las condiciones exigidas al árido grueso, relacionadas al Test de Desgaste de los Ángeles. Sus partículas deben ser duras, tenaces y libres de arcilla o sustancias perjudiciales. Estos áridos se emplean en la preparación de mezclas densas, semidensas, gruesas y finas, debiendo cumplir con los requisitos estipulados en el inciso 5.408.201.A del Volumen 5 del Manual de Carreteras.
- **Polvo Mineral (Filler):** Si se requiere adicionar filler de aportación, éste debe componerse por polvo mineral fino tal como cemento hidráulico, cal u otro material inerte de origen calizo, libre de materia orgánica y partículas de arcilla, debiendo ajustarse a la granulometría que se señala en el inciso 5.408.201.C del capítulo 5 del Manual de Carreteras.

Mezcla de Áridos: Los áridos combinados deben cumplir con los requerimientos de la Tabla 3. Las distintas fracciones de áridos, deben combinarse en proporciones tales que la mezcla resultante cumpla con alguna de las bandas granulométricas especificadas en el Manual de Carreteras, para el tipo de mezcla a emplear, de acuerdo con lo indicado en el Proyecto.

Tabla 3: Requisitos para áridos combinados, Fuente: Tabla 5.408.201.D, Vol. N°5 MC.

ENSAYE	TIPO DE MEZCLA ASFÁLTICA				MÉTODO
	CAPA RODADO	INTERMEDIA	BASE		
			GRUESA	ABIERTA	
Sales Solubles (máx.)	2%	3%	3%	3%	8.202.14 (LNV 8)
Equivalente de Arena (mín.)	50%	45%	40%	50%	8.202.9 (LNV 71)

3.2.4. Mezcla asfáltica

Una mezcla asfáltica se constituye por un material pétreo, convenientemente recubierto con una película de asfalto y, posteriormente, sometido a un proceso de compactación, que se realiza para que esta mezcla tenga propiedades resistentes al desgaste, producido por el tránsito vehicular y, a su vez, pueda traspasar las cargas de peso de éstos hacia abajo, absorbiendo una cantidad considerable de este tipo de sollicitaciones. Dos de los criterios más importantes, que regulan el comportamiento de las mezclas asfálticas, son la estabilidad y la durabilidad, donde el espesor de la película de asfalto juega un rol fundamental en la determinación de estos dos criterios. Mientras más delgada es la película de asfalto, menor será la estabilidad de la mezcla. A medida que el espesor de la película de asfalto aumenta, ésta tiende a cohesionar las partículas de árido, llegando a un óptimo y luego esta cohesión disminuye debido a un efecto lubricante. La cohesión entre los agregados pétreos, varía con el tiempo al perder el asfalto su capacidad de ligante debido a la oxidación, producto del ambiente exterior. Esta oxidación será menor, mientras mayor sea el espesor de la película de asfalto, ya que como consecuencia, necesitará un periodo más extenso para oxidar una mayor cantidad de asfalto. Cabe mencionar, que las capas inferiores, no están sometidas a oxidación o ésta es muy leve, por lo cual, se pueden usar películas más delgadas para recubrir los áridos, sólo viéndose comprometida la estabilidad de la mezcla.

Además se debe considerar, que la influencia del tamaño de los agregados es inversamente proporcional a la cantidad de asfalto a utilizar en una mezcla determinada. Los materiales finos presentan una mayor área específica, por tal razón, requieren una mayor superficie a recubrir con ligante. El aporte de estabilidad de una mezcla asfáltica, lo provee el agregado por medio de su fricción interna y ésta a su vez, es función del tamaño del árido y de la rugosidad de sus caras, por tanto, una mezcla con un árido más grueso con caras angulosas, tendrá mejor estabilidad que una mezcla con materiales más finos. La deficiencia de estabilidad que proporciona el árido fino, debe suplirse con un mayor aporte de estabilidad del ligante asfáltico, y éste se debe hacer mediante asfaltos más viscosos. Otros parámetros que deben considerarse en el diseño de una mezcla asfáltica, son la impermeabilidad y la trabajabilidad. La impermeabilidad en una mezcla asfáltica debe ser lo más alta posible, de manera que el agua superficial no pueda atravesar hacia las capas inferiores, evitando con ello un deterioro en la capacidad de soporte de la estructura. No obstante, una impermeabilización “perfecta” no se lleva a cabo en la realidad, pues las mezclas deben contar con un cierto porcentaje de vacíos que absorban la consolidación, producto del amasado del tránsito, y que permitan la dilatación por temperatura del cemento asfáltico en estos huecos. Si no existiesen estos vacíos, la mezcla al recomprimirse desplazaría el asfalto hacia la superficie, tornándolo resbaladizo, fenómeno que se nombra como exudación o brillo en pavimentos. Respecto a la trabajabilidad, se busca que el diseño de la mezcla permita que ésta pueda colocarse con facilidad, evitando la producción de segregaciones.

Todos estos criterios expuestos, apuntan hacia la obtención de una mezcla óptima, que sea económica y cuente con la proporción de agregados, vacíos y cemento asfáltico suficiente para que la mezcla asfáltica en su conjunto tenga un buen desempeño a futuro. El conocer la proporción correcta de cemento asfáltico es muy importante, ya que influye considerablemente en los otros factores que permiten obtener un buen pavimento. En función de esto, se han elaborado algunos métodos de diseño de mezclas asfálticas, teniendo como finalidad principal, determinar la dosis óptima de asfalto para cierta combinación determinada de agregados.

3.2.5. Mezclas asfálticas en caliente (MAC o HMA)

Las mezclas asfálticas en caliente están compuestas de un ligante asfáltico CA-24 o CA-14 tradicional o modificado, más una mezcla de agregados pétreos. Se llaman mezclas asfálticas en

caliente (MAC o en inglés, HMA=“Hot mix Asphalt”) debido a su proceso de fabricación, el cual implica calentar el agregado pétreo y el ligante a altas temperaturas. Según las especificaciones del Manual de Carreteras, la temperatura media de los áridos al salir del secador deberá estar comprendida entre los 150°C y 175°C; y entre 100°C y 120°C en el caso de mezclas con graduación abierta. En cuanto a la temperatura de compactación, ésta debe estar situada entre los 110°C y 140°C y en caso de mezclas abiertas o de espesor bajo los 5 cm., se podrá compactar a temperaturas menores que 110°C.

3.2.6. Capas estructurales asfálticas

Las capas asfálticas estructurales, son aquellas que, por condiciones de mezcla y espesor, forman una estructura computable en el diseño del espesor de un pavimento flexible. Estas capas y, por consiguiente, las mezclas asfálticas que las componen, se pueden clasificar de acuerdo a los siguientes parámetros:

a. Según la posición relativa de la estructura del pavimento: Se distinguen tres capas generalmente.

- **Carpeta de Rodado:** formada por una mezcla asfáltica que debe resistir la abrasión y desintegración por efectos ambientales y de tránsito. La superficie debe quedar apta para que exista cierta fricción entre ésta y las ruedas de los neumáticos (microtextura) y permitir el drenaje del agua (macrotextura). También se entiende como carpeta asfáltica, a la mezcla que cumple con las especificaciones del volumen N°5 del Manual de Carreteras, que se refiere más bien a un tipo de banda granulométrica y a ciertas condiciones, como el porcentaje de vacíos en la mezcla.
- **Capa Intermedia:** formada por una mezcla asfáltica colocada sobre la base asfáltica. Recibe a la carpeta de rodado.
- **Base Asfáltica:** formada por una mezcla asfáltica, generalmente colocada sobre la base granular o subrasante, a la cual se le superpone la capa intermedia y/o la capa de rodado.

b. Según la granulometría, las mezclas asfálticas pueden clasificarse como:

Tabla 4: Clasificación de mezclas asfálticas según granulometría, Fuente: Curso de Laboratorista Vial, Vol. N°5.

Tipo de mezcla según granulometría	% que pasa tamiz N°8
Mezclas de graduación fina	>50
Mezclas de graduación densa	35-50
Mezclas de graduación semidensa	28-42
Mezclas de graduación gruesa	20-35
Mezclas de graduación abierta	5-20

c. Según el porcentaje de vacíos en la mezcla:

Tabla 5: Clasificación de mezclas asfálticas según porcentaje de vacíos, Fuente: Curso de Laboratorista Vial, Vol. N°5.

Tipo de mezcla según % vacíos	Rangos % de vacíos	Características
Mezclas abiertas	vacíos > 15%	Escasa cantidad de finos, bajo óptimo de asfalto. Usadas como bases o capas intermedias. Deben cubrirse con una capa densa. Alto contenido de vacíos.
Mezclas semi-abiertas	vacíos 10 - 15%	

Mezclas gruesas	vacíos 7 - 10%	Utilizadas como base o capa intermedia. Se debe cubrir con capa semi densa.
Mezclas semidensas	vacíos 4 - 6%	Formadas con agregado bien graduado con cierta cantidad de finos. Mezcla estable. Bajo contenido de vacíos.
Mezclas cerradas	vacíos < 4%	

d. Según la temperatura de confección de la mezcla asfáltica:

- **Mezclas asfálticas en caliente**
- **Mezclas asfálticas en Frío**

e. Según el método constructivo: De acuerdo al lugar de confección, las mezclas asfálticas pueden clasificarse en dos grupos.

- **Mezclas in situ**
- **Mezclas en Planta**

3.2.7. Método Marshall

El Método Marshall, formulado por Bruce Marshall junto al Departamento de Carreteras del estado de Mississippi en Estados Unidos (1943), es una metodología de diseño de mezcla asfáltica que tiene como fin, determinar el contenido de asfalto óptimo para una cierta combinación de agregados pétreos. Éste es aplicable sólo a mezclas en caliente, con cementos asfálticos que contengan agregados con tamaño máximo igual o inferior a 25 mm. El método puede usarse tanto para el diseño en laboratorio como en el control en terreno, y ha sido normalizado por la ASTM y la AASHTO, donde se especifica en el inciso 8.302.4 y 8.302.47 del volumen 8 del Manual de Carreteras.

3.2.8. Emulsiones asfálticas

Una emulsión asfáltica es un compuesto heterogéneo de dos fases, generalmente inmiscibles entre sí. Estas dos fases corresponden al asfalto y agua, las cuales se pueden observar en la Ilustración 7. Para mantener de forma estable la emulsión, se debe incorporar una cantidad pequeña de agente emulsificante, normalmente de base jabonosa o solución alcalina, el cual mantiene unido el sistema de la fase continua que corresponde al agua, con la fase discontinua constituida por glóbulos de asfalto muy pequeños en suspensión, de un tamaño comprendido entre 1 y 10 micrones. Los agentes emulsionantes o emulsificantes, rodean los glóbulos de asfalto formando una película protectora, estableciéndoles una polaridad determinada en la superficie, haciendo que éstos se repelan, estabilizando la emulsión.

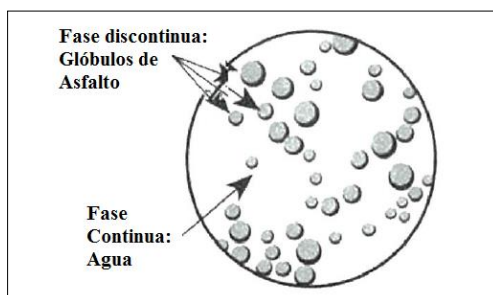


Ilustración 7: Sistema de fases agua, asfalto y agente emulsificante, Fuente: Curso Laboratorista Vial Vol. N°4.

Los agentes emulsificantes son compuestos químicos tensoactivos, que permiten modificar la tensión interfacial agua-cemento asfáltico. Se sitúan en la interface de ambos, y evitan la coalescencia de los glóbulos de cemento asfáltico en la emulsión. Los agentes tensoactivos se caracterizan por poseer dos partes diferenciadas en su molécula, una parte grasa, lipófila o apolar con gran afinidad por el cemento asfáltico, y otra parte hidrófila o polar, que presenta gran afinidad por el agua. Esta doble característica, permite situarse en la interface cemento asfáltico-agua con la parte apolar integrada al cemento asfáltico y la parte polar en el agua. Para las emulsiones asfálticas, se le llama “Tiempo de Quiebre” al desequilibrio eléctrico ocurrido en cierto instante, que rompe la emulsión, llevando las partículas de asfalto a unirse a la superficie de agregado de otro sistema, cuando el agua fluye o se evapora, separándose del agregado recubierto de asfalto. Existen agentes emulsificadores que permiten que esta rotura o “quiebre” sea instantánea y otros más poderosos que retardan este proceso. En este proceso químico, a consecuencia de que la emulsión va eliminando agua, ocurre una fase inversa, en la cual el asfalto se comporta como una fase continua y el agua como una fase discreta, en forma de gotas de agua en el interior del asfalto, las que son eliminadas posteriormente en el quiebre.

El tiempo de quiebre y la viscosidad de las emulsiones, dependen de otros factores tales como la composición química, la cantidad y calidad de los agentes emulsificantes. Generalmente, el color de la emulsión asfáltica antes del quiebre es de color café y después del quiebre es de color negro, característica auxiliar para la inspección visual y verificación rápida de un buen estado del producto. El tiempo de curado, corresponde al periodo comprendido entre la aplicación de la emulsión asfáltica sobre alguna superficie y el tiempo en que ésta quiebra. Actualmente, la utilización de emulsiones asfálticas, tiene ventajas por sobre otros productos, puesto que se emplean a temperatura ambiente, pueden utilizarse sobre agregados húmedos y no emiten agentes contaminantes tóxicos al ambiente como lo hacen los asfaltos cortados. Las emulsiones asfálticas, se clasifican según el tipo de carga y del tiempo de quiebre de la emulsión. Como se sabe, existen áridos de polaridad positiva y negativa; por tal motivo, para proporcionar una buena adherencia, es necesario que la emulsión tenga afinidad eléctrica con el árido. La siguiente figura (Ilustración 8), representa el quiebre de una emulsión, donde el agua se separa del asfalto al entrar en contacto con los áridos (en esta primera etapa ocurre evaporación y drenaje de agua) y el curado de la emulsión, que considera el proceso necesario hasta que el sistema asfalto-árido está apto para su uso.

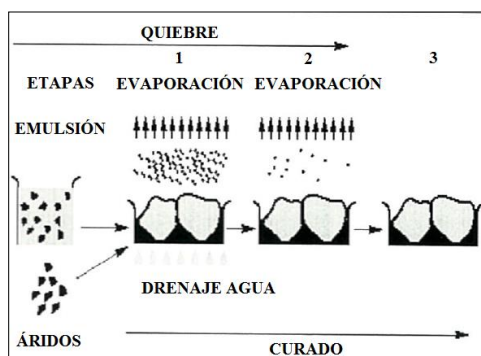


Ilustración 8: Representación del proceso de quiebre en una emulsión asfáltica, Fuente: Curso Laboratorista Vial Vol. N°4.

Las emulsiones asfálticas se clasifican en dos grandes grupos, de acuerdo a su carga eléctrica, la cual depende del tipo de agente emulsificante:

- Emulsiones Asfálticas Catiónicas, las cuales son de carga positiva y afines con áridos de carga negativa, como lo son los de origen cuarzoso y silíceo, que son los que más abundan en Chile.

- Emulsiones Asfálticas Aniónicas, que son las de carga negativa y afines con áridos de carga positiva como lo son los de origen calizo.

3.2.8.1. Emulsiones asfálticas catiónicas

Son emulsiones caracterizadas por su carga positiva, la cual tiene una notoria afinidad con áridos de carga negativa. Los agentes emulsificantes que se utilizan para fabricar emulsiones asfálticas catiónicas, son normalmente sales de amonio cuaternario, en donde los radicales R1, R2, R3 y R4 se sumergen dentro de los glóbulos de asfalto y el nitrógeno N^+ queda en la fase acuosa, donde se disocian los iones Cl^- , el cual corresponde a uno de los muchos iones que se pueden utilizar en la práctica. En la siguiente figura (Ilustración 9), se puede observar un esquema de un agente emulsificante compuesto por los radicales, los iones de nitrógeno, cloro para este caso, y los radicales positivos que cubren totalmente el glóbulo de asfalto:

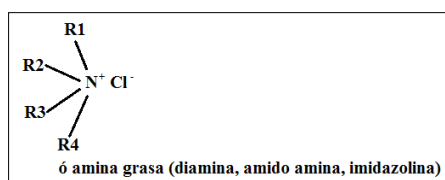


Ilustración 9: Agentes emulsificantes radicales en emulsiones catiónicas, Fuente: Curso Laboratorista Vial Vol. N°4.

Las emulsiones catiónicas tienen especial afinidad por superficies compuestas por áridos silicios, los cuales son más frecuentes en el país, por ende, este tipo de emulsiones son las más utilizadas en Chile. Éstas deben cumplir con las Especificaciones Técnicas descritas en el inciso 8.301, Acápites 8.301.4 y 8.301.5 del Volumen 8 del Manual de Carreteras.

Dependiendo de la velocidad del tiempo de quiebre, se clasifican en emulsiones de quiebre rápido, quiebre medio y quiebre lento. De acuerdo a esto se utilizan las siguientes nomenclaturas:

- Emulsiones Catiónicas de Quiebre Rápido (Cationic rapid setting): CRS-1, CRS-2
- Emulsiones Catiónicas de Quiebre Medio (Cationic medium setting): CMS-1, CMS-2, CMS-2h
- Emulsiones Catiónicas de Quiebre Lento (Cationic slow setting): CSS-1, CSS-1h

El número 1 o 2 se refiere al grado de viscosidad de la emulsión. Si el residuo asfáltico de las emulsiones de quiebre medio tiene una penetración comprendida entre 40-90 dmm., se le agrega la letra “h” (CSS-1h, CMS-2h). En la Tabla 6, se indican las especificaciones que deben cumplir las emulsiones asfálticas catiónicas:

Tabla 6: Especificaciones para emulsiones asfálticas catiónicas, Fuente: Tabla 8.301.5.A Vol. N°8 MC.

Tipo Grado	Quiebre Rápido				Quiebre Medio				Quiebre Lento			
	CRS-1		CRS-2		CMS-1		CMS-2h		CSS-1		CSS-1h	
	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx
	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Ensayes a la emulsión												
Viscosidad, Saybolt Furol a 25°C, SFs.									20	100	20	100
Viscosidad, Saybolt Furol a 50°C, SFs.	20	100	100	400	50	450	50	450				
Ensaye de estabilidad en almacenamiento 24h, %	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1

Demulsibilidad, 35 ml, 0,8% dioctilsulfosuccinato de sodio, %	40	-	40	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ensaye de carga de partícula	Positiva en todos los casos											
Ensaye de tamizado, % (1)	-	0,1	-	0,1	-	0,1	-	0,1	-	0,1	-	0,1
Ensaye de mezcla con cemento, %	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	-	2
Destilación:												
Aceite destilado por volumen de emulsión, %	-	3	-	3	-	12	-	12	-	-	-	-
Residuo, %	60	-	65	-	65	-	65	-	57	-	57	-
Ensayes al residuo de la destilación:												
Penetración a 25°C, 100g, 5 s, 0,1 mm	100	250	100	250	100	250	40	90	100	250	40	90
Ductilidad a 25°C, 5 cm/min, cm	40	-	40	-	40	-	40	-	40	-	40	-
Solubilidad en Tricloroetileno, %	97,5	-	97,5	-	97,5	-	97,5	-	97,5	-	97,5	-
Ensaye de la Mancha:												
Heptano/Xilol, % Xilol		30		30		30		30		30		30

3.2.8.2. Emulsiones asfálticas aniónicas

Estas emulsiones se caracterizan por su carga negativa, la cual tiene una gran afinidad con elementos de carga positiva. Los agentes emulsionantes que se utilizan generalmente, son los oleatos de sodio o potasio del tipo $R-COO^-Na^+$ (ácidos grasos). En este caso, el radical R queda sumergido dentro de los glóbulos de cemento asfáltico y el grupo COO^- queda en la fase acuosa, donde se disocia con cationes Na^+ . Las moléculas del agente emulsificante cubren totalmente el glóbulo de asfalto, creando una especie de tapiz de radicales negativo, actuando como si el sistema estuviese cargado negativamente. Esta cubierta cargada, impide un contacto directo con los distintos glóbulos de asfalto, por lo que tienden a repelerse, manteniendo estable la emulsión. Debido a este comportamiento, los glóbulos de cemento asfáltico de las emulsiones aniónicas tienen especial afinidad por superficies iónicamente positivas, tales como las calizas ($CaCO_3$), dolomitas y basaltos. Al igual que las emulsiones catiónicas, las emulsiones aniónicas se clasifican dependiendo de la proporción y el tipo de agentes emulsificantes utilizados, los que determinan su velocidad en el tiempo de quiebre. Para ello, se utilizan las siguientes nomenclaturas:

- Emulsiones Aniónicas de Quiebre Rápido: RS-1, RS-2
- Emulsiones Aniónicas de Quiebre Medio: MS-1, MS-2, MS-2h
- Emulsiones Aniónicas de Quiebre Lento: SS-1, SS-1h

El número 1 o 2 se refiere al grado de viscosidad de la emulsión. Si el residuo asfáltico de las emulsiones de quiebre medio tiene una penetración comprendida entre 40-90 dmm., se le agrega la letra “h” (SS-1h, MS-2h). En la Tabla 7, se indican las especificaciones que deben cumplir las emulsiones asfálticas aniónicas:

Tabla 7: Especificaciones para emulsiones asfálticas aniónicas, Fuente: Tabla 8.301.4.A Vol. N°8 MC.

Tipo Grado	Quiebre Rápido				Quiebre Medio				Quiebre Lento			
	RS-1		RS-2		MS-1		MS-2h		SS-1		SS-1h	
	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx
Ensayes a la emulsión												
Viscosidad, Saybolt Furol a 25°C, SFs.	20	100	-	-	20	100	100	-	20	100	20	100

Viscosidad, Saybolt Furol a 50°C, SFs.	-	-	75	400	-	-	-	-	-	-	-	-
Ensaye de estabilidad en almacenamiento 24h, %	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1
Demulsibilidad, 35 ml. 0,02N CaCl_2 , %	60	-	60	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ensaye de carga de partícula	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ensaye de tamizado, % (1)	-	0,1	-	0,1	-	0,1	-	0,1	-	2	-	2
Ensaye de mezcla con cemento, %	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,1	-	0,1
Destilación:												
Aceite destilado por volumen de emulsión, %	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Residuo, %	55	-	63	-	55	-	65	-	57	-	57	-
Ensayes al residuo de la destilación:												
Penetración a 25°C, 100g, 5 s, 0,1 mm	100	200	100	200	100	200	40	90	100	200	40	90
Ductilidad a 25°C, 5 cm/min, cm	40	-	40	-	40	-	40	-	40	-	40	-
Solubilidad en Tricloroetileno, %	97,5	-	97,5	-	97,5	-	97,5	-	97,5	-	97,5	-
Ensaye de Flotación a 60°C, s	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ensaye de la Mancha:												
Heptano/Xilol, % Xilol	-	30	-	30	-	30	-	30	-	30	-	30

3.2.8.3. Emulsiones termoadherentes

Las Emulsiones Termoadherentes, son emulsiones de rotura rápida, diseñadas para proporcionar una excelente adherencia entre las capas asfálticas en el proceso de colocación de la mezcla en caliente que conforma la capa superior pero que a su vez, presentan una pegajosidad mínima frente al paso de los neumáticos de vehículos de construcción. Con esto, se evita el desprendimiento del residuo asfáltico producto del tránsito de obra. La razón principal de este comportamiento, radica en un modelo de adhesión que indica que la pegajosidad es inversamente proporcional al módulo del adhesivo, por este motivo, los riegos con materiales Termoadherentes a temperaturas normales de servicio, tienen un alto módulo, pero al aumentar las temperaturas producto de la colocación de la capa de MAC, el módulo se reduce bruscamente y la adhesividad se maximiza. La puesta en obra, se realiza entre 50°C y 70°C, con un tiempo de rotura entre 5 y 10 minutos para condiciones idóneas (altas temperaturas, viento, baja humedad y sol) y 60 minutos para condiciones desfavorables. Respecto a su uso, es muy importante que la cisterna de riego cuente con inyectoros limpios en buen estado, evitando la obstrucción de material sedimentado.

3.2.9. Riego de liga

Corresponde a un riego de emulsión asfáltica sobre una superficie pavimentada en instantes previos o de cierta antigüedad, con el objetivo de proveer adherencia entre la capa de esa superficie y la capa asfáltica que la cubrirá, de forma que esta unión produzca que las dos estructuras tiendan a ser un sistema monolítico. En los riegos de liga, se deben emplear emulsiones asfálticas, preferentemente de quiebre lento, tradicional o modificada con polímero. Entre capas de mezcla asfáltica en caliente, las emulsiones asfálticas tradicionales o modificadas con polímero, deben aplicarse sin diluir. En caso de colocarse sellos sobre un pavimento existente, debe diluirse en una proporción dependiendo de la textura, porosidad y grado de oxidación de la superficie existente. De acuerdo a las especificaciones actuales del Manual de Carreteras, la dosis está comprendida entre 0,4 a 1,0 kg/m² de superficie. La dosis definitiva a aplicar, debe ser determinada en terreno mediante sectores de prueba. Además, no puede aplicarse el riego de liga cuando el tiempo se encuentre neblinoso, con lluvia o la temperatura sea inferior a los 10 °C. La temperatura de

aplicación fluctúa generalmente entre 65 y 75°C. En la Ilustración 10, se puede observar al camión imprimante aplicando el riego de liga a una superficie asfáltica.

En la actualidad y, en general, tanto en Chile como en el extranjero, las normas indican que la aplicación del riego de liga con emulsiones asfálticas, se debe realizar con camiones imprimantes que cuenten con un dispositivo previamente calibrado, a fin de que las boquillas distribuyan la emulsión de forma correcta. También es muy importante la instrucción del chofer del camión, quien debe maniobrar la máquina a una velocidad constante y apropiada para colocar la dosis deseada. La altura de los rociadores también es importante, pues de ello depende la proporción de emulsión aplicada, según una superposición doble o preferentemente triple, necesarias para conseguir una uniformidad en la aplicación, como se puede observar en la Ilustración 11. Este traslape también ayuda a mantener la cobertura si cualquiera de las boquillas se compromete durante la aplicación.



Ilustración 10: Aplicación de riego de liga con camión imprimante.

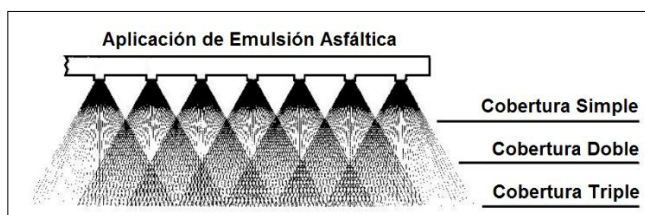


Ilustración 11: Dispositivo de aplicación de emulsión asfáltica mediante superposición de cobertura simple, doble y triple.

3.2.10. Imprimación

La imprimación consiste en un riego de asfalto líquido de baja viscosidad, sobre una base granular, la que posteriormente será cubierta por una carpeta o cualquier tratamiento asfáltico. Dentro de sus funciones principales, está el sellar la superficie, evitando la intromisión de humedad, cohesionar las partículas superficiales sueltas de la base granular y dar una mayor estabilidad superficial para obtener una membrana ligante que provea una fuerte adherencia entre la capa superior y la base granular. Este riego se puede aplicar a bases granulares húmedas o secas. La emulsión imprimante penetra en la base granular, permitiendo una buena adherencia con la capa superior. La cantidad exigida a utilizar varía, según las especificaciones, entre 0,8 y 1,2 lt/m², dependiendo de la textura de la base y teniendo como criterio mínimo, que la imprimación debe penetrar al menos 5 mm para asfaltos cortados y 3 mm para emulsiones asfálticas (absorción y secado de 6 a 12 h. para ambientes calurosos, 12 a 24 h., para ambientes frescos y 24 a 48 para ambientes fríos). La dosis debe ajustarse, en forma tal de obtener un residuo asfáltico en terreno de al menos 35%. Para corroborar esto, se deben construir canchas de prueba que verifiquen la dosis necesaria para la penetración requerida. La emulsión imprimante, deberá cumplir con los requisitos señalados en la tabla 5.401.201.A del MC-V5. Respecto a las condiciones climáticas, la

imprimación puede ejecutarse cuando no esté neblinoso ni lluvioso y las temperaturas ambiente y de la base sean de al menos 10°C.

3.2.11. Fresado

El fresado es una técnica usada para la rehabilitación de pavimentos dañados, desgastados o envejecidos. Consiste en cortar en frío y con agua, un determinado espesor de la superficie del pavimento, retirando posteriormente y de forma controlada, las capas dañadas de la estructura, dejando los espesores de pavimento inferiores que se encuentran en buenas condiciones estructurales. El material es retirado de la obra y almacenado para ser reutilizado como RAP (asfalto reciclado) en mezclas asfálticas en caliente o en frío.

3.2.12. Análisis ANOVA

El Análisis ANOVA, es conocido por las siglas inglesas (ANAlisys Of VAriance), especialmente por la difusión de programas de ordenador. Fue desarrollado en 1930 por R.A. Fisher, cuando trabajaba en una estación de investigación agraria. Corresponde a un método estadístico utilizado para determinar si diversos conjuntos de muestras aleatorias, de una determinada variable, proceden de la misma población o de poblaciones distintas. La idea básica, consiste en determinar la influencia de ciertos factores en una *variable de respuesta*. Se denomina *factor*, al parámetro cuya influencia se quiere corroborar, introduciéndose de manera discreta, independientemente que sea de naturaleza continua. Un factor puede ser *cualitativo* o *cuantitativo*, dependiendo si se asocia o no, una cantidad numérica a su característica. Considerando al factor descrito, se utilizan de forma equivalente los términos de *grupo* o *nivel* para referirse a una característica concreta, que es un subconjunto de cada factor propiamente tal. Los *tratamientos posibles* corresponden a todas las combinaciones que consideran simultáneamente o no, uno de los niveles para cada factor. La *muestra*, asociada a cada tratamiento, se conforma por la cantidad de elementos analizados que representarán la *población* de cada tratamiento o combinación. Finalmente los *datos*, corresponden a todas las muestras de cada tratamiento, los cuales serán sometidos al análisis ANOVA. El análisis de la varianza, es un caso de aplicación de un contraste de hipótesis a un modelo lineal específico, requiriéndose la formulación de una hipótesis nula y otra alternativa, mediante la construcción de un estadístico a partir de los datos muestrales, con una distribución conocida y el establecimiento de una región de aceptación y otra de rechazo.

3.2.13. ANOVA con varios factores

MODELO E HIPÓTESIS: Para describir teóricamente el modelo del análisis de varianza para varios factores, a modo de ejemplo, se considerarán sólo dos de éstos:

$$Y_{gi} = \mu + \alpha_g + \beta_j + (\alpha\beta)_{gj} + \varepsilon_{gj} \quad g = 1, 2, \dots, G \quad j = 1, 2, \dots, J$$

Donde,

Y_{gi} : Valor de la variable de respuesta del grupo g la muestra i .

μ : Media global.

α_g : Efecto del nivel g del factor A.

β_j : Efecto del nivel j del factor B.

$(\alpha\beta)_{gj}$: Efecto de interacción de los niveles (grupos) g y j correspondientes a los factores A y B respectivamente. Teniendo en cuenta que $(\alpha\beta)$ es una notación usual para referirse al término de interacción, no a un producto de parámetros.

ε_{gj} : Efecto del error inducido por variables externas no controladas.

En este modelo μ representa la media global, mientras que α_g , β_g y $(\alpha\beta)_{gj}$ miden efectos diferenciales. Por esta razón, estos últimos parámetros están sujetos a la restricción:

$$\sum_{g=1}^G \alpha_g = \sum_{j=1}^J \beta_g = \sum_{g=1}^G \sum_{j=1}^J (\alpha\beta)_{gj} = 0$$

HIPÓTESIS SOBRE LA POBLACIÓN: Para especificar un modelo, se requiere establecer una hipótesis acerca de los elementos que aparecen en el mismo. Las hipótesis estadísticas que se adoptan se refieren a la población y, en consecuencia, al proceso de obtención de muestra.

Hipótesis estadísticas sobre la población: $Y_g \sim N(\mu_g, \sigma^2)$

- *Hipótesis de Homocedasticidad:* Las varianzas σ^2 de todas las poblaciones son idénticas.
- Cada una de las poblaciones tiene una distribución normal.

De $Y_g \sim N(\mu_g, \sigma^2)$, se desprende que la variable aleatoria $\varepsilon_g \sim N(\mu_g, \sigma^2)$

HIPÓTESIS SOBRE LA OBTENCIÓN DE LA MUESTRA: Las hipótesis sobre el proceso de obtención de la muestra facilita la realización del proceso de inferencia a partir de la información disponible.

- Se supone que se ha obtenido una muestra aleatoria independiente de cada una de las G poblaciones. En el análisis de la varianza de varios factores, se mantienen las hipótesis de poblaciones con distribución normal e igual varianza para cada combinación de niveles de los dos factores:
- Hipótesis nula e hipótesis alternativa sobre los factores: $\begin{cases} H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_G \\ H_1: \text{No todas } \mu_g \text{ son iguales.} \end{cases}$
- Hipótesis nula e hipótesis alternativa sobre la interacción entre factores:

$$\begin{cases} H_0: (\alpha\beta)_{gj} = 0 & g = 1, 2, \dots, G & j = 1, 2, \dots, J \\ H_1: \text{No todas } (\alpha\beta)_{gj} \text{ son nulas} \end{cases}$$

DESCOMPOSICIÓN DE LA VARIANZA

En cada población se pueden extraer muestras de distintos tamaños. En esta línea, n_g será el tamaño de la muestra de grupo g . El tamaño de la muestra total es N , que es igual a la suma de los tamaños de las muestras de cada uno de los grupos: $n_1 + n_2 + \dots + n_G = N$

La *media muestral global* se obtiene sumando todos los valores de la muestra y dividiendo por el tamaño de la muestra total:

$$\bar{Y} = \frac{\sum_{g=1}^G \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{n_{gj}} Y_{gji}}{N}$$

Dentro de cada grupo, se puede obtener la correspondiente media muestral. En este sentido, la media del grupo g, j estará dada por:

$$\bar{Y}_{gj} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{gj}} Y_{gji}}{n_{gj}}$$

Donde $\bar{Y}_{gj}$ es un estimador insesgado de μ_{gj} , es decir: $E[\bar{Y}_{gj}] = \mu_{gj}$

La desviación de cada observación con respecto a la media global es $(Y_{gji} - \bar{Y})$, la cual, puede descomponerse de la forma:

$$(Y_{gji} - \bar{Y}) = (\bar{Y}_{gj} - \bar{Y}) + (Y_{gji} - \bar{Y}_{gj})$$

Donde:

$(Y_{gji} - \bar{Y}_{gj})$ Corresponde a la desviación de cada observación.

$(\bar{Y}_{gj} - \bar{Y})$ Corresponde a la desviación inducida por el factor.

$(Y_{gji} - \bar{Y}_{gj})$ Corresponde a la desviación residual.

Antes de realizar la descomposición de la varianza, se construye una tabla de doble entrada que recoge la muestra disponible para cada combinación de los factores A y B. En las filas se indican los distintos niveles del factor A, y en las columnas los distintos niveles del factor B.

Tabla 8: Número de muestras para cada combinación de niveles del ANOVA.

Niveles del factor A	Nivel del factor B				Marginal A
	1	2	...	J	
1	n_{11}	n_{12}	...	n_{1J}	$n_{1.}$
2	n_{21}	n_{22}	...	n_{2J}	$n_{2.}$
...	...	...	...	...	...
G	n_{G1}	n_{G2}	...	n_{GJ}	$n_{G.}$
Marginal B	$n_{.1}$	$n_{.2}$	...	$n_{.J}$	N

El cuadro con las medias muestrales para cada combinación de los factores A y B:

Tabla 9: Valores de las muestras para cada combinación de niveles del ANOVA.

Niveles del factor A	Nivel del factor B				Marginal A
	1	2	...	J	
1	$\bar{Y}_{11}$	$\bar{Y}_{12}$	...	$\bar{Y}_{1J}$	$\bar{Y}_{1.}$
2	$\bar{Y}_{21}$	$\bar{Y}_{22}$	...	$\bar{Y}_{2J}$	$\bar{Y}_{2.}$
...	...	...	...	...	...
G	$\bar{Y}_{G1}$	$\bar{Y}_{G2}$	...	$\bar{Y}_{GJ}$	$\bar{Y}_{G.}$
Marginal B	$\bar{Y}_{.1}$	$\bar{Y}_{.2}$	...	$\bar{Y}_{.J}$	$\bar{Y}$

Considerando todas las celdas (excepto las marginales), se pueden calcular las siguientes expresiones:

Suma de cuadrados total (SCT): Refleja la suma de cuadrados total con respecto a la media muestral global. En la sumatoria triple, el primer término, se refiere a los distintos niveles del factor A, el segundo, a los distintos niveles del factor B, y el tercero a los datos de cada celda.

$$SCT = \sum_{g=1}^G \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{n_{gj}} (Y_{gji} - \bar{Y})^2$$

Suma de cuadrados de los factores (SCF): Registra las diferencias al cuadrado entre la media de cada celda y la media global. Esta expresión a su vez, se puede descomponer en tres nuevas expresiones:

$$SCF = \sum_{g=1}^G \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{n_{gj}} (\bar{Y}_{gji} - \bar{Y})^2 = \sum_{g=1}^G \sum_{j=1}^J n_{gj} (Y_{gj} - \bar{Y})^2$$

$$SCF = SCF_A + SCF_B + SCF_{AB}$$

$$SCF_A = \sum_{g=1}^G \sum_{j=1}^J n_{gj} (\bar{Y}_g - \bar{Y})^2, \quad SCF_B = \sum_{g=1}^G \sum_{j=1}^J n_{gj} (\bar{Y}_j - \bar{Y})^2$$

$$SCF_{AB} = \sum_{g=1}^G \sum_{j=1}^J n_{gj} (\bar{Y}_{gj} - \bar{Y}_g - \bar{Y}_j + \bar{Y})^2$$

Los términos SCF_A y SCF_B son las sumas de cuadrados de los factores A y B respectivamente. El último término, con una configuración menos clara, refleja la interacción entre los factores A y B.

Suma de cuadrados residual (SCR): Corresponde a la suma de cuadrados asociado al error experimental o a la incerteza de mantener realmente constantes otros parámetros de influencia en la variable de respuesta.

$$SCR = \sum_{g=1}^G \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{n_{gj}} (Y_{gji} - \bar{Y}_{gji})^2$$

Finalmente, para el análisis de varianza, la suma de cuadrados totales queda expresada de la siguiente manera:

$$SCT = SCF_A + SCF_B + SCF_{AB} + SCR$$

GRADOS DE LIBERTAD Y CONSTRUCCIÓN DEL ESTADÍSTICO F

- Los grados de libertad de SCT son igual al número total de datos menos 1, es decir, (N-1).
- Los grados de libertad de SCF_A son igual al número total de grupos menos 1, es decir, (G-1).
- Los grados de libertad de SCF_B son igual al número total de grupos menos 1, es decir, (J-1).
- El número total de combinaciones de niveles de los factores A y B es igual a GJ. Ahora bien, una vez calculadas las medias marginales por filas y columnas, los grados de libertad de SCF_{AB} se reducen a (G-1) (J-1).
- Los grados de libertad de SCR son igual al número total de datos, menos el número total de celdas, es decir, (N-GJ).

Los grados de libertad de la SCT son igual a la suma de los grados de libertad de cada uno de los componentes, es decir:

$$gl(SCT) = gl(SCF_A) + gl(SCF_B) + gl(SCF_{AB}) + gl(SCR)$$

Con las fórmulas expuestas, se confecciona una tabla de valores ANOVA (Tabla 10), con el fin de estimar el estadístico F, con el cual se podrá aceptar o rechazar la hipótesis alusiva a la influencia de cada factor en la variable de respuesta.

Tabla 10: Tabla de valores ANOVA, Fuente: Apunte Estadística Teórica UAM.

Fuente variación	Suma de cuadrados	Grados libertad	Media cuadrática	Estadístico F
Factor A	SCF_A	$(G - 1)$	$MCF_A = \frac{SCF_A}{G - 1}$	$F = \frac{MCF_A}{MCR}$
Factor B	SCF_B	$(J - 1)$	$MCF_B = \frac{SCF_B}{J - 1}$	$F = \frac{MCF_B}{MCR}$
Interacción	SCF_{AB}	$(G - 1)(J - 1)$	$MCF_{AB} = \frac{SCF_{AB}}{(G - 1)(J - 1)}$	$F = \frac{MCF_{AB}}{MCR}$
Residual	SCR	$N - GJ$	$MCR = \frac{SCR}{N - GJ}$	
Total	SCT	$N - 1$	$MCT = \frac{SCT}{N - 1}$	

REGLA DE DECISIÓN: $\begin{cases} \text{No se rechaza } H_0 \text{ si } F_{(G-1),(n-G)} = \frac{MCF}{MCR} < F_{\alpha,(G-1),(n-G)} \\ \text{Se rechaza } H_0 \text{ si } F_{(G-1),(n-G)} = \frac{MCF}{MCR} > F_{\alpha,(G-1),(n-G)} \end{cases}$

El valor de α indica la probabilidad de rechazar la hipótesis nula cuando es cierta. Si ésta se rechaza con la evidencia de la información muestral, se dice que ese rechazo implica una conclusión *fuerte*. Sin embargo, la aceptación de una hipótesis nula es una conclusión *débil*, ya que se desconoce cuál es la probabilidad de no rechazarla cuando si se debiese rechazar. Por este motivo, en vez de aceptar la hipótesis nula, es más correcto no rechazarla.

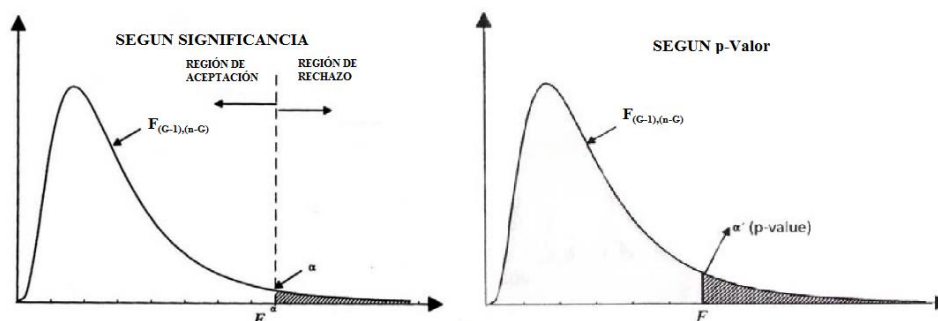


Ilustración 12: Regiones de aceptación y rechazo de hipótesis según significancia (izq.) y según p-valor (der.).

Los programas informáticos suelen ofrecer, junto al estadístico aplicado, *el nivel de significación crítico*, al que se denomina α' , asociado a dicho estadístico. Para designar a este valor, en algunos programas se utilizan las expresiones “*p-valor*” o “*significatividad*”. Este valor es un indicador del nivel de admisibilidad de la hipótesis nula, cuanto mayor sea el nivel de significación crítico, mayor confianza se puede depositar en la hipótesis nula.

$$Prob[F_{\alpha,(G-1),(n-G)} > F] = \alpha' = p - \text{valor}$$

A partir del estadístico F, se observa que la operación de determinar α' es la inversa de buscar el valor de las tablas para un nivel de significación dado. Determinado el p-valor, se rechaza la hipótesis nula para todo nivel de significación α , tal que $\alpha > p - \text{valor}$; por el contrario, se acepta la hipótesis nula cuando $\alpha < p - \text{valor}$.

4. CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA Y MATERIALES

4.1. Matriz de ensayo de testigos de 6 pulgadas

La matriz de ensayo propuesta por el CDI, contempla 6 variables de influencia a analizar, las cuales consideran eventualidades simultáneas que pueden presentarse en obra, durante los procedimientos de unión de las capas asfálticas. El estudio toma en cuenta las condiciones externas del terreno (limpieza y humedad), el tipo de superficie y la forma en que se puede aplicar el riego de liga (dosis residual, tipo de emulsión y tiempo de curado). Se considera además, que para cada combinación, se deben extraer 4 testigos, de modo que la extracción sea lo más representativa posible. De acuerdo a esta configuración, se tienen 114 combinaciones distintas, con un total de 456 testigos doble capa de diámetro de 6 pulgadas a extraer, como se puede ver a continuación en la Tabla 11.

Tabla 11: Matriz de ensayos para testigos doble capa de diámetro de 6 pulgadas, Fuente: CDI.

FACTORIAL DE ENSAYOS PARA TESTIGOS DE 6" EXTRAÍDOS EN TRAMO DE PRUEBAS		
VARIABLE	DESCRIPCIÓN	NIVELES
Dosis Residual	0,100,200,400 g/m ²	4
Superficie Pavimento	Sin Fresar, Fresado	2
Tiempo de Curado	Sin Curar, 2 horas, 24 horas	3
Emulsión	CSS-1h, Termoadherente	2
Limpieza	Sucio, Limpio	2
Humedad	Seco, Húmedo(Sólo para Fresado)	2
Numero de Testigos	4	4
COMBINACIONES TOTALES		114
TESTIGOS TOTALES		456

4.1.1. Variables de influencia consideradas en estudio

- **Tipo de Superficie del Pavimento:** Se realiza una comparación de la adherencia entre capas asfálticas, tanto para una superficie de capa inferior **sin fresar**, como para una superficie de la misma estructura, pero sometida a **fresado**. La carpeta existente utilizada como capa inferior (soporte), tradicional IV-A-12, tiene un espesor promedio de 7 centímetros y se utiliza para ambos casos, considerando que en la zona fresada se extraerán 3 centímetros de capa. Como se puede observar en la Ilustración 13, la superficie fresada denota corrugaciones en dirección del eje longitudinal, donde se puede distinguir una irregularidad considerablemente mayor a la macro y micro textura de las zonas sin fresar. La justificación de este análisis, surge por parte de la Empresa Bitumix S.A., ya que se requiere comprobar de forma empírica y cuantitativa, la ganancia (o pérdida) de adherencia producto de fresar capas asfálticas preexistentes, al momento de reparar pavimentos deteriorados con ayuda de un recapado. Si las diferencias son considerables y, el costo-oportunidad es beneficioso en cuanto al gasto necesario para fresar con el fin de aumentar la vida útil del pavimento, los resultados obtenidos pueden servir como referencia para la toma de decisiones en obra.

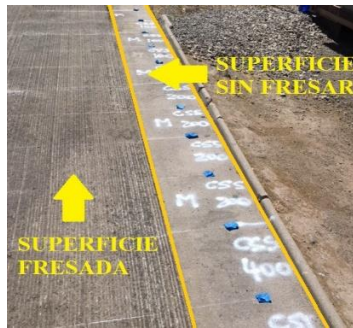


Ilustración 13: Diferenciación de superficie fresada y sin fresar en tramo de pruebas.

- Dosis Residual:** Se consideran las dosis residuales (DR) de **0 g/m² (sin liga)**, **100 g/m²**, **200 g/m²** y **400 g/m²**. A continuación, se presenta en la Ilustración 14, las diferentes dosis de riego de liga para una superficie fresada. Como se puede observar, en términos visuales, existe una menor cantidad de emulsión en la zona de DR 100 g/m². En las zonas con DR 200 g/m² y 400 g/m² se puede ver una mayor cantidad de liga en comparación a la primera zona. Debido a que las áreas sectorizadas de las distintas dosis de emulsión son muy acotadas, resulta imposible utilizar camiones imprimantes para la aplicación del riego de liga, por lo que se opta a la aplicación manual mediante rodillos y brochas de baja absorción para pinturas de secado rápido. El objetivo principal de este análisis, radica en estimar, para distintas condiciones simultáneas, cuáles son las dosis óptimas que permitan maximizar la adherencia entre capas asfálticas.

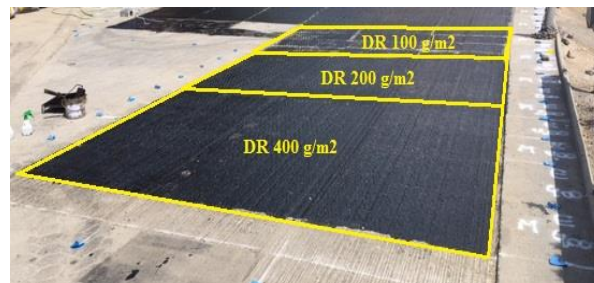


Ilustración 14: Diferenciación de dosis residuales de 100, 200 y 400 g/m² aplicadas en tramo de pruebas.

- Tiempo de Curado:** Se analiza la influencia que tiene el tiempo en el cual se deja el riego de liga expuesto a condición ambiente antes de colocar la carpeta de rodado. Se consideran 3 tiempos de curado distintos para las emulsiones asfálticas utilizadas como riego de adherencia: **24 horas** antes de la colocación de la carpeta de rodadura, **2 horas** antes de la colocación de la carpeta de rodadura e “inmediatamente” antes de la colocación de la carpeta de rodadura, lo que se considera como liga **sin curar**. Es importante mencionar, que la colocación del recapado ocurrió en un tiempo cercano a una hora después de haber aplicado el riego de liga “sin curar”, ya que, debido a la instalación de la maquinaria respectiva, resultó imposible alojar la carpeta de manera instantánea. A continuación, se presenta en la Ilustración 15, la diferencia presente entre los tiempos de curado de cada emulsión. Visualmente, se puede distinguir que la liga que tiene un mayor tiempo de curado, presenta también un mayor brillo. Este estudio se realiza para identificar, en épocas de altas temperaturas, cuáles son los tiempos de curado más idóneos para maximizar la adherencia, al utilizar las emulsiones CSS-1h y Termoadherente en distintas condiciones.



Ilustración 15: Diferenciación entre tiempos de curado de 24 h., 2h. y sin curar en tramo de pruebas.

- Tipo de Emulsión:** Las emulsiones asfálticas a considerar en este estudio, serán la Emulsión **CSS-1h** y la emulsión **termoadherente**, productos provenientes de PROBISA S.A., aplicadas en distintas dosis residuales, y con distintos tiempos de curado, tal como se ha especificado anteriormente. Este análisis se realiza con el propósito de comparar el desempeño de estas emulsiones, las cuales, de acuerdo a los resultados obtenidos en la investigación de Jara. P [11] en el CDI, para probetas de laboratorio, se han destacado por sobre otras en cuanto al nivel de adherencia.
- Nivel de Limpieza de la Superficie:** Se desea analizar cuánto influye la presencia de polvo en pequeñas cantidades en la superficie asfáltica antes de colocar el riego de liga. La diferenciación se realiza en 2 niveles: **condición sucia**, descrita a continuación y **condición limpia**, correspondiente a la superficie de un pavimento barrido cuidadosamente y soplado para que tenga la menor presencia de agentes externos. El material utilizado para ensuciar la superficie en la pista fresada, corresponde al polvillo producido por el mismo fresado del cual el kit barredor no logra eliminar. Las cantidades utilizadas corresponden a 140 g/m^2 esparcidos de manera uniforme, de material correspondiente a la carpeta de soporte fresada, de tamaño de tamiz inferior a la malla #16. Respecto al material utilizado para ensuciar la superficie en la pista sin fresar, se utiliza polvo roca, con un tamaño de tamiz inferior a la malla #16, del acopio de áridos ubicado en la Planta Maipú de Bitumix S.A. La cantidad utilizada corresponde también a 140 g/m^2 uniformes. En la Ilustración 16, se puede observar la diferencia entre una superficie limpia y una sucia para la superficie sin fresar. En este estudio en particular, es importante recalcar que, a diferencia de otras investigaciones referidas a la influencia de la suciedad en el nivel de adherencia, que el análisis comparativo entre las condiciones de limpieza y suciedad se considera antes de la aplicación del riego de liga y no después de éste. Por tanto, luego de que se aplican las emulsiones asfálticas, se tomaron los resguardos respectivos para que no existiese la intromisión de agentes externos en la película bituminosa recién colocada y así se alterasen los resultados. El motivo principal de este estudio radica en estimar si es necesaria, considerando los áridos utilizados, la limpieza exhaustiva y detallada en obra antes de la aplicación del riego de liga, además de comparar el efecto de la suciedad antes del riego v/s después del riego, según investigaciones de otros autores.

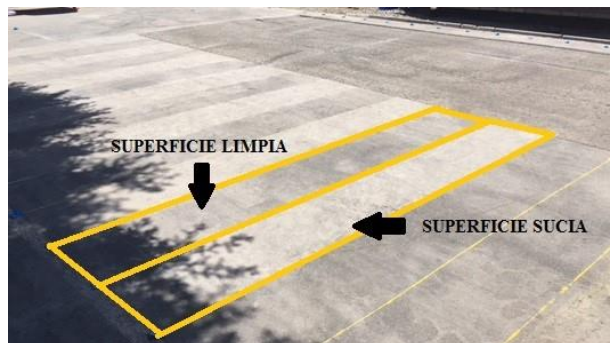


Ilustración 16: Diferenciación entre superficie limpia y sucia en tramo de pruebas.

- **Humedad en la superficie:** Debido a que el proceso de fresado en la práctica se realiza con agua, la superficie fresada queda con humedad superficial y, si las condiciones meteorológicas no permiten que el agua se evapore en un determinado tiempo, puede darse la situación de que el riego de liga se aplique en una superficie con presencia de humedad. Por este motivo, se requiere analizar como variable, la condición de humedad en la pista de pruebas fresada: **condición húmeda y condición seca**. Cabe mencionar que la condición de humedad sólo se analiza para la pista fresada, atendido que en la práctica, la superficie de una capa asfáltica de base normal, no debería encontrarse húmeda en condiciones atmosféricas normales, previo a la aplicación del riego de liga. La aplicación de humedad se realiza mediante pulverizadores de agua convencionales, con una dosis de 75 ml/m² uniforme, simulando la humedad post-fresado y en ningún caso saturando al área con agua en los valles de esta superficie. Es importante destacar, que este estudio no considera representar las condiciones de humedad de la lluvia, llovizna, neblina o nieve, centrándose sólo en representar la humedad post fresado antes de la colocación del riego de liga, en días invernales y secos.

4.2. Matriz de ensayo de testigos de 4 pulgadas

Además de los testigos de 6 pulgadas necesarios para el análisis de influencia en la adherencia, se requiere estudiar si existe alguna relación entre las resistencias de testigos de diámetros de 4 pulgadas con los testigos de diámetro 6 pulgadas para una misma combinación, es decir, que todas sus variables y condiciones sean iguales excepto por el diámetro del testigo extraído. Intuitivamente se puede deducir que existirá una diferencia de tensión debida a la geometría, no obstante, debiese existir algún factor que correlacione las resistencias de corte para ambos casos. Arbitrariamente se opta por elegir 6 combinaciones, tomando en cuenta 3 de la **pista sin fresar** y 3 de la **pista fresada**, para la emulsión **termoadherente**, en condición **limpia** y **seca**. En la Tabla 12, se especifica la matriz de ensayo para testigos con diámetro de 4 pulgadas.

Tabla 12: Matriz de ensayos para testigos doble capa de 4 pulgadas, Fuente: elaboración propia.

TESTIGOS DE 4" EXTRAIDOS EN CANCHA DE PRUEBAS (Relación Testigos 4" v/s 6")		
VARIABLE	DESCRIPCIÓN	NIVELES
Emulsión	Termoadherente	1
Limpieza	Limpio	1
Humedad	Seco	1
Tiempo de Curado	Sin Curar	1
Superficie Pavimento	Sin Fresar, Fresado	2
Dosis Residual	100,200,400 g/m ²	3
Numero de Testigos	4	4
COMBINACIONES TOTALES		6
TESTIGOS TOTALES		24

4.3. Matriz de ensayo de testigos de recapado monolítico

Para comparar las resistencias de corte de testigos doble capa con la resistencia de corte monolítica, de los testigos ya ensayados que tengan un espesor de recapado considerable y no alterado, se extraerán 10 ejemplares para ser ensayados nuevamente pero, en el centro de esta capa superior, con el objetivo de obtener las resistencias monolíticas de cada una de estas muestras. En la Tabla 13, se especifican las características de los ejemplares a ensayar. Sumando todas las muestras, se extraerán 480 testigos, con los cuales se realizarán 490 ensayos LCB en total.

Tabla 13: Matriz de ensayo para estructuras monolíticas de recapado, Fuente: elaboración propia.

ESTRUCTURAS MONOLITICAS DE TESTIGOS (RECAPADO) EXTRAIDOS EN TRAMO DE PRUEBAS	
DESCRIPCIÓN	NIVELES
CARPETA IV-20, CA-60/80	10
TESTIGOS TOTALES DEL ESTUDIO	10
TESTIGOS TOTALES EXTRAIDOS DEL ESTUDIO	490

4.4. Emplazamiento del tramo de pruebas

El lugar donde se emplaza el tramo de pruebas, corresponde al área de recepción de muestras del Centro de Desarrollo e Investigación (CDI), ubicado en la Planta Maipú de la Empresa Constructora de Pavimentos Asfálticos Bitumix S.A. Este sitio cuenta originalmente con una carpeta tradicional IV-A-12 (CA-24), de un espesor de aproximadamente 7 centímetros, la cual se utilizará como la capa de soporte del tramo de pruebas y que, de acuerdo a la variable del **tipo de superficie**, se divide en dos pistas, ambas con un ancho igual a 3,4 metros, pero de distinto largo: una pista **fresada de 13 metros** y otra pista sin fresar **de 7 metros**, según el esquema del plano del lugar en la Ilustración 17.

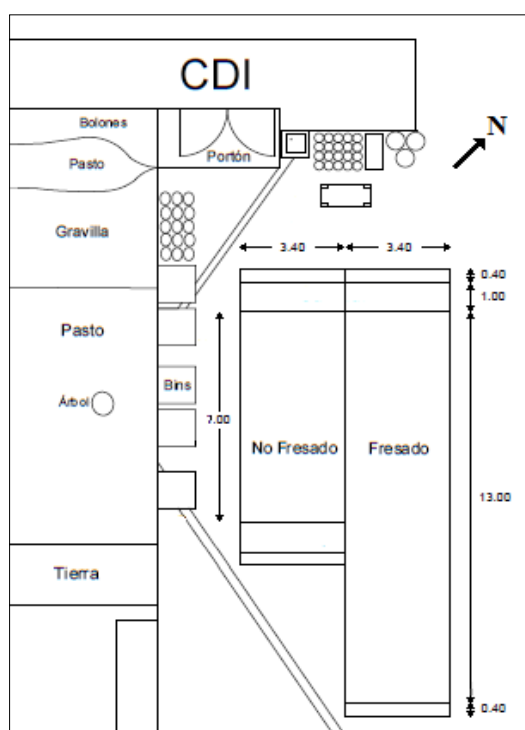


Ilustración 17: Plano del emplazamiento del tramo de pruebas (distancias en metros).

4.5. Configuración del tramo de pruebas

La configuración del tramo de pruebas se determinó en pos de compatibilizar lo más posible la distribución geométrica, materiales, maquinaria, equipos y recursos humanos, de manera de construirlo de forma eficiente.

- De acuerdo al árbol de combinaciones, el tramo de pruebas se compone de 2 pistas adyacentes, la primera, en el lado izquierdo, tendrá una dimensión de ancho de 3,4 metros y 7 metros de largo, que corresponderán a la **pista sin fresar**. La segunda, situada en el lado

derecho, con un ancho de 3,4 metros y un largo de 13 metros, corresponderá a la **pista fresada**.

- Cada una de estas pistas, se subdivide longitudinalmente, según el tiempo el cual se aplique el riego de liga antes de la colocación de la mezcla de la capa asfáltica superior: **0 horas (sin curar), 2 horas y 24 horas de tiempo de curado**.
- De forma transversal, se subdividen las pistas en función de las **dosis residuales** y el **tipo de emulsión** utilizada como riego de liga.
- También de forma transversal, se subdividen las zonas **limpias/sucias** y **húmedas/secas**, según el siguiente esquema de la Ilustración 18.

TRAMO DE PRUEBAS											
PISTA SIN FRESAR						PISTA FRESADA					
0 hrs. 2 hrs. 24 hrs.						0 hrs. 2 hrs. 24 hrs.					
Sin Emulsión	Sucio	77			1	3				Seco	Sucio
	Limpio	78			2	4				Húmedo	Limpio
CSS-1h	Sucio	79	91	103	5	29	53			Seco	Sucio
DR 100 g/m ²	Limpio	80	92	104	6	30	54			Húmedo	Limpio
CSS-1h	Sucio	81	93	105	7	31	55			Seco	Sucio
DR 200 g/m ²	Limpio	82	94	106	8	32	56			Húmedo	Limpio
CSS-1h	Sucio	83	95	107	9	33	57			Seco	Sucio
DR 400 g/m ²	Limpio	84	96	108	10	34	58			Húmedo	Limpio
T-Adherente	Sucio	85	97	109	11	35	59			Seco	Sucio
DR 100 g/m ²	Limpio	86	98	110	12	36	60			Húmedo	Limpio
T-Adherente	Sucio	87	99	111	13	37	61			Seco	Sucio
DR 200 g/m ²	Limpio	88	100	112	14	38	62			Húmedo	Limpio
T-Adherente	Sucio	89	101	113	15	39	63			Seco	Sucio
DR 400 g/m ²	Limpio	90	102	114	16	40	64			Húmedo	Limpio
					17	41	65			Seco	Sucio
					18	42	66			Húmedo	Limpio
					19	43	67			Seco	Sucio
					20	44	68			Húmedo	Limpio
					21	45	69			Seco	Sucio
					22	46	70			Húmedo	Limpio
					23	47	71			Seco	Sucio
					24	48	72			Húmedo	Limpio
					25	49	73			Seco	Sucio
					26	50	74			Húmedo	Limpio
					27	51	75			Seco	Sucio
					28	52	76			Húmedo	Limpio

Ilustración 18: Esquema detallado de combinaciones del tramo de pruebas.

El diseño estructural del tramo de pruebas se puede observar en la Ilustración 19, que corresponde a la vista en alzado frontal de éste, distinguiéndose las dos capas asfálticas con las cuales será analizada la adherencia mediante la extracción de testigos (Ilustración 20).

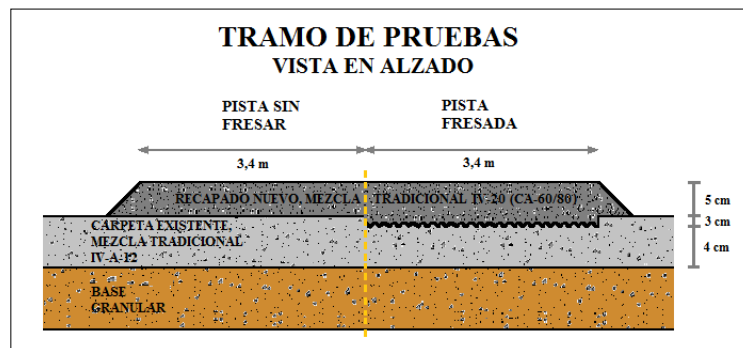


Ilustración 19: Vista en alzado frontal del tramo de pruebas.

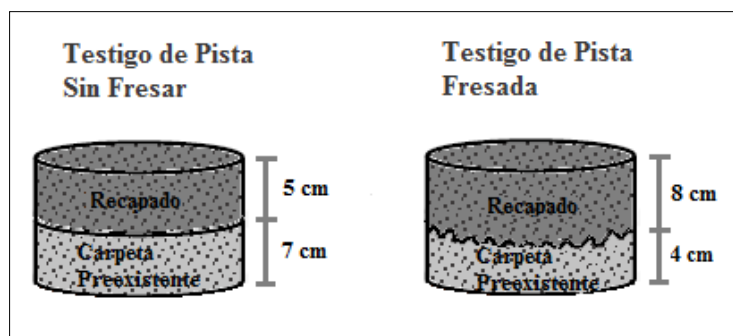


Ilustración 20: Testigos de pista fresada y sin fresar (dimensiones referenciales).

4.6. Pruebas de aplicación manual del riego de liga

Para realizar la aplicación del riego de liga y su control, se descartó desde un comienzo la utilización de algún camión imprimante por el simple hecho de contar con áreas considerablemente acotadas, haciendo muy difícil realizar las calibraciones respectivas para controlar las cantidades de ligante en el equipo. Luego de varias pruebas con distintas herramientas de dosificación de pinturas, se decide utilizar un rodillo para pinturas de secado rápido, de baja absorción Marca Colrdx, modelo pis 23. Para estimar y aplicar la dosis de emulsión acorde con la dosis residual requerida, se debe considerar el porcentaje de dosis residual de la partida de la emulsión utilizada, la cual no es exactamente igual en toda circunstancia y depende del Batch o Lote de la cual proviene. Además, se debe considerar la cantidad de asfalto absorbido y retenido en las tinetas que contienen las emulsiones, en las bandejas de pintura y en los rodillos propiamente tal.

Para la determinación de la cantidad de emulsión que se debe aplicar en cierta área, se considera un área estándar en metros cuadrados, la que para la pista fresada tiene un valor de 2,28 m², correspondiendo a 4 combinaciones que comparten la misma dosis, una misma emulsión, y a la vez, un mismo tiempo de curado. La cantidad de residuo asfáltico necesario en cierta área específica se calcula con la siguiente ecuación:

$$RA = DR \cdot A$$

Donde:

RA: Cantidad de residuo asfáltico, esparcido uniformemente en un área estándar, en g.

DR: Dosis residual en g/m².

A: Área estándar en m².

Para obtener la cantidad de emulsión total, considerada antes del quiebre, y necesaria para cubrir el área especificada, se utiliza la siguiente ecuación:

$$EA = \frac{100}{\%R} \cdot RA$$

Donde:

EA: Cantidad de emulsión asfáltica total, esparcida uniformemente en un área estándar, en g.

%R: Porcentaje de residuo para un lote de emulsión asfáltica, en %.

RA: Cantidad de residuo asfáltico en gramos, esparcido uniformemente en un área estándar, en g.

De acuerdo a las pruebas realizadas con distintas herramientas de aplicación de riego de liga en el CDI, en la Tabla 14, se especifican las cantidades de emulsión asfáltica retenidas en cada una de éstas.

Tabla 14: Retención de emulsión en implementos según pruebas de aplicación manual.

CANTIDAD DE EMULSIÓN RETENIDA EN GRAMOS	
Tineta	12
Bandeja	17
Rodillo	62
TOTAL RETENIDO	91

Considerando el caso de dosis residual de 100 g/m² para un área de 2,26 m², con una emulsión que cuenta con un Porcentaje de Residuo de 63%, deben quedar 226 gramos esparcidos uniformemente en tal superficie luego del quiebre. Ya que la emulsión fresca contiene, para este caso, un 37% de agua, se considera que se necesitan 359 gramos de emulsión en dicha área. Además, se debe considerar la cantidad de emulsión retenida en las herramientas de aplicación, por lo tanto, para el área mencionada con 100 g/m² de dosis residual, se debe contar con una tineta que contenga 359+91=450 gramos de emulsión asfáltica.

$$RA = 100 \left[\frac{g}{m^2} \right] \cdot 2,26[m^2] = 226[g]$$

$$EA = \frac{100}{63} \cdot 226[g] = 359[g]$$

De acuerdo a las emulsiones del Batch proveniente de PROBISA, utilizadas en el tramo de pruebas para el riego de liga, la emulsión CSS-1h tiene un porcentaje de residuo de 63% (como el ejemplo) y la emulsión Termoadherente un 59%. Realizando el mismo procedimiento de cálculo, pero considerando la diferencia en la cantidad de residuo, se estiman las cantidades de emulsión para cada área. Cabe recalcar, que para la Pista Sin Fresar, el área estándar a cubrir, para cada tiempo de curado, con una misma dosis y emulsión, corresponde a 1,13 m² y para la Pista Fresada a 2,26 m². En la Tabla 15 y la Tabla 16, se tienen las cantidades de emulsión asfáltica CSS-1h y Termoadherente necesarias para las distintas áreas asignadas del tramo de pruebas:

Tabla 15: Cantidades requeridas de emulsión CSS-1h y Termoadherente para cada tiempo de curado en pista sin fresar.

PISTA SIN FRESAR							
DR[g/m2]	Área[m2]	Emulsión Retenida [g]	Asfalto Residual Requerido [g]	Emulsión Requerida[g]		Emulsión Total [g]	
				CSS-1h	Termo	CSS-1h	Termo
100	1,13	91	113	179	192	270	283
200	1,13	91	226	359	383	450	474
400	1,13	91	452	717	766	808	857

Tabla 16: Cantidades requeridas de emulsión CSS-1h y Termoadherente para cada tiempo de curado en pista fresada.

PISTA FRESADA							
DR[g/m2]	Área[m2]	Emulsión Retenida [g]	Asfalto Residual Requerido [g]	Emulsión Requerida[g]		Emulsión Total [g]	
				CSS-1h	Termo	CSS-1h	Termo
100	2,26	91	226	359	383	450	474
200	2,26	91	452	717	766	808	857
400	2,26	91	904	1435	1532	1526	1623

De acuerdo a la disponibilidad del personal y de la configuración del tramo de pruebas, para la aplicación manual del riego de liga, se dispuso de una cuadrilla de 6 personas, cada una, en forma individual, tuvo que cubrir 2 combinaciones de la pista sin fresar (1,13 m²) y 4 combinaciones de la pista fresada (2,26 m²), para los 3 tiempos de curado respectivos. Para que el procedimiento se realizara sin inconvenientes, fue necesaria una instrucción y capacitación del personal de la cuadrilla de 6 personas, a quienes, en forma acuciosa y metódica, se les ha indicado los procedimientos y objetivos de esta labor.

4.7. Materiales

4.7.1. Emulsiones asfálticas utilizadas como riego de liga

De acuerdo a las cubicaciones realizadas, se requieren de 12,94 kg de emulsión CSS-1h y 13,7 kg de emulsión Termoadherente. A continuación, se presentan las características principales y especificaciones de estas emulsiones utilizadas como riego de liga.

4.7.1.1. Emulsión CSS-1h

Corresponde a una emulsión catiónica de quiebre lento, estable al almacenamiento y transporte. Presenta una excelente adherencia y cubrimiento con agregados pétreos de diversa naturaleza mineralógica. Se debe evitar su uso cuando la temperatura ambiente es inferior a los 10°C. No se debe trabajar con este compuesto si hay probabilidades de lluvia.

USOS:

- Riegos de Liga: Aplicación de una emulsión sobre una superficie de hormigón o carpeta asfáltica, previo a la colocación de una nueva capa de mezcla asfáltica, con el fin de favorecer una fuerte adhesión entre ambas.
- Lechadas Asfálticas: Mezcla de áridos con emulsión y agua (eventualmente cemento y/o aditivos). Se aplica sobre el pavimento en una o varias capas.
- Imprimación Reforzada: Aplicación de una emulsión sobre una base estabilizada, a la que posteriormente se adiciona arena natural o polvo de roca en cantidades suficientes para evitar la exudación de ligante a la superficie.
- Grava Emulsión: Mezcla de áridos, emulsión y agua que convenientemente compactada, se utiliza para la construcción de capas inferiores en construcción de carreteras.

CARACTERÍSTICAS:

- Ligante versátil que no contamina y ahorra energía.
- Se puede usar en frío incluso con áridos húmedos.
- Al estar almacenada, tiene escasa sedimentación de asfalto.
- Viscosidad adecuada para distintos usos.
- De acuerdo a su tamaño de partícula, no obstruye tuberías ni filtros.
- Excelente adherencia árido-asfalto.
- Excelente cohesión en lechadas asfálticas.
- El agregado debe estar perfectamente limpio, libre de polvo y materia orgánica.

- Las propiedades anteriores se estudian mediante ensayos de sedimentación, viscosidad y tamizado.

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS EMULSIÓN CSS-1h:

Tabla 17: Especificaciones técnicas de emulsión CSS-1h, Fuente: Certificado Análisis CDI.

ENSAYOS	ESPECIFICACION	METODO/NORMA
Viscosidad 25°C, SSF	20-100	8.301.12 / LNV 39
Sedimentación 24 hrs, %	Máx 1%	8.302.5 / LNV 42
Tamizado, %	Máx 0.1	8.302.5 / LNV 42
Carga de Partícula	Positiva	8.302.5 / LNV 42
Mezcla con cemento, %		
Residuo Asfáltico, %	Mín. 65	8.302.5 / LNV 42
Análisis del Residuo		
Penetración 25°C, 100, 5 s, 0.1 mm	40-90	8.302.16 / LNV 34
Ductilidad a 25°C, cm	Mín. 40	8.302.17 / LNV 35
Solubilidad en Tricloetileno, %	Máx 98.5	
Ensayo de la Mancha, % Xilol	Máx. 25	8.302.7 / LNV 25

4.7.1.2. Emulsión termoadherente (Emulclean)

Corresponde a una emulsión catiónica especial, formulada exclusivamente para los riegos de liga. Estructuralmente presenta un contenido de asfalto mínimo de 57%, que puede ser modificada mediante la incorporación de polímeros. La emulsión Termoadherente o de nombre comercial Emulclean, por PROBISA S.A., usando una formulación diferente del resto de emulsiones tradicionales, busca ser un producto de fácil aplicación, seguro y duradero. El sello distintivo de este tipo de emulsión con el resto, se define por la disminución de la adhesividad ligante-neumático del riego de liga con el tráfico de obra circulante y por una alta adhesión entre capas de mezclas en caliente, lo que motiva a su denominación de emulsión “Termoadherente”. Con esto, se evitan pérdidas de eficiencia por disminución de la dotación del riego de adherencia, en comparación al desempeño respecto a otras emulsiones estándar.

USOS:

- Riegos de Liga: Aplicación de una emulsión sobre una superficie de hormigón o carpeta asfáltica, previo a la colocación de una nueva capa de mezcla asfáltica con el fin de favorecer una fuerte adhesión entre ambas.

CARACTERÍSTICAS:

- Se aplica sobre todo tipo de pavimentos de asfalto u hormigón, asegurando adherencia de las capas de rodadura, en especial, si son muy delgadas tanto en obras urbanas como autopistas.
- La emulsión Termoadherente permite aplicar riegos de liga más limpios, eficaces y permanentes, en comparación con las emulsiones tradicionales, pues la emulsión clásica está siempre dificultada por la circulación de la maquinaria de obra que genera salpicaduras y suciedad fuera de las vías tratadas. Antes del quiebre, la emulsión es arrastrada por la maquinaria y tras el quiebre en particular en épocas de calor, el asfalto residual se pega a los neumáticos de los camiones.

- La superficie donde se aplicará la emulsión Termoadherente debe estar limpia (libre de polvo, barro, etc.), y libre de exceso de humedad.
- El rango de temperatura para su aplicación está comprendido entre la temperatura ambiente y 60°C.
- Nunca debe diluirse con agua o solventes, se usa tal cual como se despacha de la planta de PROBISA S.A.

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS EMULSIÓN TERMOADHERENTE:

Tabla 18: Especificaciones técnicas de emulsión termoadherente, Fuente: Certificado Análisis, PROBISA S.A.

ENSAYOS	ESPECIFICACION
Contenido de residuo asfáltico, %	Mín. 57
Penetración (25°C, 1/10 mm)	Máx. 60
Viscosidad a 25°C, SSF	20-100
Estabilidad al almacenamiento por Decantación, 24 hrs, %	Máx. 5
Carga de Partícula	50-150

4.7.2. Polvo roca y material fresado como suciedad

Para cubrir y representar las zonas con suciedad en la superficie de la capa inferior, por debajo del riego de liga, se requieren para la pista fresada 3006 g. de material fresado, proveniente de carpeta la tradicional IV-A-12 (CA-24), secado a 60° durante 12 horas y bajo el tamiz #16. De igual forma, se necesitan para la pista sin fresar, 1661 g. de polvo roca proveniente de la Planta Maipú de Bitumix S.A., secado a 60° durante 12 horas y bajo el tamiz #16.

4.7.3. Carpeta preexistente del estacionamiento CDI

Parte de la carpeta existente que conforma el estacionamiento y el patio de recepción de muestras del CDI, se utiliza como capa inferior del tramo de pruebas. Con un espesor aproximado de 7 cm., abarcando un área de 84 m², son aproximadamente 15 toneladas de mezcla de banda IV-A-12, las que fueron colocadas en el año 2006 para cubrir dicha área.

4.7.4. Recapado de mezcla asfáltica tradicional

De acuerdo a la cubicación realizada, se necesita cubrir un área aproximada de 84 m² con un recapado de espesor de 5 y 8 centímetros para la pista sin fresar y la pista fresada respectivamente, compuesto por una mezcla de tránsito pesado (MINVU) IV-20. En la siguiente tabla, se especifican las cantidades cubicadas para el recapado requerido:

Tabla 19: Cubicaciones para recapado del tramo de pruebas.

CARPETA DE RODADO (recapado)		Unidad
Espesor capa rodado Pista Sin Fresar	5	cm
Espesor capa rodado Pista Fresada	8	cm
Área Pista Sin Fresar	33,3	m ²
Área Pista Fresada	50,3	m ²
Volumen compactado requerido	5,7	m ³
Densidad de diseño	2,3	T/m ³
Cantidad mezcla requerida	13,1	T

De acuerdo a las cubicaciones realizadas, se debe cargar un camión con 14 toneladas de mezcla asfáltica en caliente. La producción se realiza a metros de la zona donde se coloca el recapado, por lo tanto, no existe problema alguno de logística respecto a la temperatura de colocación. La producción de mezcla asfáltica se realiza en la Planta Maipú de Bitumix S.A.

4.7.4.1. Caracterización del árido utilizado como recapado

El árido utilizado para la mezcla de recapado, es elaborado en la Planta Maipú de Bitumix S.A. Este agregado pétreo, de graduación semi-densa, será utilizado para una carpeta IV-20.

Tabla 20: Caracterización del árido utilizado para carpeta IV-20.

ANÁLISIS DE LOS ARIDOS				
a. Granulometría (% en peso que pasa)				
Muestra N°		1	2	3
Tipo de Material		Gravilla 3/4"	Gravilla 1/2"	Polvo Roca
Procedencia		Planta Maipú	Planta Maipú	Planta Maipú
tamiz de 19	mm (3/4")	100	100	-
tamiz de 12,5	mm (1/2")	39	100	-
tamiz de 9,5	mm (3/8")	3	71	100
tamiz de 4,75	mm N° 4	1	4	95
tamiz de 2,36	mm N° 8	1	2	67
tamiz de 1,18	mm N° 16	1	2	45
tamiz de 0,6	mm N° 30	1	1	32
tamiz de 0,300	mm N° 50	1	1	23
tamiz de 0,150	mm N° 100		1	17
tamiz de 0,075	mm N° 200		1	12
b. Constantes físicas e hídricas				
Densidad real seca	(Kg/m3)	2,706	2,714	2,681
Densidad neta	(Kg/m3)	2,771	2,777	2,746
Densidad aparente suelta	(Kg/m3)	1,475	1,439	1,714
Partículas chancadas	(%)	99,5	100	100
Partículas lajeadas	(%)	0,1	0,2	0,7
Desgaste de los Ángeles	(%)	10	14	-
Grado	(%)	5	5	-
Índice de plasticidad		NP	NP	NP

4.7.4.2. Cemento asfáltico

El cemento asfáltico modificado con polímeros, utilizado como ligante para la mezcla asfáltica de recapado, corresponde al tipo CA 60/80, con una densidad de 1051 kg/m³, proveniente de PROBISA S.A., el cual, cuenta con la siguiente especificación de la Tabla 21:

Tabla 21: Especificaciones técnicas para cemento asfáltico CA 60/80 utilizado, Fuente: Tabla 8.301.6.A, Vol. N°8 MC.

ENSAYES	ESPECIFICACION	VALOR
Penetración, 25°C, 100 g, 5 s, 0,1 mm	60-80	60
Punto de Ablandamiento, °C	Informar	50,3
Ductilidad, 25°C, 5 cm/min, cm	Mín. 80	>150
Ductilidad, 5°C, 5 cm/min, cm	Mín. 50	s/i
Recuperación Elástica, 13°C, 20 cm, 1h, %	Mín. 50	s/i
Índice de Penetración	-1,0 a +1,0	-0,7
Punto de Quiebre Fraass, °C	Máx. -17	s/i
Punto de Inflamación, °C	Mín. 235	324

4.7.4.3. Diseño de mezcla

El diseño de la mezcla asfáltica en caliente, utilizada como recapado para el tramo de pruebas, corresponde a un Concreto Asfáltico en caliente con CA 60/80, CARPETA de tamaño máximo 20 mm para TRÁNSITO PESADO, banda IV-20 para carpeta de rodado, según especificaciones técnicas SERVIU. La dosificación de áridos se indica en la Tabla 22.

Tabla 22: Dosificación de áridos para carpeta IV-20.

DOSIFICACIÓN DE LOS ÁRIDOS EN PESO					
De acuerdo a las características de los áridos, estos se mezclaron como sigue					
Muestra N° 1	Gravilla 3/4"	18%			
Muestra N° 2	Gravilla 1/2"	26%			
Muestra N° 3	Polvo Roca	56%			
a. Características de la mezcla			Banda Especificada		
Granulometría (% en peso que pasa)				IV-20	
tamiz de 25	mm (1")	100		100	
tamiz de 19	mm (3/4")	100	80		100
tamiz de 12,5	mm (1/2")	89		-	
tamiz de 9,5	mm (3/8")	75	60		80
tamiz de 4,75	mm N° 4	54	48		65
tamiz de 2,36	mm N° 8	38	35		50
tamiz de 1,18	mm N° 16	26		-	
tamiz de 0,6	mm N° 30	18	19		30
tamiz de 0,300	mm N° 50	13	13		23
tamiz de 0,150	mm N° 100	10	7		15
tamiz de 0,075	mm N° 200	7	0		8
Densidad real	(Kg/m3)	2,671			
Densidad específica	(Kg/m3)	2,705			
Absorción de Asfalto	(%)	0,491			
Dmm para 5,5%	(Kg/m3)	2,514			
(Recipiente tipo A-procedimiento sg. Item 6.0 MC. Vol 8					
Adherencia con CA 60/80					
AASHTO (% ref.ag.)		+95	mín.		95
Adherencia R. y W.	(%)	2-8	mín.		0-5
Equivalente de Arena	(%)	65	mín.		50
Desintegración por Sulfatos	(%)	1,9	máx.		12/15
Sales Solubles	(%)	N.P.	máx.		2
Desgaste de Los Ángeles	(%)	13,4	máx.		35
Partículas Chancadas	(%)	100	mín.		70
Partículas Lajeadas		0,2	máx.		10
Índice de Plasticidad		N.P.	N.P.		

En la Tabla 23, se indican los parámetros Marshall del diseño y en la Tabla 24 los resultados del diseño:

Tabla 23: Parámetros Marshall de carpeta IV-20.

PARÁMETROS MARSHALL (75 golpes por cara) y ÓPTIMO							
CA 60/80		4,5	5	5,5	6	6,5	exigencias
Densidad	(Kg/m3)	2376	2388	2394	2392	2385	
Huecos en la mezcla	(%)	6,1	5	4,2	3,6	3,3	3-5
V.A.M.	(%)	15,6	15,6	15,8	16,2	16,9	min. 13
Huecos Llenos	(%)	60,7	67,7	73,6	77,7	80,5	
Fluencia (0,25 mm)		12	12,7	13,7	14,7	16	"8-16
Estabilidad	(N)	13114	13271	13024	12335	11262	9000-14000
Relac. Estabilidad/Fluencia		4456	4261	3876	3421	2870	2400-4300
Óptimo por estabilidad	5						
Óptimo por densidad	5,6						
Óptimo para 4,5% de huecos	5,3						
Óptimo a usar:	5,3						

Tabla 24: Mezcla de trabajo, densidad Marshall y óptimo de MAC IV-20.

MEZCLA DE TRABAJO			Banda de Trabajo	
Granulometría (% en peso que pasa)			100	
tamiz de 25	mm	(1")		
tamiz de 19	mm	(3/4")	95	100
tamiz de 12,5	mm	(1/2")	84	94
tamiz de 9,5	mm	(3/8")	70	80
tamiz de 4,75	mm	Nº 4	49	59
tamiz de 2,36	mm	Nº 8	34	42
tamiz de 1,18	mm	Nº 16	22	30
tamiz de 0,6	mm	Nº 30	15	21
tamiz de 0,300	mm	Nº 50	10	16
tamiz de 0,150	mm	Nº 100	8	12
tamiz de 0,075	mm	Nº 200	5	9
Óptimo C.A. 60/80	(% ref. ag.)		5,3+/-0,3	
Densidad Marshall	(Kg/m3)		2392	
Temp. de Mezclado	(°C)		154-160	
Temp. de Compactación Inicial	(°C)		144-150	

El Gráfico 21 contiene el set de gráficos correspondientes a la estabilidad, densidad, % de huecos, VAM y fluidez de la mezcla asfáltica en caliente de banda IV-20.

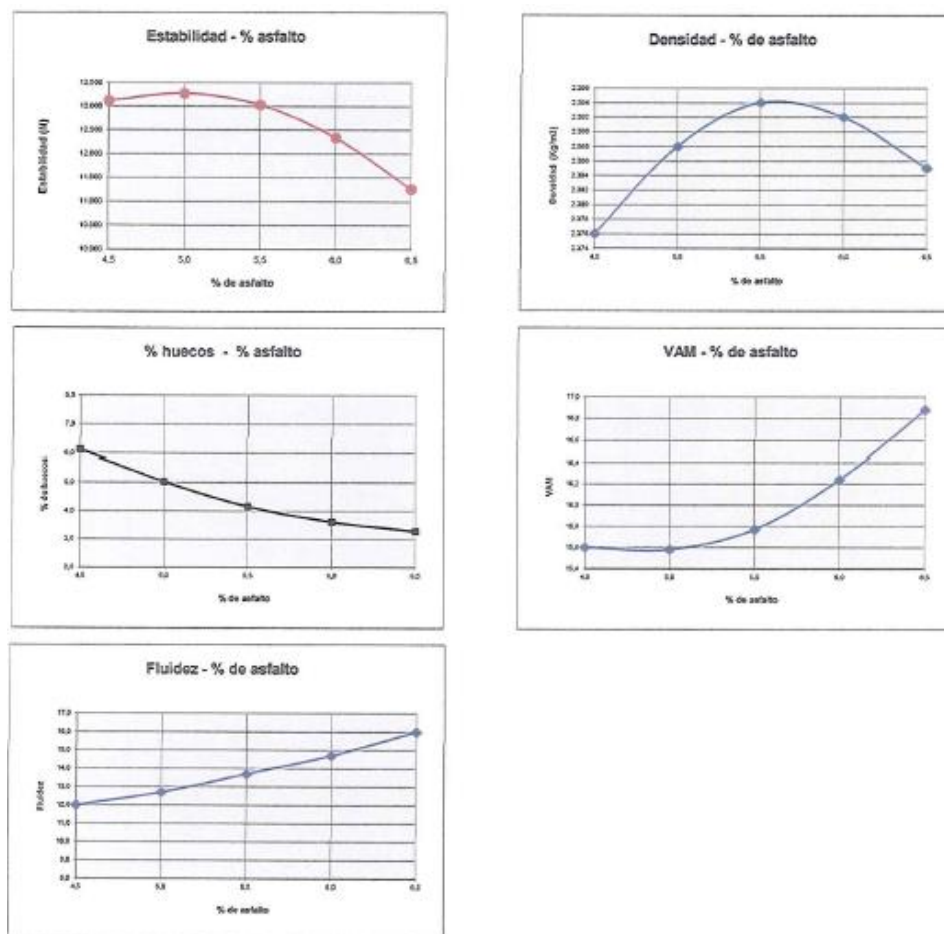


Gráfico 21: Set de gráficos de diseño de MAC IV-20.

Como se puede apreciar en la Tabla 25, correspondiente a las densidades de testigos extraídos del tramo de pruebas, los valores cumplen con el requisito de la densidad mínima del 97% Marshall.

Tabla 25: Densidades de testigos compuestos del recapado del tramo de pruebas.

Testigo	A(masa en aire) g.	B(superficie seca) g.	C (masa en agua) g.	Aab%	G kg/m3 (Densidad)
1	2843,3	2846,7	1657,6	0,29	2391
2	2854,7	2858,9	1656,4	0,35	2374
3	2715,7	2719,6	1580,4	0,34	2384
4	3229,9	3241,7	1850,8	0,85	2322
5	3247,4	3263	1863,2	1,11	2320
6	2755,2	2762,2	1590,3	0,60	2351
7	2724,8	2730,2	1573,2	0,47	2355
8	2728,2	2731,4	1580,4	0,28	2370
Densidad Promedio kg/m3					2358
Desv. estándar kg/m3					27
Densidad 97% Marshall kg/m3					2320

4.7.5. Otros materiales

Además de los materiales directos que conforman la estructura del tramo de pruebas, se consideran los siguientes materiales indirectos y herramientas menores:

Materiales para instalación de faena: Huincha de medición, tijera, lienzo de algodón 2,5 mm Plasticord, cal, martillo, cinta de peligro, scotch, odómetro, esmalte spray blanco, clavos corrientes, cinta de tela 48 mm x 50 m multiuso, lonas de poliuretano.

Materiales menores tramo de pruebas: Pulverizador 300 ml Roots, escobillón, bandeja de pintura Roma, rodillo Colrdx pis 23, balanza, 12 tinetas plásticas de 3,5 l., solvente para emulsión (Tricloetileno), agua.

Materiales para extracción de testigos: 4 Brocas de testiguera de 150 mm interno, orejeras, bloqueador solar, manguera con doble unión, extensión corriente, conexión agua potable.

Materiales para ensayo de corte LCB: Dial, Post-it, demarcadores, cámara de video, llave francesa, pernos de cocina ¼ x 2”, destornillador, WD-40, guantes de cabritilla, mordaza, dispositivo de prensa servo-hidráulica, regla, pie de metro y sierra.

4.8. Maquinaria

Para la confección del tramo de pruebas, se deberán utilizar las siguientes herramientas y maquinaria:

Equipo soplador e hidrolavadora: El equipo soplador se compone de un soplador de aire a batería de 18 Volts marca Makita, modelo DUB182Z, necesario para remover el polvo y material orgánico vegetal, que cae sobre la superficie existente emplazada en el tramo de pruebas. La hidrolavadora convencional Marca Karcher, modelo K2, se utiliza con el fin de remover todo material adherido durante años sobre la superficie de capa asfáltica preexistente (posterior capa inferior) que compone el tramo de pruebas, dejándola limpia de manera uniforme.



Ilustración 21: Equipo soplador e hidrolavadora, utilizados para limpiar superficie del tramo de pruebas.

Fresadora: con el fin de poder representar una superficie fresada con mayor corrugosidad en el tramo de pruebas, se utiliza una fresadora de Marca Wirtgen, modelo W1200 F, de la división Bitumix Tecnología (BTE), de Bitumix S.A, la que se puede observar en la Ilustración 22. El ancho de corte de esta fresadora es de 1200 mm.

Equipo barredor: El equipo barredor se conforma por un vehículo con una especie de escobillas, de la división BTE de Bitumix S.A., el cual, permite remover el material desprendido por la fresadora que no se puede retirar por ésta misma (ver Ilustración 23).



Ilustración 22: Fresadora de la división BTE de Bitumix S.A. utilizada para fresar tramo de pruebas.



Ilustración 23: Equipo barredor utilizado en pista fresada.

Camión tolva: se utiliza un Camión Tolva de marca Ford, modelo Cargo con capacidad de 14 toneladas, necesario para trasladar la mezcla asfáltica producida en la Planta Maipú de Bitumix S.A. a la terminadora, con la que se colocará, posteriormente, la carpeta de rodado del tramo de pruebas, ubicado en el mismo recinto en las inmediaciones del CDI.



Ilustración 24: Camión tolva utilizado para provisión de mezcla asfáltica a terminadora.

Terminadora: para la colocación de la capa de rodadura, se utiliza una terminadora Marca Vögele, modelo Súper 1300-2, con extensión para un ancho de 3,4 metros. Las características al detalle de esta máquina se encuentran en la sección de Anexos.



Ilustración 25: Terminadora Vögele utilizada para colocar recapado en tramo de pruebas.

Rodillo compactador: con el fin de lograr una compactación adecuada, correspondiente a lo menos al 97% de la densidad Marshall para una carpeta de Tránsito Pesado IV-20 con CA 60/80, se utiliza un rodillo mixto de Marca Hamm, modelo HD-14.



Ilustración 26: Rodillo mixto Hamm utilizado para compactar recapado en tramo de pruebas.

4.9. Secuencia constructiva

En la siguiente Carta Gantt (Ilustración 27 e Ilustración 28), se consideran las actividades que componen la secuencia constructiva para la construcción del tramo de pruebas. Además, se adjunta un esquema visual (Ilustración 29 e Ilustración 30) de esta secuencia, a modo de entender de mejor forma los distintos procedimientos realizados en terreno.

GANTT CANCHA PRUEBAS	PROCEDIMIENTO	Dia 1		Dia 2		Dia 3			
INSTALACIÓN	Tizado de Pistas	10 min							
FAENA Y FRESADO	Fresado	1h, 30min							
CONDICION LIMPIEZA	Demarcación de Combinaciones			5 h					
	Aplicación de Suciedad en zonas Sucias			3 h					
CONFIGURACION CONDICION HUMEDAD Y RIEGO DE LIGA	Aplicación Riego de liga Zona 24 h. P. Sin Fresar					7 min			
	Curado 24 h. P. Sin Fresar						CURADO DE 24 h.		
	Aplicación Humedad Zona 24 h.					20 min			
	Aplicación Riego de liga Zona 24 h. P. Fresada								
	Curado 24 h. P. Fresada						CURADO DE 24 h.		
	Protección con Lona de Poliuretano								30 min
	Aplicación Riego de liga Zona 2 h. P. Sin Fresar								
	Curado 2 h. P. Sin Fresar								
	Aplicación Humedad Zona 2 h.								
	Aplicación Riego de liga Zona 2 h. P. Fresada								
	Curado 2 h. P. Fresada								
	Aplicación Riego de liga Zona Sin Curar P. Sin Fresar								
	Aplicación Humedad Zona Sin Curar								
	Aplicación Riego de liga Zona Sin Curar P. Fresada								
	Retiro de lonas de Poliuretano								
	Aplicación Humedad Zonas sin Riego de Liga								
RECAPADO	Colocación Carpeta Pista Fresada								
	Colocación Carpeta Pista Sin Fresar								
	Compactación Pista Fresada								
	Compactación Pista Sin Fresar								
	Enfriamiento carpeta								
	Demarcación final								

Ilustración 27: Carta Gantt para secuencia constructiva del tramo de pruebas (1).

GANTT CANCHA PRUEBAS	PROCEDIMIENTO	Dia 4										Dia 5	
INSTALACIÓN	Tizado de Pistas												
FAENA Y FRESADO	Fresado												
CONDICION LIMPIEZA	Demarcación de Combinaciones												
	Aplicación de Suciedad en zonas Sucias												
CONFIGURACION CONDICION HUMEDAD Y RIEGO DE LIGA	Aplicación Riego de liga Zona 24 h. P. Sin Fresar												
	Curado 24 h. P. Sin Fresar												
	Aplicación Humedad Zona 24 h.												
	Aplicación Riego de liga Zona 24 h. P. Fresada												
	Curado 24 h. P. Fresada												
	Protección con Lona de Poliuretano												
	Aplicación Riego de liga Zona 2 h. P. Sin Fresar	7 min											
	Curado 2 h. P. Sin Fresar												
	Aplicación Humedad Zona 2 h.												
	Aplicación Riego de liga Zona 2 h. P. Fresada												
	Curado 2 h. P. Fresada												
	Aplicación Riego de liga Zona Sin Curar P. Sin Fresar												
	Aplicación Humedad Zona Sin Curar												
	Aplicación Riego de liga Zona Sin Curar P. Fresada												
	Retiro de lonas de Poliuretano												
	Aplicación Humedad Zonas sin Riego de Liga												
RECAPADO	Colocación Carpeta Pista Fresada												
	Colocación Carpeta Pista Sin Fresar												
	Compactación Pista Fresada												
	Compactación Pista Sin Fresar												
	Enfriamiento carpeta												
	Demarcación final												

Ilustración 28: Carta Gantt para secuencia constructiva del tramo de pruebas (2).

Para la confección del Tramo de Pruebas, se debe ejecutar la secuencia de operaciones siguiente:

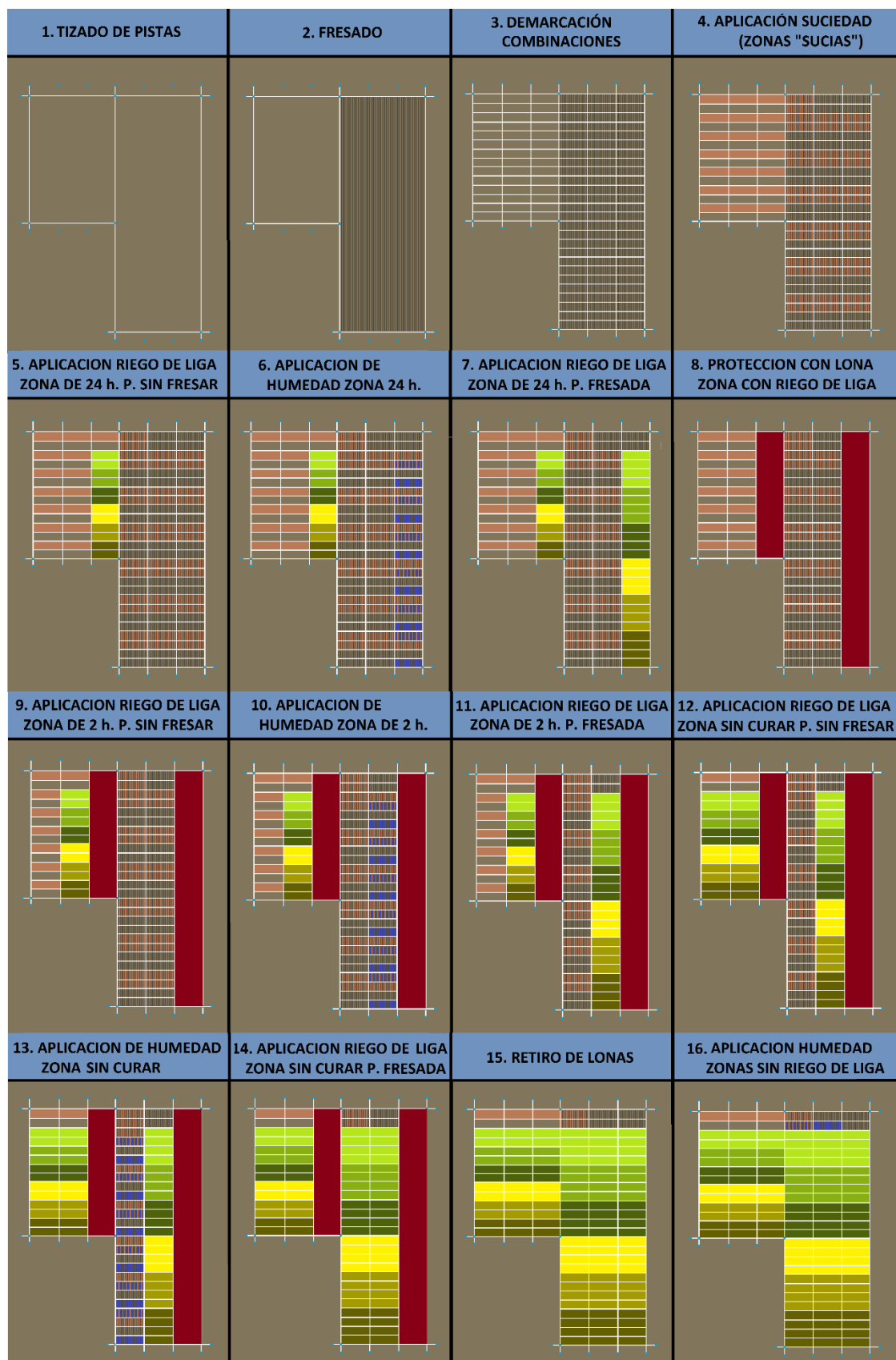


Ilustración 29: Esquema representativo de secuencia constructiva del tramo de pruebas (1-16).

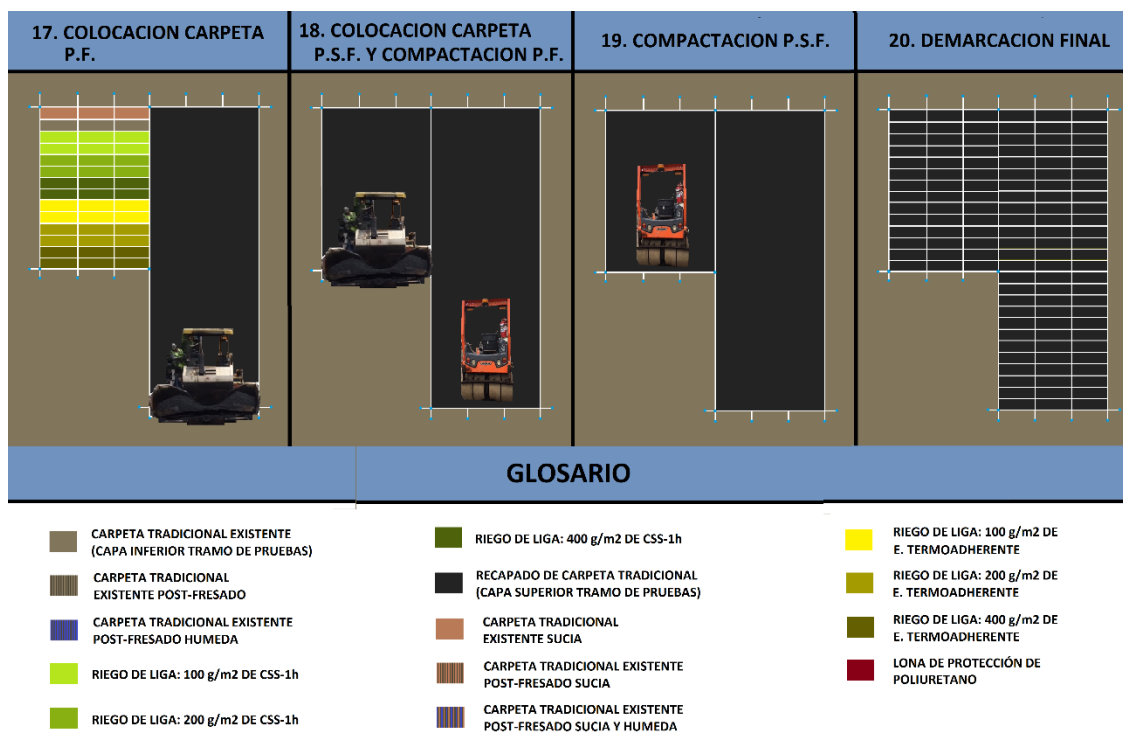


Ilustración 30: Esquema representativo de secuencia constructiva del tramo de pruebas (17-20) y glosario.

PROCEDIMIENTOS

1. Tizado de las pistas: Luego de realizar labores de limpieza de remoción de agentes externos, tales como barro seco con hidrolavadora y polvo con material orgánico vegetal mediante el equipo soplador, se procede a sectorizar la zona de faena por medio de conos, cintas de peligro y la señalética respectiva, que indique que todo el sector comprendido, corresponde a una zona de trabajo, prohibiendo el tránsito de terceros sin previa autorización del personal competente. Con la superficie preparada, se procede a delimitar las zonas respectivas de la pista fresada y la pista sin fresar, mediante tizado con lienza. La duración del tizado toma 10 minutos aproximadamente.

2. Fresado: Por medio de la fresadora descrita anteriormente, se fresan 3 centímetros de la capa asfáltica correspondiente a la carpeta preexistente que, posteriormente, pasa a ser la capa inferior de soporte. La zona intervenida con esta maquinaria, comprende sólo la zona fresada, con dimensiones de 3,4 metros de ancho y 13 metros de largo (pista derecha). Luego de remover dicho espesor, se realizan labores de limpieza post-fresado mediante un equipo barredor y un equipo soplador. La duración de todas estas labores mencionadas, tardan 1 hora y media aproximadamente.

3. Demarcación de combinaciones: Con los implementos adecuados, se marcan todos los puntos de referencia mediante pedazos de lona clavadas en el asfalto, lo que en la jerga de terreno se denominan como “ponchos”, y luego se procede a delimitar las zonas para cada combinación de variables mediante tizado con lienza. La primera labor se realiza con una persona en un tiempo aproximado a una media jornada. La segunda labor, se realiza con tres personas, de las cuales, dos ayudan a sujetar los extremos de la lienza y la otra se encarga de entizar y soltarla. La duración de este trabajo tarda un tiempo aproximado de 1 hora.

4. Aplicación de suciedad en “Zonas Sucias”: Cuidando que la superficie de toda el área del tramo de pruebas se encuentre limpia, mediante barrido y el equipo soplador, se procede

posteriormente a colocar de forma manual y controlada, cantidades uniformes de polvo roca para la pista sin fresar y material particulado del fresado en la pista fresada, las cuales representan la Condición Sucia de una superficie asfáltica previa a la aplicación del riego de liga. Las cantidades ya definidas, se esparcen con ayuda de brochas. Se tiene especial cuidado de no esparcir material en zonas que corresponden a la Condición Limpia. Esta labor se realiza con una persona en un tiempo aproximado de 3 horas.

5. Colocación del riego de liga en pista Sin Fresar sobre franja de 24 horas de tiempo de curado:

Con una cuadrilla de 6 personas, se procede a colocar el riego de liga mediante brochas y rodillos de baja absorción. En este procedimiento, se deben cubrir 12 combinaciones correspondientes a la pista Sin Fresar, en la franja del tiempo de curado de 24 horas. Para cada persona, corresponde un área respectiva de 2 combinaciones de dimensiones 0,5x1,13 m cada una, en consecuencia, se debe cubrir en esta etapa un área de 1,13 m² por persona y 6,78 m² en total. Las cantidades de emulsión respectivas, ya calculadas y gramadas en 6 tinetas cerradas, son destinadas para cada persona de la cuadrilla y se deben revolver cuidadosamente, evitando la producción de burbujas y permitiendo homogeneizar la mezcla, dispersando el asfalto que tiende a decantar en el fondo de las tinetas. La temperatura de las emulsiones antes de ser aplicadas, encontrándose dentro de los tarros cerrados en el exterior bajo sombra, corresponde a la ambiental, situada entre unos 25 a 30°C. La aplicación del riego de liga respectivo, para cada persona, debe comenzar en la combinación que no tiene suciedad y posteriormente a la que tiene suciedad, con el fin de no alterar las zonas limpias con agentes adheridos al rodillo o brocha. Se debe tener especial cuidado de que la aplicación sea lo más homogénea posible y que toda la emulsión dispuesta en las tinetas sea colocada. La aplicación del riego de liga en esta franja, tiene un tiempo aproximado de 7 minutos.

Tabla 26: Cantidades de emulsión aplicadas en franja de 24 h. en pista sin fresar.

CUADRILLA	AREA ASIGNADA [m ²]	TIPO DE EMULSION	CANTIDAD [g]
OPERADOR 1	1,13	CSS-1h a 100 g/m ²	270
OPERADOR 2	1,13	CSS-1h a 200 g/m ²	450
OPERADOR 3	1,13	CSS-1h a 400 g/m ²	808
OPERADOR 4	1,13	Termoadherente a 100 g/m ²	283
OPERADOR 5	1,13	Termoadherente a 200 g/m ²	474
OPERADOR 6	1,13	Termoadherente a 300 g/m ²	857

6. Aplicación de humedad en “Zonas Húmedas” de 24 horas de tiempo de curado: La aplicación de humedad, se realiza con la misma cuadrilla de 6 personas, la cual previo al momento de colocar el riego de liga, se aplica mediante pulverizadores convencionales con 75 ml/m² de agua a 12 combinaciones que consideran humedad, situadas en la franja de curado de 24 horas en la pista fresada. Ya que las temperaturas son altas por ser verano, se debe evitar cubrir el área total designada con humedad y después aplicar la emulsión. En su lugar, se aplica primero humedad en un área limitada que permita que ésta no se evapore antes de la colocación de la emulsión. El tiempo de aplicación es mínimo y se realiza prácticamente en conjunto con la aplicación del riego de liga posterior.

7. Colocación del riego de liga en Pista Fresada en franja de 24 horas de tiempo de curado:

Con la misma cuadrilla de 6 personas, se procede a colocar el riego de liga a las 24 combinaciones correspondientes a la pista fresada, en la franja de tiempo de curado de 24 horas. Para cada persona, corresponde un área respectiva de 4 combinaciones de dimensiones 0,5x1,13 m. cada una, por tal razón, se debe cubrir en esta etapa, un área de 2,26 m² por persona y 13,56 m² en total. Se emplea la

misma metodología descrita respecto al riego de liga en la pista sin fresar. El tiempo de aplicación tarda aproximadamente 20 minutos.

Tabla 27: Cantidades de emulsión aplicadas en franja de 24 h. en pista fresada.

CUADRILLA	AREA ASIGNADA [m ²]	TIPO DE EMULSION	CANTIDAD [g]
OPERADOR 1	2,26	CSS-1h a 100 g/m ²	450
OPERADOR 2	2,26	CSS-1h a 200 g/m ²	808
OPERADOR 3	2,26	CSS-1h a 400 g/m ²	1526
OPERADOR 4	2,26	Termoadherente a 100 g/m ²	474
OPERADOR 5	2,26	Termoadherente a 200 g/m ²	857
OPERADOR 6	2,26	Termoadherente a 300 g/m ²	1623

8. Protección con lona de poliuretano en zona con riego de liga de 24 horas de tiempo de curado: Luego de transcurrir 4 horas desde la colocación del riego de liga, se procede a cubrir la zona con una lona de poliuretano, que evite la acumulación de agentes externos como polvo y material orgánico sobre el riego de liga, en el tiempo restante antes de la colocación de la capa de rodado. Se hace hincapié, de que esta lona no se pega con la emulsión asfáltica, por ende, no existe alteración alguna en la película de emulsión asfáltica ya aplicada.

9. Colocación de riego de liga en Pista Sin Fresar en franja de 2 horas de tiempo de curado: Similar al procedimiento realizado en la franja de 24 horas de tiempo de curado, con la misma cuadrilla de 6 personas, se aplica el riego de liga en la zona de 2 horas de tiempo de curado.

10. Aplicación de humedad en “Zonas Húmedas” de 2 horas de tiempo de curado: Siguiendo el mismo patrón, se aplica humedad en la zona de 2 horas de tiempo de curado en la pista fresada.

11. Colocación de riego de liga en Pista Fresada en franja de 2 horas de tiempo de curado: Manteniendo el mismo procedimiento para la franja de 24 horas, se aplica emulsión asfáltica en la zona de 2 horas.

12. Colocación de riego de liga en Pista Sin Fresar en franja Sin Curar: Con la misma metodología de los otros tiempos de curado, se aplica riego de liga en la zona Sin Curar de la Pista Sin Fresar.

13. Aplicación de humedad en “Zonas Húmedas” Sin Curar: De igual forma que sus análogos, se aplica riego de liga en la zona Sin Curar de la Pista Sin Fresar.

14. Colocación de riego de liga en Pista Fresada en franja de Sin Curar: Se realiza la última aplicación de Riego de Liga en la franja Sin Curar de la Pista Fresada, con los mismos procedimientos.

15. Retiro de lonas de poliuretano: Luego de aplicar el último riego de liga, se procede a retirar las lonas de poliuretano colocadas en las franjas de 24 horas.

16. Aplicación de humedad en “Zonas Húmedas” sin riego de liga: Con la terminadora, los operadores instalados y preparados para comenzar a colocar la mezcla asfáltica de capa de rodado, se aplica la humedad respectiva a las dos únicas combinaciones que consideran humedad sin riego

de liga. Este procedimiento se debe realizar rápida y cuidadosamente. La duración de esta actividad es mínima, cercana al minuto.

17. Colocación de carpeta en Pista Fresada: Se procede a colocar la capa asfáltica superior ya descrita, mediante la terminadora, un operario y 4 trabajadores encargados de revisar y emparejar zonas singulares que requieren una afinidad que no se puede lograr con la terminadora. Las 13 toneladas de mezcla asfáltica, utilizadas para cubrir la pista fresada, se trasladan en el camión mencionado anteriormente. La temperatura de la mezcla en la colocación es de 152°C aproximadamente. Este procedimiento tarda aproximadamente unos 30 minutos.

18. Compactación en Pista Fresada y colocación de carpeta en Pista Sin Fresar: Se compacta la mezcla colocada en la pista fresada con el rodillo mixto ya especificado, realizando las pasadas necesarias para lograr a lo menos, una compactación del 97% del Diseño Marshall. La temperatura de compactación corresponde a 143°C aproximadamente. Mientras pasa el rodillo sobre la zona derecha del tramo de pruebas, según el proceso número 18 en la Ilustración 30, se procede a colocar la mezcla en la pista sin fresar de igual forma que en la pista fresada; para este caso es necesario recargar la terminadora con mezcla asfáltica desde el camión mencionado. La duración de estas dos actividades en paralelo, tarda aproximadamente unos 20 minutos.

19. Compactación Pista Sin Fresar: Luego de colocar la mezcla y de compactar la pista fresada, se hace pasar el rodillo mixto en la pista sin fresar, con la misma temperatura de compactación y el mismo número de pasadas. Esta actividad tarda aproximadamente unos 10 minutos.

20. Demarcación: Finalmente, luego de transcurrir 2 días, se procede a demarcar las 114 combinaciones respectivas en el tramo de pruebas, mediante tizado con 3 personas, con una duración de 40 minutos.

4.10. Extracción de testigos

La extracción de testigos, se realiza por medio de una testiguera a motor bencinero. Esta herramienta está especialmente diseñada para remover mediante perforación, una muestra cilíndrica de asfalto. El procedimiento se realiza con brocas cilíndricas de punta diamantada y con ayuda de agua, la cual escurre por el centro de la broca al momento de estar perforando el pavimento. La duración de la extracción tarda aproximadamente entre 7 a 10 minutos por muestra, dependiendo del desgaste que tenga la punta diamantada. Para extraer los 456 testigos, se utilizaron 4 brocas en total. Tomando en consideración los “ponchos” ubicados a la orilla del tramo de pruebas que sirven como referencia para demarcar con tiza y lienza las distintas áreas antes de aplicar liga y sobre el recapado, no existe problema alguno para asegurar que la posición del testigo coincida con cada condición de la evaluación.

Luego de extraer cada testigo, inmediatamente se remueve el material de base granular en la parte inferior, con el propósito de dejar el testigo lo más limpio posible, evitando tener complicaciones al ajustarse posteriormente en la mordaza. Ya que los testigos en su mayoría contienen riego de liga, es fundamental no dejarlos expuestos al sol directamente o a altas temperaturas, ya que la liga se puede reactivar, alterando de manera significativa los resultados del ensayo de corte LCB. También es importante no apilarlos ni someterlos a cargas de peso, ya que éstas pueden deformar y alterar la muestra. Los testigos una vez extraídos, se guardan en pallets protegidos del sol y de la humedad, dejándolos secar de forma natural, sin utilizar hornos secadores que alteren la adherencia entre las capas asfálticas.



Ilustración 31: Extracción de testigos del tramo de pruebas.

4.11. Metodología de ensayo de corte LCB

Para poner en funcionamiento el ensayo de corte LCB del laboratorio de Caminos de Barcelona, desarrollado en la Universidad de Cataluña, España, implementado hace unos años en Chile, se deben considerar las especificaciones de la norma NLT-382/08, que tiene los siguientes aspectos:

4.11.1. Acondicionamiento térmico de testigos

Luego de la extracción, se procede a realizar el acondicionamiento térmico de los testigos, por un tiempo mínimo de 3 horas a $20 \pm 1^\circ\text{C}$, según las especificaciones de la norma NLT-382/08. El acondicionamiento se realiza en la sala de desgaste de los ángeles del CDI, sector previamente aislado, seco y sin acceso de luz solar, donde se controla continuamente la temperatura. Cabe mencionar, que la confección de la mordaza y el procedimiento de ensayo de corte LCB, se realiza dentro de esta misma sala, de manera de que la temperatura sea única y no se vea alterada por agentes externos o el estado del clima.

4.11.2. Confección de mordaza

La confección de la mordaza se realiza de acuerdo a las especificaciones de la norma ya mencionada, referidas al “Dispositivo B”, el cual *“consiste en una mordaza cilíndrica desmontable en dos mitades, según un plano de corte a dos generatrices opuestas, en la que se introduce el testigo de ensayo. La mordaza debe tener un diámetro interior de 101.6 o 150 mm y está prevista de un sistema de cierre mediante tornillos u otro procedimiento adecuado, que mantenga el testigo firmemente sujeto en su interior. La interfaz del testigo debe sobresalir 5 mm del extremo de la mordaza. Una vez dispuesto el testigo dentro de la mordaza y cerrada ésta, se coloca el conjunto en posición horizontal sobre una base con dos puntos de apoyo separados 188 mm. La separación entre la interfaz del testigo y el punto de apoyo más cercano a dicha interfaz será también de 5 mm. El punto de aplicación de la carga estará en una posición equidistante de los dos puntos de apoyo del conjunto, el cual actúa por tanto como una viga biapoyada, donde la sección de ensayo, al estar muy próxima al punto de apoyo, sólo está sometida a esfuerzo cortante.”* Fuente: Norma NLT-382/08. Es importante mencionar, que existe un espesor mínimo de 20 mm para cualquier capa perteneciente a una probeta o testigo que se ensaye y se coloque dentro de la mordaza. Un testigo que no cumpla este requerimiento, resultará imposible de ajustar en la mordaza.

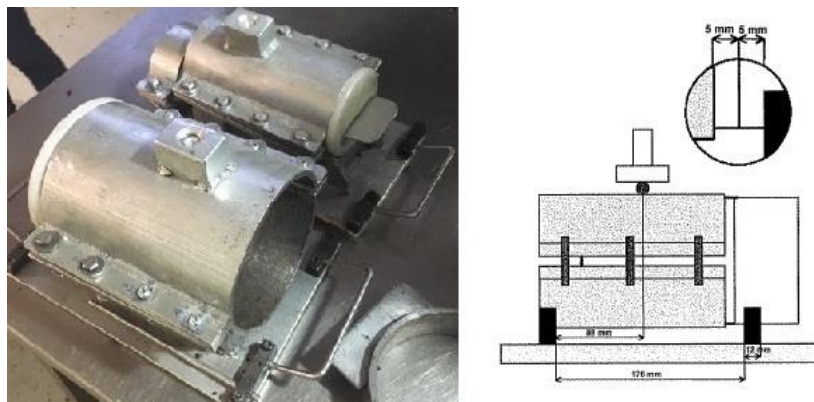


Ilustración 32: Mordazas de sujeción para testigos de 4 y 6 pulgadas (izq.) y detalle de encaje del dispositivo B (der.).

4.11.3. Procedimiento de ensayo

Mediante un dispositivo compuesto por una prensa de compresión mecánico o servo-hidráulico, se aplica una carga de 50 kN como mínimo. Éste mide la resistencia a las tensiones tangenciales provocada en la unión de dos capas asfálticas, adheridas o no por un riego de liga. Durante el ensayo, se deben registrar los valores de carga en Newton y el desplazamiento en milímetros, a través del tiempo hasta la separación de las capas. Las características principales del Ensayo de Corte LCB son las siguientes:

- Permite evaluar la adherencia entre capas de mezcla bituminosa, al determinar el esfuerzo cortante puro necesario para que dos capas asfálticas se separen.
- Este ensayo permite, tanto el control de calidad alcanzada en obra mediante la rotura de testigos, como la evaluación del efecto de diferentes riegos de liga, sean testigos o probetas confeccionadas en laboratorio.
- El análisis de fuerzas del ensayo queda representado en el esquema de la Ilustración 33.
- La velocidad de carga, corresponde a 2,5 mm/min, la cual es aplicada en el centro de la distancia entre apoyos.
- La interfaz entre las dos capas, será perpendicular al eje longitudinal del testigo, siendo 5 mm la desviación máxima aceptable respecto del plano normal a dicho eje para testigos de 100 mm de diámetro, y 7,5 mm para los de 150 mm.
- Para el dispositivo B utilizado, la resistencia de corte se calcula con la siguiente expresión:

$$T_c = \frac{F_{m\acute{a}x}/2}{S}$$

Dónde:

S es la superficie de la sección transversal, en mm², F_{máx} corresponde a la carga máxima de rotura arrojada por la prensa y T_c es la resistencia de corte en N/mm² (MPa), aproximando a la primera cifra decimal. Para la determinación de estos parámetros de adherencia, se ensayan 4 testigos por combinación y se calcula el promedio de las magnitudes anteriores como resultado.

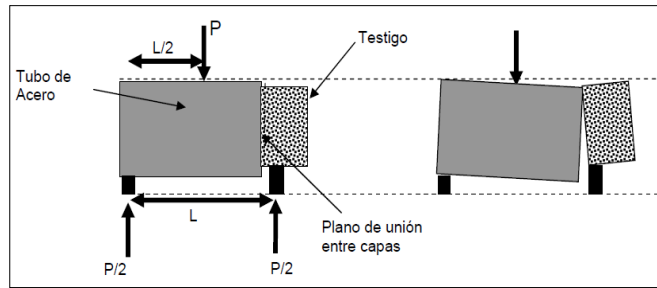


Ilustración 33: Representación de cargas aplicadas del dispositivo de ensayo de corte LCB a mordaza.

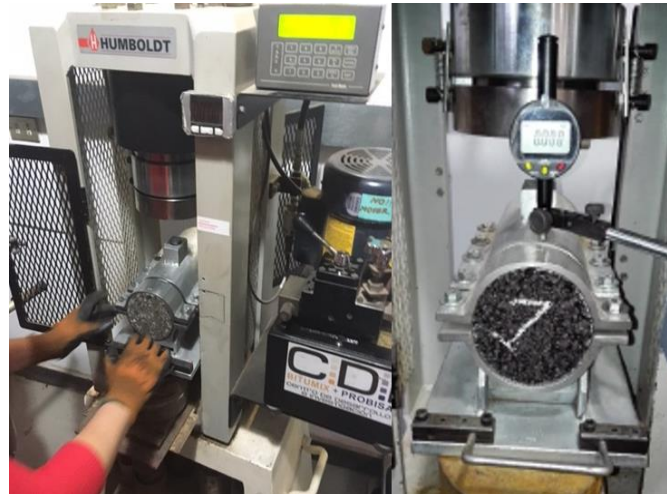


Ilustración 34: Dispositivo de corte LCB.



Ilustración 35: Detalle del dial utilizado para medir deformación.



Ilustración 36: Detalle del plano de corte en sistema mordaza-testigo.

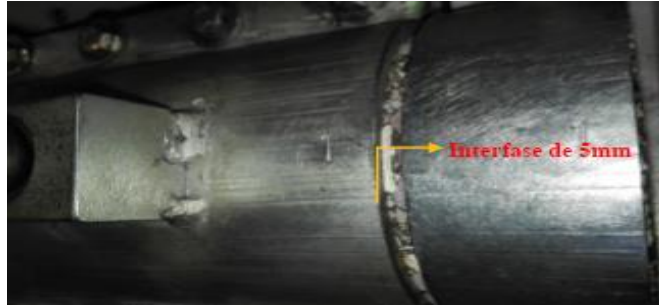


Ilustración 37: Detalle de interfaz en testigo dentro de mordaza.



Ilustración 38: Testigo post-ensayo de corte LCB.

Los resultados quedan registrados en la Ficha Tipo del Ensayo de Corte LCB del CDI, adjuntada en los anexos, firmada por Juan Cea Chacón, jefe del laboratorio. En ésta, se registran los siguientes datos:

- Identificación del testigo.
- Tipo de liga y dosis.
- Fecha de extracción.
- Fecha de ensayo.
- Diámetro del testigo.
- Espesor de la capa superior.
- Espesor de la capa inferior.
- Temperatura de ensayo ($20 \pm 1^\circ\text{C}$ para todos los casos).
- Velocidad de carga (2.5 mm/min para todos los casos).
- Carga máxima en Newton.
- Tiempo de acondicionamiento en horas.
- Deformación máxima de rotura en milímetros.
- Resistencia al corte de cada testigo en Mega pascales.
- Promedio de la resistencia de los 4 testigos, para cada combinación, en Mega pascales.
- Niveles correspondientes para cada variable.
- Observaciones.

5. CAPÍTULO V: RESULTADOS Y ANÁLISIS

5.1. Resistencia v/s deformación en el tiempo y estado último

Al momento de someter los testigos al Ensayo de Corte LCB, por medio del Gráfico 22, se pueden observar las curvas de carga aplicada v/s deformación, para tres testigos correspondientes a diferentes combinaciones, las cuales se distinguen por la dosis residual de emulsión, al utilizar CSS-1h, para una superficie fresada, limpia y húmeda. En él, se puede contemplar además, que las curvaturas de las curvas pueden no ser del todo similares, indicando que los testigos pueden tener una resistencia al corte similar, pero con una capacidad de deformación diferente. A consecuencia de que el enfoque de este estudio se centra en evaluar la influencia de distintas variables en el nivel de adherencia de capas asfálticas, se dejará de lado el comportamiento de los testigos durante la aplicación de carga, centrándose sólo en el estado último de rotura (final de la curva), que corresponde al instante en que las dos capas asfálticas son separadas. Por lo tanto, cuando se hable del nivel de adherencia entre capas asfálticas, se hablará de la resistencia al corte último antes de que los testigos se fisuren en su interfaz, al someterse en el dispositivo de corte LCB.



Gráfico 22: Curvas de carga v/s deformación para testigos sometidos a ensayo de corte LCB.

5.2. Análisis de repetitividad del ensayo de corte LCB en CDI

Para verificar un funcionamiento correcto del dispositivo de ensayo de corte LCB, que permita reproducir de forma fidedigna la adherencia, a través de los datos de resistencias al corte, entregados por el software de la prensa, se requiere analizar la repetitividad de una cierta cantidad de estructuras que sean “idénticas”. Se les puede nombrar como idénticas entre comillas, puesto que el asfalto no es un material isotrópico, pues se compone de distintos materiales, cada uno con diferentes propiedades físico-químicas, además de la aleatoriedad presente en la distribución de los agregados y el cemento asfáltico luego de la compactación, haciendo imposible la confección de estructuras que sean idénticas respecto a sus propiedades mecánicas y térmicas en las tres direcciones del plano cartesiano. Al tomar un número de estructuras que sean de un mismo material, tomando en consideración lo dicho anteriormente, y manteniendo de forma rigurosa, constantes otros parámetros que pueden influir en los resultados, tales como el operador, los procedimientos para ajustar el testigo en la mordaza, la temperatura ambiente y el posicionamiento de ésta en la prensa, se espera que las resistencias al corte de estos especímenes sean similares y no presenten

valores con altas dispersiones. Para realizar este análisis, se toman 10 testigos de recapado del tramo de pruebas construido y se proceden a ensayar, dejando como plano de falla el centro del espesor del recapado, con el fin de estimar la resistencia al corte monolítico de estos testigos. Como se puede observar en el Gráfico 23, las resistencias al corte se encuentran en un rango comprendido entre los 0,94 y 1,13 MPa, con un promedio de 1,02 MPa y una desviación estándar de 0,07 MPa. Esto refleja que los testigos ensayados presentan resultados similares, con una baja dispersión.

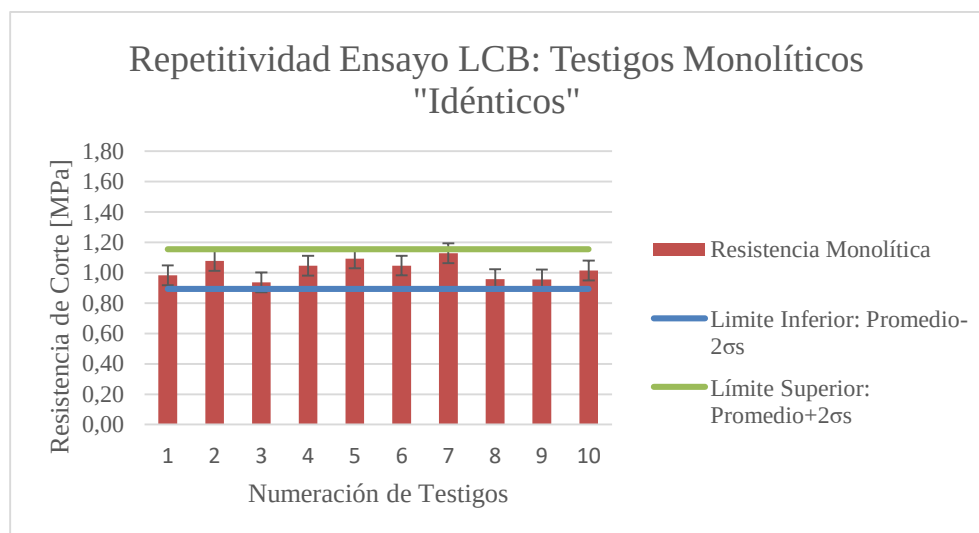


Gráfico 23: Repetitividad del ensayo de corte LCB para testigos monolíticos “idénticos”.

Además de esto, los 10 datos generados serán sometidos también a un análisis ANOVA, con el fin de desestimar o no, la hipótesis de desigualdad de medias y validar que los datos corresponden a estructuras asfálticas similares:

5.2.1. ANOVA para testigos monolíticos

Se hará el supuesto de que los datos tienen la influencia de un factor “Auxiliar”, en el cual, se dividen los 10 datos de resistencias al corte en 5 niveles, de forma aleatoria, con dos muestras cada uno:

Tabla 28: Datos de entrada para análisis ANOVA de resistencias de testigos monolíticos.

Input Análisis ANOVA T. Monolíticos	
VARIABLE DE RESPUESTAS	Resistencia de Corte MPa.
TRATAMIENTOS POSIBLES	1
NIVELES	5
MUESTRA	2 por cada nivel
DATOS	10 Testigos
FACTORES	A, B, C, D, E (Sigla MINITAB)

Para el análisis de varianza, se plantea la siguiente hipótesis, donde se presupone igualdad de varianzas, con un nivel de significancia $\alpha = 0,05$:

$$\text{Hipótesis: } \begin{cases} H_0: \text{Todas las medias son iguales.} \\ H_1: \text{No todas las medias son iguales.} \end{cases}$$

Ingresando los datos al programa MINITAB, se obtiene lo siguiente:

Información del factor

Factor	Niveles	Valores
Auxiliar	5	A; B; C; D; E

Análisis de Varianza

Tabla 29: Análisis de varianza para testigos doble capa en MINITAB, Fuente: Elaboración Propia.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Auxiliar	4	0,01020	0,002551	0,45	0,768
Error	5	0,02812	0,005624		
Total	9	0,03832			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0,0749940	26,63%	0,00%	0,00%

Medias

Auxiliar	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
A	2	1,0301	0,0670	(0,8937; 1,1664)
B	2	0,9911	0,0780	(0,8548; 1,1275)
C	2	1,0704	0,0328	(0,9341; 1,2067)
D	2	1,0431	0,1214	(0,9068; 1,1794)
E	2	0,9856	0,0414	(0,8493; 1,1219)

Desv.Est. agrupada = 0,0749940

Nivel de significación: $\alpha = 0,05$

P-valor: 0,768

Decisión: Como $0,768 > 0,05$. Se acepta la hipótesis nula.

Conclusión: Con una significancia del 5%, se concluye que las medias “son iguales”.

Como se puede observar en la gráfica de intervalos (Gráfico 24), existe una fuerte evidencia para corroborar que las medias poblacionales de los niveles ficticios A, B, C, D y E son similares, ya que más de un 65% del rango de cada intervalo de confianza, se encuentran los 5 niveles acoplados.

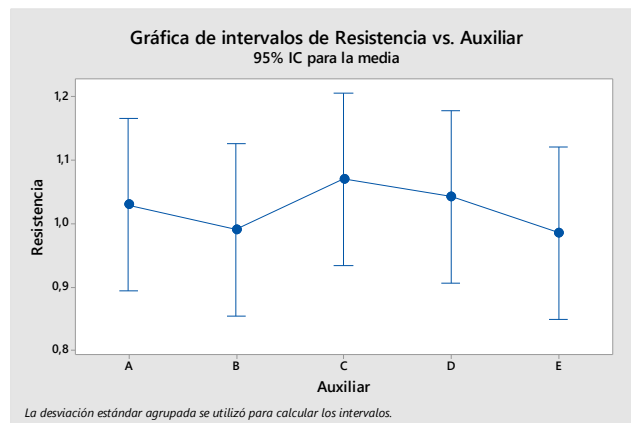


Gráfico 24: Acople de desviaciones estándar para los diferentes niveles auxiliares, Fuente: Elaboración propia en MINITAB.

Además, en el Gráfico 25, mediante el *Método LSD de Fisher*, que agrupa las diferencias de las medias entre grupos auxiliares y su respectivo intervalo de confianza al 95%, se puede observar que todos los intervalos de confianza centrados, de acuerdo a las diferencias de medias entre grupos, pasan por el valor 0, lo que indica que las medias respectivas no son significativamente distintas.

Comparaciones en parejas de Fisher

Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y una confianza de 95%

Auxiliar	N	Media	Agrupación
C	2	1,0704	A
D	2	1,0431	A
A	2	1,0301	A
B	2	0,9911	A
E	2	0,9856	A

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

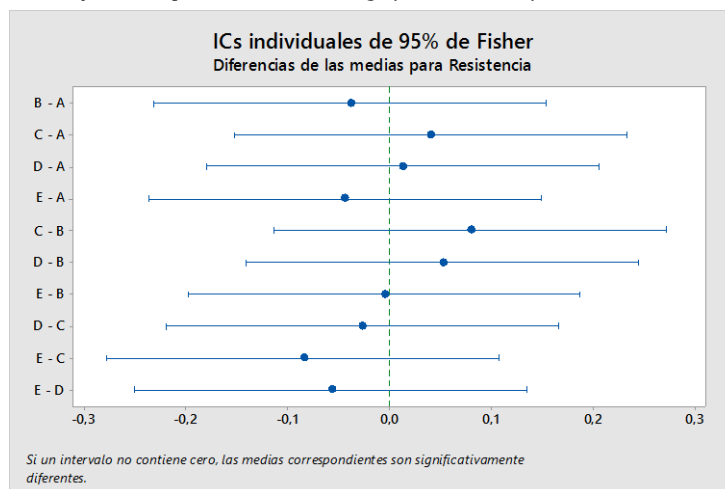


Gráfico 25: Diferencias de las medias para la resistencia de corte de elementos monolíticos similares, Fuente: Elaboración propia en MINITAB.

5.2.1.1. Verificación de supuestos del modelo ANOVA para testigos monolíticos

• PRUEBA DE NORMALIDAD DE LOS RESIDUOS

Se plantea la siguiente hipótesis:

$$\text{Hipótesis: } \begin{cases} H_0: \text{Los residuos se ajustan a la distribución normal.} \\ H_1: \text{Los residuos no se ajustan a la distribución normal.} \end{cases}$$

De acuerdo al gráfico de Normalidad de los residuos:

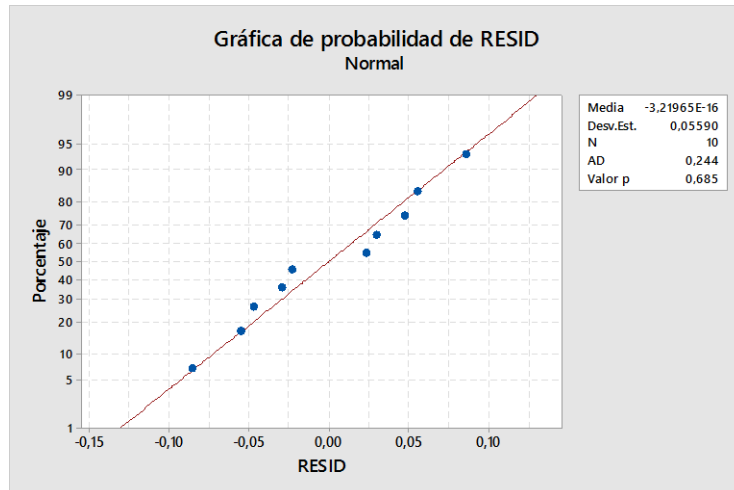


Gráfico 26: Probabilidad de los residuos del análisis ANOVA para testigos monolíticos, Fuente: Elaboración propia en MINITAB.

Nivel de significación: $\alpha = 0,05$

Estadístico de prueba (Anderson-Darling): $AD = 0,244$

P-valor: 0,685

Decisión: Como $0,685 < 0,05$. No se rechaza la hipótesis nula.

Conclusión: Con una significancia del 5%, se concluye que los residuos se ajustan a una distribución normal.

- **PRUEBA DE HOMOGENEIDAD DE VARIANZAS (HOMOCEDASTICIDAD)**

Se plantea la siguiente hipótesis, tomando en cuenta según los resultados anteriores, que los residuos se ajustan a la distribución normal:

$$\text{Hipótesis: } \begin{cases} H_0: \text{Las varianzas son iguales (homogéneas).} \\ H_1: \text{Al menos una varianza es distinta.} \end{cases}$$

Por medio de la prueba de igualdad de varianzas en MINITAB, se obtiene el valor p de la Prueba de Barlett:

Método	Estadística de prueba	Valor p
Bartlett	1,44	0,836

Nivel de significación: $\alpha = 0,05$

Estadístico de prueba de Barlett: 1,44

P-valor: 0,836

Decisión: Como $0,836 > 0,05$. No se rechaza la hipótesis nula.

Conclusión: Con una significancia del 5%, se concluye que las varianzas son homogéneas.

- **PRUEBA DE INDEPENDENCIA DE LOS DATOS**

Se plantea la siguiente hipótesis:

$$\text{Hipótesis: } \begin{cases} H_0: \text{Los datos son independientes y aleatorios.} \\ H_1: \text{Los datos no son independientes y aleatorios.} \end{cases}$$

Según la gráfica de los residuos v/s el orden de observación (Gráfico 27), los datos de residuos se encuentran distribuidos de forma aleatoria en torno al eje de las abscisas, lo que indica que los valores de resistencias al corte son independientes.

Conclusión: Con una significancia del 5%, se concluye que los datos son independientes y aleatorios.

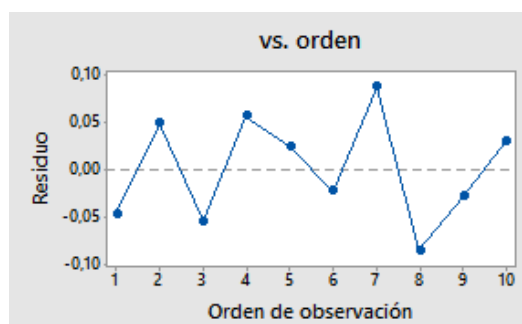


Gráfico 27: Residuos v/s Orden de observación del ANOVA para testigos monolíticos, Fuente: Elaboración propia en MINITAB.

Por todo lo anterior, dada las conclusiones de las hipótesis del análisis ANOVA, los datos de resistencias al corte de testigos monolíticos iguales, indican que no existe una influencia considerable por parte de algún factor que no se pueda controlar, por ende, el ensayo de corte LCB en CDI, se considera válido para poder representar la adherencia entre capas asfálticas. Posteriormente, centrándose en el análisis de datos de las resistencias doble capa, se establece primero un criterio de aceptación que permita de forma cuantitativa, validar o rechazar la existencia de una real diferencia entre las resistencias al corte comparadas entre sí, producto de un cambio en el nivel de alguna variable de influencia en la adherencia. Para ello, considerando que los datos correspondientes a estos 10 testigos distribuyen de forma normal, considerando un nivel de confianza del 95%, se determina el intervalo de confianza; conformado por el límite inferior, que corresponde a la media menos dos veces la desviación estándar y al límite superior, que corresponde a la media más dos veces la desviación estándar. En función de este intervalo de confianza, se valida que existe una real diferenciación de adherencia, producto de un cambio de variable de influencia, a todos los valores que presenten diferencias superiores a cuatro veces la desviación estándar, en este caso 0,26 MPa. En caso contrario, no se puede establecer que realmente ese cambio de variable influye considerablemente en la unión de capas asfálticas, ya que al comparar estos valores entre sí, se presentan diferencias suficientemente bajas, las que pueden ser muy similares a la dispersión de estructuras idénticas. Además de este criterio, los datos de las resistencias doble capa también serán sometidos a un análisis ANOVA, con el fin de comparar ambos métodos y ver si existe alguna similitud entre ellos.

5.3. ANOVA para las variables del estudio (Resistencias doble capa)

Tabla 30: Datos de entrada para análisis ANOVA de resistencias doble capa.

Input Análisis ANOVA				
VARIABLE DE RESPUESTA	Resistencia al Corte [MPa]			
TRATAMIENTOS	108 Combinaciones (con riego de liga)			
MUESTRA	4 Testigos Doble Capa por combinación			
DATOS	432 Testigos	NIVELES (sigla Minitab)		
FACTORES CUALITATIVOS	Tipo de Superficie	Fresado (a1)	Sin Fresar (a2)	
	Tipo de Emulsión	CSS-1h (c1)	Termoadherente (c2)	
	Limpieza	Sucio (e1)	Limpio (e2)	
	Humedad	Húmedo (f1)	Seco (f2)	
FACTORES CUANTITATIVOS	Dosis Residual g/m2	100 (d2)	200 (d3)	400 (d4)
	Tiempo de Curado h	0 (b1)	2(b2)	24 (b3)

El objetivo principal en este numeral, es determinar si existe una real influencia por parte de los 6 factores considerados, y si se pueden verificar los supuestos de normalidad, homogeneidad e independencia. Los datos considerados en este análisis, se acotan a aquellos testigos que cuentan con emulsión asfáltica en su interfaz, por tal razón, el análisis ANOVA en el programa MINITAB, considera un total de 432 datos de resistencias al corte en mega pascales.

- **EFEECTO DE VARIABLES EN RESISTENCIA AL CORTE**

De acuerdo al análisis de varianza arrojado en el programa MINITAB, se obtiene el siguiente cuadro:

Análisis de Varianza

Tabla 31: Análisis de varianza para testigos doble capa en MINITAB, Fuente: Elaboración Propia.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Superficie	1	24,1689	24,1689	999,46	0,000
Curado	2	2,8564	1,4282	59,06	0,000
Emulsión	1	0,4849	0,4849	20,05	0,000
Dosis	2	0,4990	0,2495	10,32	0,000
Limpieza	1	0,0357	0,0357	1,48	0,225
Humedad	1	0,0308	0,0308	1,27	0,260
Error	423	10,2290	0,0242		
Falta de ajuste	99	6,5649	0,0663	5,86	0,000
Error puro	324	3,6641	0,0113		
Total	431	45,2204			

A fin de estimar si existe o no influencia de cada variable en la resistencia al corte, se plantean las siguientes hipótesis, con sus respectivas conclusiones en función de la Tabla 31.

Hipótesis 1 (Tipo de Superficie): $\begin{cases} H_0: \text{No hay efecto del tipo de superficie en la resistencia al corte.} \\ H_1: \text{Hay efecto del tipo de superficie en la resistencia al corte.} \end{cases}$

Nivel de significación: $\alpha = 0,05$

Estadístico de prueba: $F = 999,46$

P-valor: 0,000

Decisión: Como $0,000 < 0,05$. Se rechaza la hipótesis nula.

Conclusión: Con una significancia del 5%, se concluye que existe un efecto en la resistencia al corte, producto del tipo de superficie.

Hipótesis 2 (Tiempo de Curado): $\begin{cases} H_0: \text{No hay efecto del tiempo de curado en la resistencia al corte.} \\ H_1: \text{Hay efecto del tiempo de curado en la resistencia al corte.} \end{cases}$

Nivel de significación: $\alpha = 0,05$

Estadístico de prueba: $F = 59,06$

P-valor: 0,000

Decisión: Como $0,000 < 0,05$. Se rechaza la hipótesis nula.

Conclusión: Con una significancia del 5%, se concluye que existe un efecto en la resistencia al corte, producto del tiempo de curado.

Hipótesis 3 (Tipo de Emulsión): $\begin{cases} H_0: \text{No hay efecto del tipo de superficie en la resistencia al corte.} \\ H_1: \text{Hay efecto del tipo de superficie en la resistencia al corte.} \end{cases}$

Nivel de significación: $\alpha = 0,05$

Estadístico de prueba: $F = 20,06$

P-valor: 0,000

Decisión: Como $0,000 < 0,05$. Se rechaza la hipótesis nula.

Conclusión: Con una significancia del 5%, se concluye que existe un efecto en la resistencia al corte, producto del tipo de emulsión.

Hipótesis 4 (Dosis Residual): $\begin{cases} H_0: \text{No hay efecto de la dosis residual en la resistencia al corte.} \\ H_1: \text{Hay efecto de la dosis residual en la resistencia al corte.} \end{cases}$

Nivel de significación: $\alpha = 0,05$

Estadístico de prueba: $F = 10,32$

P-valor: 0,000

Decisión: Como $0,000 < 0,05$. Se rechaza la hipótesis nula.

Conclusión: Con una significancia del 5%, se concluye que existe un efecto en la resistencia al corte, producto de la dosis residual.

Hipótesis 5 (Grado de Limpieza): $\begin{cases} H_0: \text{No hay efecto de la limpieza en la resistencia al corte.} \\ H_1: \text{Hay efecto de la limpieza en la resistencia al corte.} \end{cases}$

Nivel de significación: $\alpha = 0,05$

Estadístico de prueba: $F = 1,48$

P-valor: 0,225

Decisión: Como $0,225 > 0,05$. No se rechaza la hipótesis nula.

Conclusión: Con una significancia del 5%, se concluye que no existe un efecto en la resistencia al corte, producto del grado de limpieza antes del riego de liga, si se considera polvo roca y RAP en las pistas sin fresar y fresada, respectivamente.

Hipótesis 6 (Grado de Humedad): $\begin{cases} H_0: \text{No hay efecto de la humedad en la resistencia al corte.} \\ H_1: \text{Hay efecto de la humedad en la resistencia al corte.} \end{cases}$

Nivel de significación: $\alpha = 0,05$

Estadístico de prueba: $F = 1,27$

P-valor: 0,260

Decisión: Como $0,260 > 0,05$. No se rechaza la hipótesis nula.

Conclusión: Con una significancia del 5%, se concluye que no existe un efecto en la resistencia al corte, producto de la humedad post-fresado.

5.3.1. Verificación de supuestos del modelo ANOVA para testigos doble capa

- **PRUEBA DE NORMALIDAD DE LOS RESIDUOS**

Se plantea la siguiente hipótesis:

$$\text{Hipótesis: } \begin{cases} H_0: \text{Los residuos tienen distribución normal.} \\ H_1: \text{Los residuos no tienen distribución normal.} \end{cases}$$

De acuerdo al gráfico de Normalidad de los residuos:

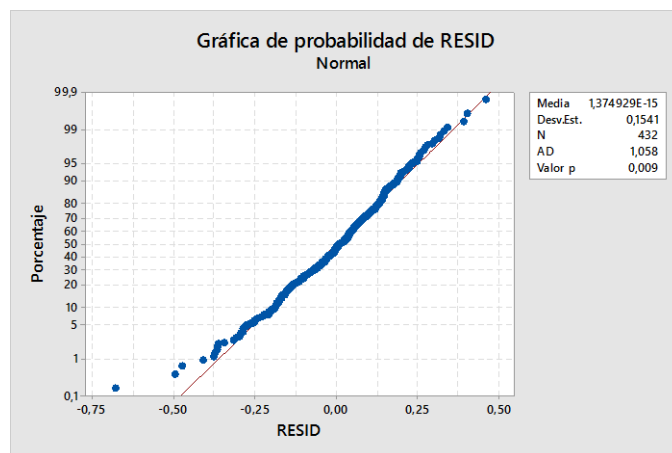


Gráfico 28: Grafica de probabilidad de los residuos (Prueba de normalidad, MINITAB), Fuente: Elaboración propia.

Nivel de significación: $\alpha = 0,05$

Estadístico de prueba (Anderson-Darling): $AD = 1,058$

P-valor: 0,009

Decisión: Como $0,009 < 0,05$. Se rechaza la hipótesis nula.

Conclusión: Con una significancia del 5%, se concluye que los residuos no se ajustan a la distribución normal.

• PRUEBA DE HOMOGENEIDAD DE VARIANZAS (HOMOCEDASTICIDAD)

Se plantea la siguiente hipótesis, tomando en cuenta según los resultados anteriores, que la prueba no se basará en la distribución normal:

$$\text{Hipótesis: } \begin{cases} H_0: \text{Las varianzas son iguales (homogéneas).} \\ H_1: \text{Al menos una varianza es distinta.} \end{cases}$$

De acuerdo a lo obtenido por los intervalos de confianza de Bonferroni, para desviaciones estándar, se obtiene el valor p mediante el Método de Pruebas Múltiples y el estadístico de pruebas con el Método de Lavenne:

Pruebas

Tabla 32: Prueba de homogeneidad de varianzas en MINITAB, Fuente: Elaboración propia.

Método	Estadística de prueba	Valor p
Comparaciones múltiples	—	0,039
Levene	1,66	0,000

Nivel de significación: $\alpha = 0,05$

Estadístico de prueba: 1,66

P-valor: 0,039

Decisión: Como $0,039 > 0,05$. No se rechaza la hipótesis nula.

Conclusión: Con una significancia del 5%, se concluye que las varianzas son homogéneas. NOTA: no se puede mostrar el resumen gráfico, ya que no se pueden calcular los múltiples intervalos de comparación.

- **PRUEBA DE INDEPENDENCIA DE LOS DATOS**

Se plantea la siguiente hipótesis:

Hipótesis: $\begin{cases} H_0: \text{Los datos son independientes y aleatorios.} \\ H_1: \text{Los datos no son independientes y aleatorios.} \end{cases}$

Según la gráfica de los residuos v/s el orden de observación (Gráfico 29), los datos de residuos se encuentran distribuidos de forma aleatoria en torno al eje de las abscisas, lo que indica que los valores de resistencias al corte son independientes.

Conclusión: Con una significancia del 5%, se concluye que los datos son independientes y aleatorios.

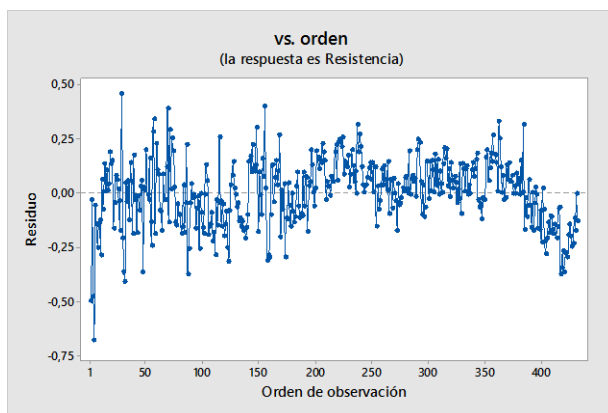


Gráfico 29: Residuos v/s Orden de observación del ANOVA para testigos doble capa, Fuente: Elaboración propia en MINITAB.

5.4. Capas con riego de liga v/s sin riego de liga

Se realiza una comparación entre los resultados de testigos doble capa con riego de liga v/s sin riego de liga, del tramo de pruebas confeccionado, con el fin de evaluar qué tan importante puede llegar a ser en la provisión de adherencia a las capas asfálticas, en el caso de una capa soporte asfáltica de mayor edad y un recapado. Los 114 combos (456 testigos doble capa), se reordenan en el Gráfico 30, el cual contiene en la abscisa la condición sin riego de liga (dosis residual de 0 g/m²), y las otras 3 condiciones con riego de liga (dosis residuales de 100, 200 y 400 g/m²). Como se puede observar, las resistencias al corte promedio de cada combinación que contienen riego de liga (CSS-1h y Termoadherente en todas su dosis) se encuentran comprendidas en un rango entre 0,53 y 1,43 MPa. Distinto es lo que ocurre para las combinaciones que no contienen riego de liga. Aquellas que no usan riego de adherencia, y en las que se aplica humedad antes de colocar el recapado, llegan a tener resistencias al corte nulas. Se entiende como valor nulo de resistencia al corte LCB de 0 MPa, a todo testigo en el cual se desprenden sus dos capas, al momento de ser extraídos en la testiguera, o al momento de ser instalados en la mordaza antes de ensayarse en el dispositivo de la prensa servo- hidráulica, esto quiere decir, que para que ambas capas sean desprendidas entre sí, solo se requiere una mínima fuerza (como la fuerza centrípeta de la testiguera o el apretar testigo en mordaza) prácticamente despreciable, en comparación a la fuerza que aplica el dispositivo LCB, denotando una unión totalmente débil. En el caso que no se aplica humedad,

para los gráficos de condición fresada, sin riego de liga, las resistencias promedio no son nulas, pero alcanzan valores bastante bajos que no alcanzan los 0,15 MPa. Tampoco existe un traslape entre los valores de resistencias de estos dos casos opuestos, ya que la diferencia en la magnitud de sus resistencias es muy considerable. Los valores de adherencia para el caso en el que no se aplica emulsión, fluctúan entre los 0,13 y 0,15 MPa, y a pesar de que la diferencia entre resistencias con liga y sin liga disminuye en la superficie sin fresar, ésta sigue siendo considerable, además de no contar con desviaciones estándar traslapadas.

Por otro lado, si se comparan los datos de condición fresada y sin fresar, para el caso que no se aplica emulsión, y tomando en cuenta que la superficie está seca, los valores son bastante similares, teniendo levemente mejores resultados la condición sin fresar. En consecuencia, de acuerdo a los datos obtenidos, y observando de forma general los casos con y sin riego de liga, se puede apreciar que las resistencias al corte que cuentan con esta aplicación de emulsión, son considerablemente mayores que aquellas que no cuentan con ella. Esta diferencia se acrecienta aún más para superficies fresadas. Es importante señalar además, que para el caso de las combinaciones sin fresar, no se aplica humedad antes de la colocación del riego de liga. Curiosamente no se encuentran resistencias con valores nulos, por lo tanto, de acuerdo a estos resultados, la aplicación de humedad en combinaciones sin riego de liga, antes de la colocación del recapado, afectaría de forma muy negativa la adherencia entre capas asfálticas, haciendo que la ligazón entre estos elementos sea prácticamente nula. Ya que los resultados obtenidos presentan una clara tendencia si se compara cuantitativamente los casos con y sin riego de liga, se puede determinar que para pavimentos asfálticos doble capa, en los cuales éstas no son colocadas de forma consecutiva, es decir, en casos que se requiere una reparación de alguna capa de rodado dañada la cual se fresa o no, y a la cual posteriormente se le coloca un recapado, existiendo una notoria diferencia de edad en éstas, el riego de liga es indispensable para proveer adherencia entre dichas estructuras asfálticas y no se debería, bajo ninguna circunstancia, prescindir de esta aplicación.

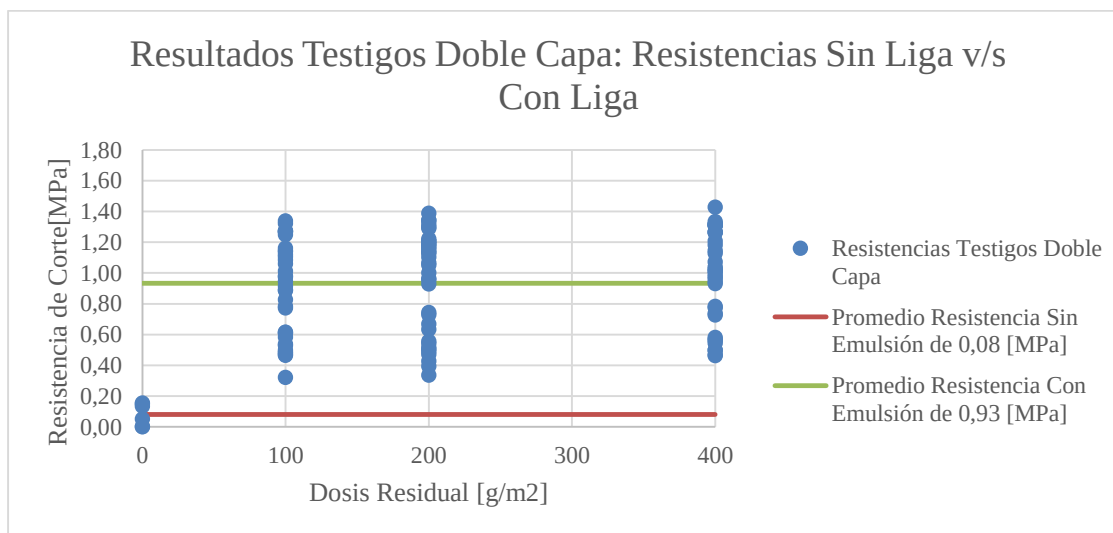


Gráfico 30: Comparación de resistencias doble capa con liga v/s sin liga.

5.5. Relación de dosis de liga v/s resistencia al corte

Se desea determinar si existe o no, alguna relación entre las dosis aplicadas de emulsión, medidas con la dosis residual, y las resistencias al corte que se obtienen en el ensaye LCB, para las dos emulsiones consideradas en este estudio. En caso de existir una correlación matemática que permita relacionar estos parámetros, surge la interrogante de estimar, en caso de ser posible, un

óptimo para la resistencia al corte, con el fin de utilizar de mejor forma los recursos requeridos para proveer adherencia entre las capas asfálticas. En función de la matriz de ensayos, se tienen resultados de resistencias para 4 dosis, correspondientes a 0, 100, 200 y 400 g/m². De acuerdo a las 114 combinaciones, con sus 456 resultados, se confeccionan 18 gráficos para la Emulsión CSS-1h y 18 gráficos para la Emulsión Termoadherente. El Gráfico 31, corresponde a un ejemplo que exhibe esta estructura señalada. En la ordenada, se contienen las resistencias al corte en mega pascales, para los 4 resultados obtenidos por combinación, por lo tanto, el gráfico contiene 16 puntos; 4 para cada una de las dosis residuales correspondientes, las cuales se sitúan en la abscisa. Al confeccionar estos gráficos, se realiza una correlación Polinómica de grado 2, en los que se adjuntan los siguientes datos: Curvas de representación de la Correlación Polinómica de dosis y resistencia, Ecuación de la Correlación Polinómica de grado 2, Coeficiente de Correlación y Dosis Óptima Virtual según la correlación del gráfico.

Debido a las limitaciones de recursos, las mediciones de resistencia sólo se realizan de forma discreta con 4 puntos en la abscisa (dosis residuales). Lo ideal sería medir más puntos y formar una curva que tendiese a ser continua con datos empíricos, pero ya que esto no se puede realizar, se opta por utilizar, con ayuda matemática, una curva Polinómica que interpole y proyecte las supuestas resistencias al corte, para ciertas dosis residuales, situadas entre los puntos de los datos obtenidos empíricamente en el dispositivo LCB. De acuerdo a esta proyección, se podrá estimar el Óptimo Virtual, que corresponde a la dosis residual mínima en g/m² necesaria para obtener una máxima resistencia al corte en MPa. La Dosis Residual Óptima virtual se denomina con tal calificativo, debido al hecho existente de que éste no corresponde a un dato real, si no que a una interpolación entre datos reales obtenidos, que corresponden a los puntos obtenidos para las dosis de 100, 200 y 400 g/m². La ecuación matemática respectiva, corresponde al respaldo de la curva Polinómica, y según su coeficiente de correlación, se podrá caracterizar la dispersión de los datos y determinar de forma criteriosa, si esta representación matemática es acorde o no. Por motivos prácticos, los 36 gráficos de correlación de dosis residual y resistencia al corte, se combinan, con el fin de ser reducidos a 2 gráficos para CSS-1h, y 2 gráficos para la E. Termoadherente. Los gráficos no combinados se adjuntan en la sección de Anexos.

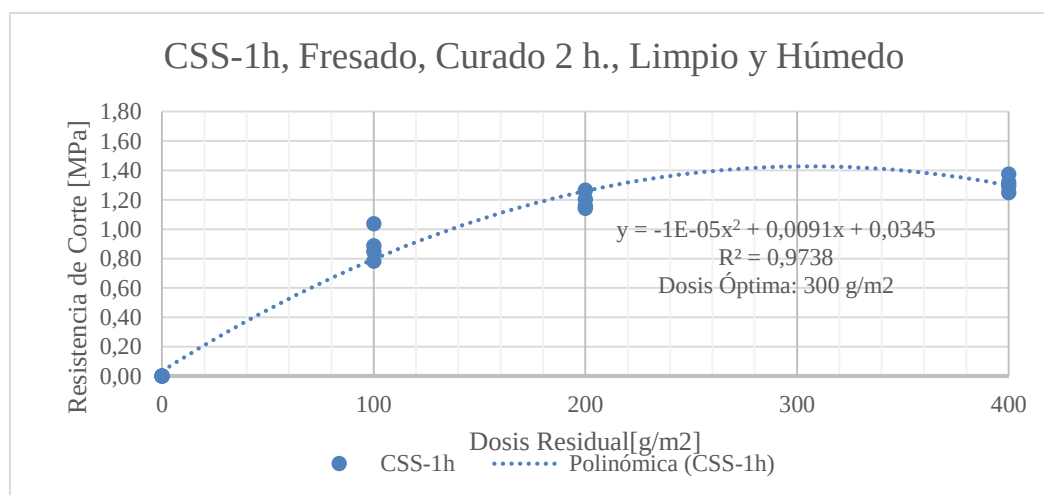


Gráfico 31: Dosis v/s Resistencia al corte detallado (CSS-1h, Fresado, Curado 2 h., Limpio y Húmedo).

5.5.1. Resultados de dosis con CSS-1h

Los gráficos reducidos, cada uno, contienen 12 curvas Polinómicas, las cuales tienen en común el tipo de emulsión utilizada y el tipo de superficie. Se diferencian entre sí, su tiempo de

curado, su condición de limpieza (sucia, limpia) y su condición de humedad en las superficies fresadas (húmeda, seca). En la parte derecha, que corresponde a la leyenda del gráfico, se indica el tipo de combinación respectiva. Como se puede observar en el gráfico de las condiciones fresadas con CSS-1h (Gráfico 32), las curvas Polinómicas presentan coeficientes de correlación bastante buenos, con un promedio de 0,88 y valores comprendidos entre 0,83 y 0,97, salvo por un único valor disperso de 0,65, como se puede observar en la Tabla 33. De acuerdo a esto, se puede inferir que la curva Polinómica de segundo grado, representa de buena forma la relación de dosis residual y resistencia al corte, al utilizar como riego de liga CSS-1h en superficies fresadas.

Respecto a las curvas Polinómicas propiamente tal, se observa que todas éstas (Gráfico 32), presentan una curvatura pronunciada y similar, con pendiente positiva y negativa a lo largo del gráfico. Esto indica la presencia de un óptimo virtual único, ya que la utilización de dosis cercanas a cero, no provoca un efecto adherente deseado, y una cantidad excesiva de dosis de emulsión, disminuiría también la resistencia al corte entre las capas asfálticas. Las dosis residuales óptimas, según la Tabla 33, se encuentran comprendidas entre 270 y 300 g/m², con un promedio aproximado de 282 g/m², alcanzando resistencias al corte situadas entre los 1 y 1,7 MPa. Es importante mencionar además, que las otras condiciones relacionadas con el nivel de limpieza y humedad, no influyen de forma considerable en donde se sitúe el óptimo. Esto se puede corroborar en los datos de dosis óptima de la Tabla 33, que no difieren de manera significativa.

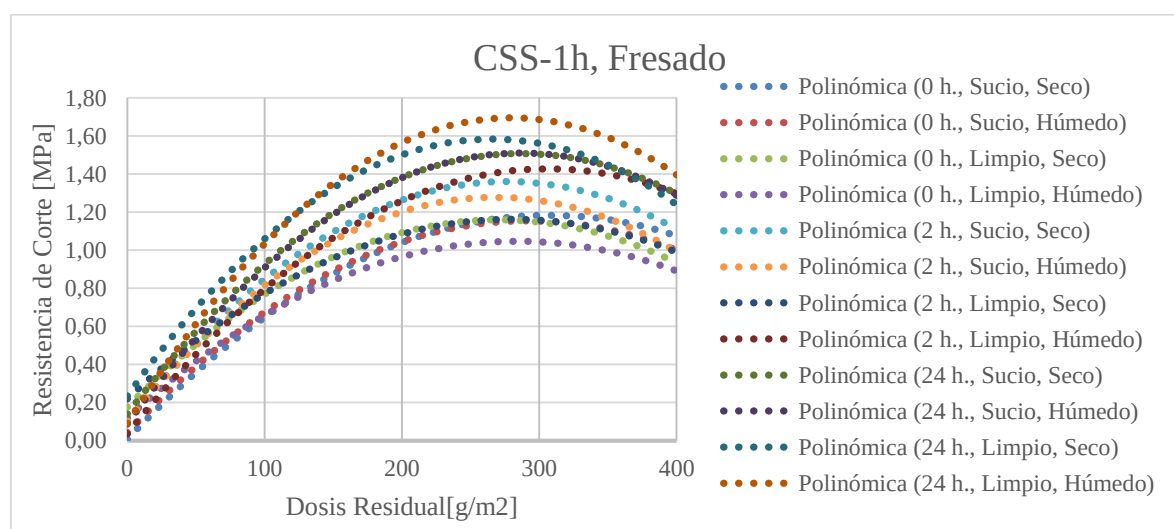


Gráfico 32: Dosis v/s Resistencia al corte (CSS-1h, Fresado).

Tabla 33: Dosis óptimas y coeficiente de correlación para CSS-1h en Pista Fresada.

Combinaciones CSS-1h con Superficie Fresada	R ²	Dosis Óptima [g/m ²]
Sin Curar, Sucio y Seco	0,88	300
Sin Curar, Sucio y Húmedo	0,93	280
Sin Curar, Limpio y Seco	0,85	270
Sin Curar, Limpio y Húmedo	0,65	280
Curado 2 h., Sucio y Seco	0,93	280
Curado 2 h., Sucio y Húmedo	0,83	270
Curado 2 h., Limpio y Seco	0,88	270
Curado 2 h., Limpio y Húmedo	0,97	300
Curado 24 h., Sucio y Seco	0,89	290
Curado 24 h., Sucio y Húmedo	0,91	290
Curado 24 h., Limpio y Seco	0,91	270
Curado 24 h., Limpio y Húmedo	0,93	280

Promedio R^2	0,88
Promedio Dosis Óptima CSS-1h [g/m²]	281,7

Tomando ahora en cuenta el gráfico correspondiente al uso de emulsión CSS-1h en una superficie sin fresar (Gráfico 33), se puede observar que estas curvas presentan una menor curvatura y pronunciamiento de sus pendientes en comparación con las curvas de condiciones de superficie fresada, además de alcanzar valores bastante más bajos de resistencia al corte. Se hace hincapié que en este gráfico, a diferencia del anterior, sólo existen seis curvas, atendido a que no se considera la condición de humedad. Las curvas Polinómicas en estos casos, presentan coeficientes de correlación menores, pero aun aceptables, con un promedio de 0,76, y valores comprendidos entre 0,63 y 0,86, tal como se puede observar en la Tabla 34. Con esto, se puede aceptar también, que la curva Polinómica de segundo grado representa de buena forma la relación de dosis residual y resistencia al corte, al utilizar como riego de liga CSS-1h en superficies sin fresar. Una diferencia importante existente, que se hace notar al comparar los gráficos de condición fresada con los sin fresar, al utilizar CSS-1h, es que en los segundos, no necesariamente va a existir un sólo valor de resistencia al corte máxima. En las dos curvas de tiempo de curado de 2 horas, se puede ver que, luego de alcanzar los 300 g/m² de dosis residual, se mantiene una pendiente prácticamente nula, la cual decrece de forma casi despreciable. Esto significa que al usar dosis residuales superiores a 300 g/m² la resistencia al corte se mantiene estable hasta decaer levemente al aproximarse a los 400 g/m² de dosis residual. De acuerdo a este comportamiento, la ubicación del óptimo virtual corresponde al valor mínimo de dosis residual necesario para permitir una resistencia igual o cercana a los valores máximos de resistencias, alcanzados por la curva Polinómica. La denominación de este punto, se debe determinar de manera más criteriosa, porque en casos cuando la pendiente es cercana a 0 en una extensión considerable del gráfico, pero que no logra alcanzar a ser nula, pueden existir dosis residuales considerablemente diferentes con resistencias levemente distintas, por ende, se debe considerar como óptimo, el punto que sopesa la mayor resistencia posible, sin el desmedro de utilizar una cantidad de emulsión excesiva y desmedida. Tomando en consideración estos criterios, las dosis residuales óptimas, según la Tabla 34, se encuentran comprendidas entre 220 y 300 g/m², con un promedio aproximado de 257 g/m², alcanzando resistencias al corte situadas entre los 0,5 y 0,8 MPa. De acuerdo a estos datos, cuando la superficie de la capa de soporte sea distinta (fresada v/s sin fresar), manteniendo el mismo tipo de emulsión, significa que esta diferencia induce un cambio en el comportamiento de la adherencia entre capas. Esto se refleja, principalmente, en las curvaturas de las curvas, en los valores de las resistencias en general y en la ubicación de los óptimos virtuales, ya que para superficies sin fresar, según lo obtenido, para lograr el óptimo se debiese considerar una menor cantidad de emulsión asfáltica, en comparación a la requerida en una pista fresada.

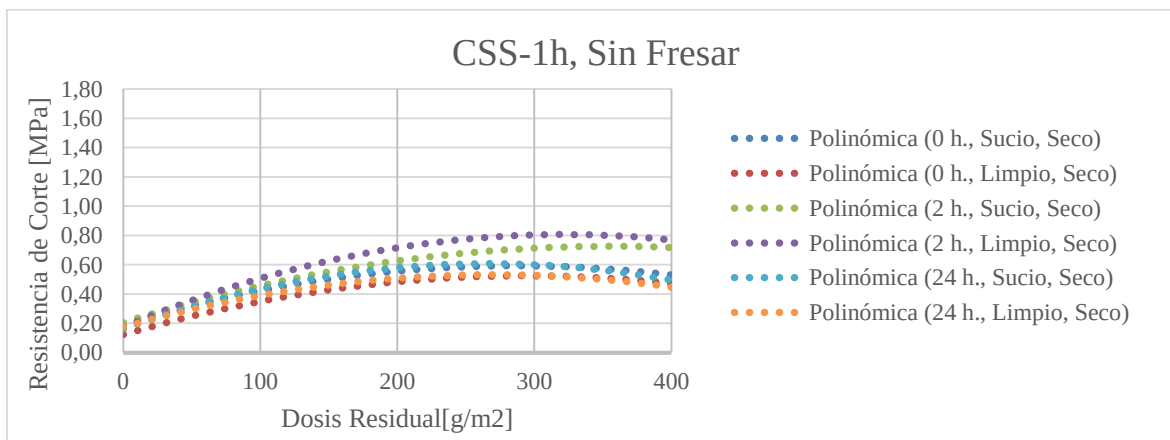


Gráfico 33: Dosis v/s Resistencia al corte (CSS-1h, Sin Fresar).

Tabla 34: Dosis óptimas y coeficiente de correlación para CSS-1h en Pista Sin Fresar.

Combinaciones CSS-1h con Superficie Sin Fresar	R ²	Dosis Óptima [g/m ²]
Sin Curar, Sucio y Seco	0,63	250
Sin Curar, Sucio y Húmedo	0,86	260
Sin Curar, Limpio y Seco	0,77	300
Sin Curar, Limpio y Húmedo	0,84	260
Curado 2 h., Sucio y Seco	0,8	220
Curado 2 h., Sucio y Húmedo	0,66	250
Promedio R²	0,76	
Promedio Dosis Óptima CSS-1h [g/m²]	256,7	

5.5.2. Resultados de dosis con E. termoadherente

Al ejecutar el mismo análisis que se hizo para la Emulsión CSS-1h, se estudia la influencia que tiene la variación de dosis de emulsión Termoadherente en la adherencia entre capas asfálticas. El Gráfico 34, considera la condición de superficie fresada con E. Termoadherente. En él se puede observar, que el coeficiente de correlación se encuentra comprendido entre 0,77 y 0,95, con un promedio de 0,87, bastante similar al valor de 0,88 obtenido en las mismas condiciones pero con CSS-1h. Con esto, se valida igualmente, que la curva Polinómica de segundo grado se ajusta a la relación entre dosis residual y resistencia al utilizar E. Termoadherente.

En cuanto a las formas de las curvas Polinómicas en este caso (Gráfico 34), éstas presentan unas curvaturas levemente más pronunciadas, en comparación al caso fresado con CSS-1h, donde se puede distinguir, primero una pendiente positiva y, posteriormente, una pendiente negativa, indicando la presencia de un óptimo virtual único. Las dosis residuales óptimas, según la Tabla 35, se encuentran comprendidas entre 260 y 310 g/m², rango considerado más disperso en comparación con el rango de dosis óptima para CSS-1h. El promedio aproximado es de 273 g/m², el cual es inferior a su símil con la otra emulsión, alcanzando resistencias al corte situadas entre los 1,15 y 1,6 MPa.

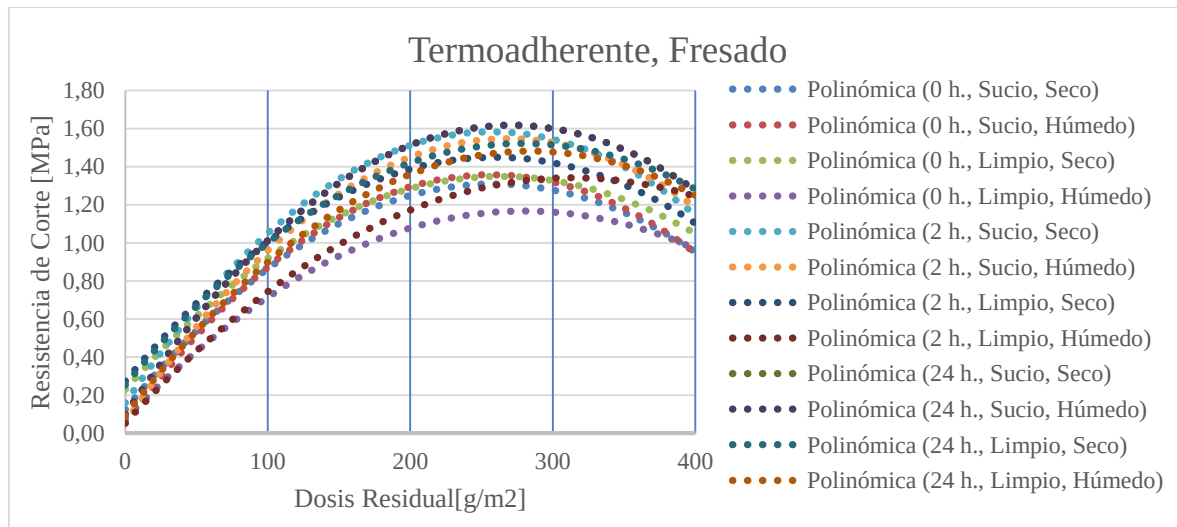


Gráfico 34: Dosis v/s Resistencia al corte (Termoadherente, Fresado).

Tabla 35: Dosis óptimas y coeficiente de correlación para E. Termoadherente en Pista Fresada.

Combinaciones E. Termoadherente con Superficie Fresada	R²	Dosis Óptima [g/m²]
Sin Curar, Sucio y Seco	0,89	270
Sin Curar, Sucio y Húmedo	0,83	260
Sin Curar, Limpio y Seco	0,82	260
Sin Curar, Limpio y Húmedo	0,88	280
Curado 2 h., Sucio y Seco	0,86	260
Curado 2 h., Sucio y Húmedo	0,95	270
Curado 2 h., Limpio y Seco	0,77	260
Curado 2 h., Limpio y Húmedo	0,94	310
Curado 24 h., Sucio y Seco	0,9	270
Curado 24 h., Sucio y Húmedo	0,91	270
Curado 24 h., Limpio y Seco	0,86	280
Curado 24 h., Limpio y Húmedo	0,88	280
Promedio R²	0,87	
Promedio Dosis Óptima E. Termoadherente [g/m²]		272,5

Al analizar el último gráfico de dosis (Gráfico 35), correspondiente al caso sin fresar con E. Termoadherente, se puede observar que las curvas presentan una menor curvatura y pronunciamiento de sus pendientes, si se comparan la condición fresada con E. Termoadherente (Gráfico 34), además de alcanzar valores menores de resistencia al corte. Las curvas Polinómicas en estos casos, presentan coeficientes de correlación similares al caso sin fresar con CSS-1h, pero menores que el caso fresado con E. Termoadherente, con un promedio de 0,76 y valores comprendidos entre 0,58 y 0,88, tal como se puede observar en la Tabla 36. En este caso, se puede aceptar también, que la curva Polinómica de segundo grado representa de buena forma la relación de dosis residual y resistencia al corte al utilizar como riego de liga la Emulsión Termoadherente en superficies sin fresar. Similar al caso análogo con CSS-1h, no existe un solo valor de dosis residual que alcance el valor de resistencia al corte máxima. Esto ocurre especialmente con los tiempos de curado de 24 horas, donde se puede observar que estas curvas, luego de alcanzar los 310 g/m² de dosis residual, mantienen una pendiente prácticamente nula, la cual permanece así hasta los 400 g/m². Esto significa, que al usar dosis residuales superiores a este valor de 310 g/m², la resistencia al corte se mantiene estable sin decaer, demostrando que no existe un aumento de resistencia al aumentar la dosis residual en estas medidas. De acuerdo a los criterios ya establecidos, las dosis residuales óptimas para condiciones Fresadas con E. Termoadherente, según la Tabla 36, se encuentran comprendidas entre 240 y 280 g/m², con un promedio aproximado de 263 g/m², alcanzando resistencias al corte situadas entre los 0,5 y 0,9 MPa. En términos generales, se observa que la curva Polinómica de segundo grado se ajusta de buena forma a los datos de resistencia al corte obtenidos empíricamente en el dispositivo de ensayo LCB, mostrando mejores correlaciones en superficies fresadas que en superficies sin fresar.

Este ajuste permite interpolar y estimar los puntos correspondientes a un óptimo virtual de dosis residual para cada condición, el cual permite maximizar la resistencia al corte entre capas asfálticas. De acuerdo a estos óptimos obtenidos, se puede inferir que el tipo de superficie influye totalmente en la forma y curvatura de las curvas, independiente del tipo de emulsión que se esté utilizando. También es importante mencionar, que los valores de dosis óptima entre una emulsión y otra, varían con las otras condiciones constantes, pero no muestran una tendencia clara, ya que el hecho de la existencia de una mínima diferencia en la magnitud de la pendiente de una curva y otra, puede alterar la ubicación del óptimo. Finalmente, realizando una comparación de las dosis óptimas entre la superficie fresada y la superficie sin fresar, se puede concluir que el tipo de superficie influye también en los requerimientos para maximizar la adherencia entre capas. Esto queda demostrado, con el hecho de que se necesita menos emulsión en una superficie sin fresar, que en

una superficie fresada, considerando de todas formas, que los valores máximos de resistencias son diferentes entre sí.

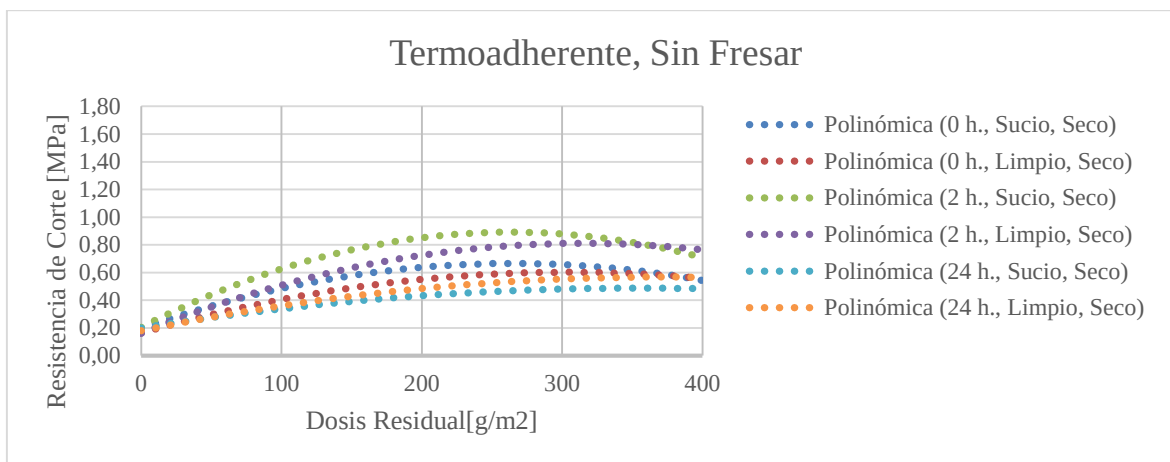


Gráfico 35: Dosis v/s Resistencia al corte (Termoadherente, Sin Fresar).

Tabla 36: Dosis óptimas y coeficiente de correlación para E. Termoadherente en Pista Sin Fresar.

Combinaciones E. Termoadherente con Superficie Sin Fresar	R ²	Dosis Óptima [g/m ²]
Sin Curar, Sucio y Seco	0,74	240
Sin Curar, Sucio y Húmedo	0,81	260
Sin Curar, Limpio y Seco	0,81	260
Sin Curar, Limpio y Húmedo	0,88	260
Curado 2 h., Sucio y Seco	0,58	280
Curado 2 h., Sucio y Húmedo	0,71	280
Promedio R²	0,76	
Promedio Dosis Óptima E. Termoadherente [g/m²]		263,3

5.6. Influencia de variables del estudio

De manera alternativa al análisis ANOVA, tomando los datos de resistencias obtenidos en el ensayo de corte LCB, de acuerdo a la matriz de ensayo de testigos doble capa de 6 pulgadas, se desea estudiar la influencia de cada variable considerada en la adherencia entre capas asfálticas, mediante un análisis comparativo entre los niveles correspondientes a cada parámetro de influencia.

Para realizar dicho análisis, se confeccionan dos tipos de gráficos para las siguientes variables:

- Tipo de Superficie de capa de soporte (Fresada, Sin Fresar)
- Tipo de Emulsión Asfáltica utilizada como riego de liga (CSS-1h, E. Termoadherente)
- Condición de Humedad en superficie de capa de soporte (Húmedo, Seco)
- Condición de Limpieza en superficie de capa de soporte (Limpio, Sucio)

La variable correspondiente a la cantidad de emulsión asfáltica aplicada como riego de liga, expresada en la Dosis Residual en g/m², se estudió en el numeral 5.4. Por tanto, queda pendiente la variable de Tiempo de Curado, la cual no considera estos gráficos de diferencia por un tema práctico, respecto a la facilidad de mostrar la información. El primer tipo de gráfico que se confecciona para cada variable, tiene como fin, estudiar la sensibilidad de cada parámetro, al

comparar cuantitativamente la adherencia para distintos niveles de una variable, dejando constantes los niveles de las otras. Éstos se denominarán como “Gráficos de Influencia”. A lo largo de la abscisa, se agrupan los puntos correspondientes a las diferentes dosis residuales de 0, 100, 200 y 400 g/m², y en la ordenada se presenta el cuociente de las resistencias al corte, obtenidas de los dos niveles respectivos para cada variable de influencia, es decir, para cada una de estas dosis, el gráfico señalado contendrá los siguientes cuocientes respectivamente:

- Resistencia Fresada [MPa] / Resistencia Sin Fresar [MPa]
(Tipo de Superficie de capa de soporte)
- Resistencia con CSS-1h [MPa] / Resistencia con E. Termoadherente [MPa]
(Tipo de Emulsión Asfáltica utilizada como riego de liga)
- Resistencia Húmeda [MPa] / Resistencia Seca [MPa]
(Condición de Humedad en superficie de capa de soporte)
- Resistencia Sucia [MPa] / Resistencia Limpia [MPa]
(Condición de Limpieza en superficie de capa de soporte)

Este valor correspondiente al cuociente, es adimensional, ya que se dividen magnitudes de esfuerzo en mega pascuales entre sí. Su orden de magnitud, para este estudio, en general fluctúa entre 0,3 y 4. Valores cercanos a 1, indican que existe bastante similitud en las resistencias al corte comparadas entre sí. El uso de este valor facilita la comparación relativa entre los efectos que produce en la adherencia, el utilizar sus niveles contrapuestos, normalizando la diferencia entre ellos y eliminando el sesgo que se puede producir al comparar alguna diferencia entre resistencias con un orden de magnitud distinto. Un punto importante a considerar en estos gráficos de influencia, es la adopción de un criterio, en el caso que ocurre cuando el numerador y denominador de este cuociente son resistencias nulas iguales a 0 MPa. Para esta situación, dado que el valor se indetermina, por consiguiente, se considerará el valor del cuociente como 1, puesto que las dos resistencias son iguales. El segundo tipo de gráficos se denominan como “Gráficos de Diferencia”, los cuales, mantienen la misma estructuración de los gráficos de influencia, salvo por el valor de su ordenada, el cual corresponde al valor absoluto de la diferencia o sustracción (resta) entre dos niveles contrapuestos para cada variable. En este caso, este número sí tiene dimensión, la cual estará en unidades de mega pascuales. Siguiendo la misma analogía, los valores de diferencia de resistencia de corte, para cada análisis de variable son los siguientes:

- | Resistencia Fresada [MPa] - Resistencia Sin Fresar [MPa] |
(Tipo de Superficie de capa de soporte)
- | Resistencia con CSS-1h [MPa] - Resistencia con E. Termoadherente [MPa] |
(Tipo de Emulsión Asfáltica utilizada como riego de liga)
- | Resistencia Húmeda [MPa] - Resistencia Seca [MPa] |
(Condición de Humedad en superficie de capa de soporte)
- | Resistencia Sucia [MPa] - Resistencia Limpia [MPa] |
(Condición de Limpieza en superficie de capa de soporte)

La utilización de este parámetro, se justifica con la necesidad de validar la existencia o no, de una real diferencia existente entre resistencias de niveles contrapuestos para cada variable. Es

por ello, que se requiere realizar una comparación entre los valores absolutos de diferencia de resistencia, con el valor obtenido del Análisis de Repetitividad para testigos de características “idénticas”. Si los puntos del gráfico de diferencia, se encuentran por debajo de este valor, designado como $R=0,26$ MPa, el cual corresponde a cuatro veces la desviación estándar de 0,07 MPa, obtenida de los valores de resistencia al corte para testigos idénticos monolíticos de recapado IV-20, significa que no existe una evidencia sólida que permita determinar mediante estos datos, si ese cambio de nivel influye y provoca diferencias considerables en la adherencia. Es por este motivo, que el análisis de influencia considera estos 2 gráficos como fuente de información para definir el comportamiento que adopta la adherencia, dependiendo de las diferentes configuraciones en las que se unen las capas asfálticas, de acuerdo a la matriz de ensayo.

5.6.1. Influencia del tipo de superficie: Fresada v/s Sin Fresar

Como se puede observar en el Gráfico 36, el cual compara la condición fresada con la condición sin fresar, para superficies sucias y secas, todos los puntos que representan situaciones en las cuales se utiliza riego de liga, se encuentran sobre el valor de 1, comprendidos entre este valor y 4. La mayoría de estos puntos, se concentran en un rango comprendido entre 1,5 y 2,5. Esto indica que la resistencia al corte de la condición Fresada supera entre 1,5 a 2,5 veces la resistencia al corte para la condición sin fresar en la mayoría de los casos. Considerando los datos extremos fuera de este rango de 1,5 y 2,5, pero que siguen dentro del intervalo en el cual la superficie fresada otorga mayor adherencia que la superficie sin fresar, se puede observar que la diferenciación mínima, corresponde para el caso en que se utiliza CSS-1h con 100 g/m^2 , Sin Curar, donde la adherencia para ambas condiciones de superficie son prácticamente iguales. La mayor diferenciación se observa al utilizar la E. Termoadherente con 200 g/m^2 , con un Tiempo de Curado de 24 horas, y de acuerdo a lo observado, esta curva presenta cierta lejanía con el resto de curvas para cada tipo de emulsión y tiempo de curado, alcanzando valores superiores al resto, donde la resistencia fresada es 4 veces la resistencia sin fresar. Algo contrario ocurre si no se utiliza riego de liga, pues según este gráfico, la resistencia, en el caso fresado, es menor que la resistencia sin fresar y no alcanza a ser ni la mitad de ésta. De acuerdo al Gráfico 36, si se utiliza riego de liga en dosis sobre 100 g/m^2 , tanto para la E. Termoadherente como para CSS-1h, independiente de las otras condiciones consideradas en este estudio, una superficie Fresada otorga considerablemente una mayor resistencia al corte, y por ende, una mayor adherencia para testigos doble capa. Distinta es la situación si no se utiliza riego de liga, visto que en ese caso, la resistencia al corte, para superficies sin fresar, es mayor que el doble de la resistencia fresada.

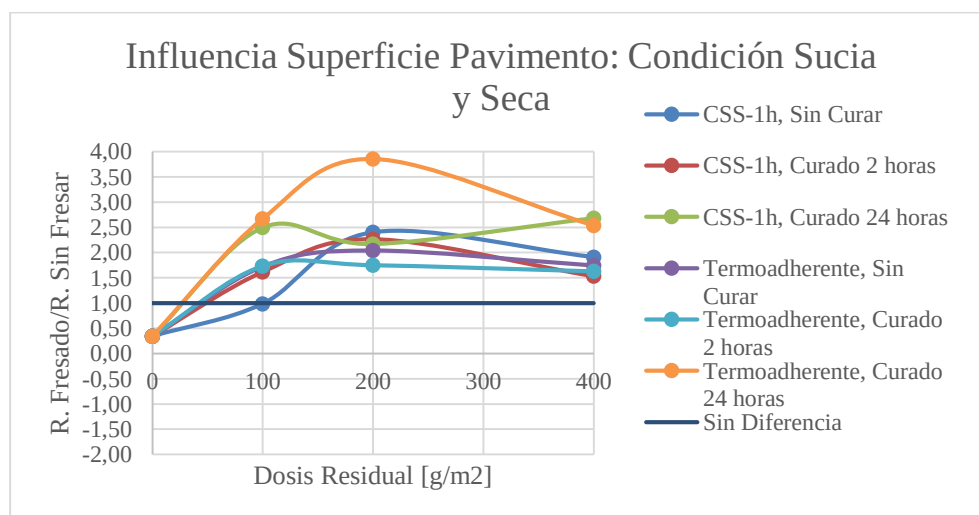


Gráfico 36: Influencia de Superficie del Pavimento (Sucio y Seco).

De acuerdo al Gráfico de Diferencia para condiciones sucias y secas (Gráfico 37), se puede ver que los puntos en los cuales se utilizan dosis residuales de emulsión superiores a 100 g/m², las diferencias entre resistencias fresadas y sin fresar se encuentran sobre el valor de diferencia mínima aceptable de $R=0,26$ MPa. Existe un único punto que no cumple con ello, el cual corresponde al caso de mínima diferenciación, descrito anteriormente en el Gráfico de Influencia. La existencia de este dato disperso, se puede atribuir a errores experimentales o constructivos, atendido a que se extralimita de toda tendencia expuesta en estos gráficos. Los otros puntos que no cumplen con el valor de diferencia mínima aceptable, corresponden al caso en que no se aplica emulsión asfáltica. Esto en parte, se debe a que las resistencias al corte son bastante bajas, sea una superficie fresada o no, por lo tanto, su diferenciación no es lo suficientemente alta para indicar si realmente una superficie sin fresar y sin riego de liga, provee mayor adherencia que una superficie fresada sin riego de liga.

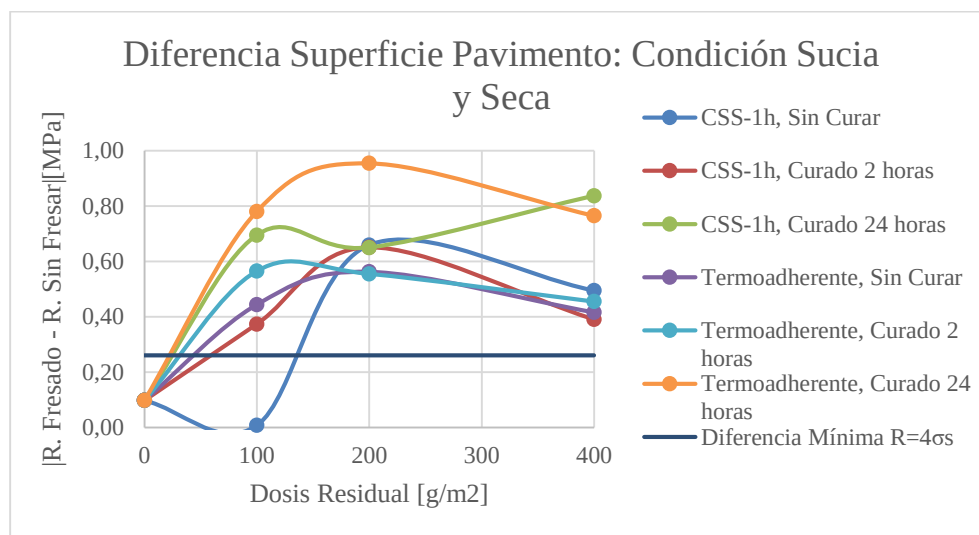


Gráfico 37: Diferencia de Superficie del Pavimento (Sucio y Seco).

Analizando ahora, el Gráfico de Influencia para los casos de condiciones limpias y secas (Gráfico 38), se puede observar que todos los puntos se sitúan sobre 1 y en su mayoría se encuentran concentrados entre 1,3 y 3, donde la mayor diferenciación entre la adherencia de superficies fresadas y sin fresar ocurre con dosis residuales de 200 g/m², para ambas emulsiones. Este comportamiento sería similar al del gráfico de Influencia para casos de condiciones sucias y secas, apoyando el hecho de que las superficies fresadas, en presencia de riegos de liga con dosis superiores a 100 g/m², proveen considerablemente una mayor adherencia que las superficies sin fresar. Una diferencia que se puede observar entre los gráficos de influencia expuestos (Gráfico 36 y Gráfico 38) es que, en el segundo de los nombrados, para los casos en que no hay riego de liga, la resistencia fresada es mayor que la resistencia sin fresar. En este caso, el factor motivante que estaría afectando este comportamiento sería, a priori, el nivel de limpieza.

En cuanto al Gráfico de Diferencia para condiciones limpias y secas (Gráfico 39), se puede observar un patrón muy similar al del gráfico de Diferencia de condiciones sucias y secas (Gráfico 37). Los puntos en su mayoría, se encuentran sobre el valor de diferencia mínima aceptable, situados entre los 0,3 y los 0,9 MPa, salvo por uno, con una diferencia de 0,23 MPa, correspondiente al caso en que se utiliza CSS-1h, con un curado de 2 horas y 400 g/m² de dosis residual, el cual se encuentra prácticamente en el límite preestablecido, por lo que en esta situación, no se considera como un dato que invalide la tendencia clara, que expresa que existe una diferencia considerable entre la resistencia fresada y la resistencia sin fresar, en presencia de riegos de liga con dosis superiores a 100 g/m².

Por lo señalado, de acuerdo al análisis de influencia, del tipo de superficie del pavimento correspondiente a la capa de soporte o capa inferior del tramo de pruebas, los gráficos de influencia y diferencia indican, que en presencia de dosis residuales de emulsión asfáltica situadas entre 100 y 400 g/m² a lo menos, e independiente de las otras condiciones consideradas en este estudio, una superficie fresada provee considerablemente una mayor adherencia entre las capas asfálticas que una superficie sin fresar.

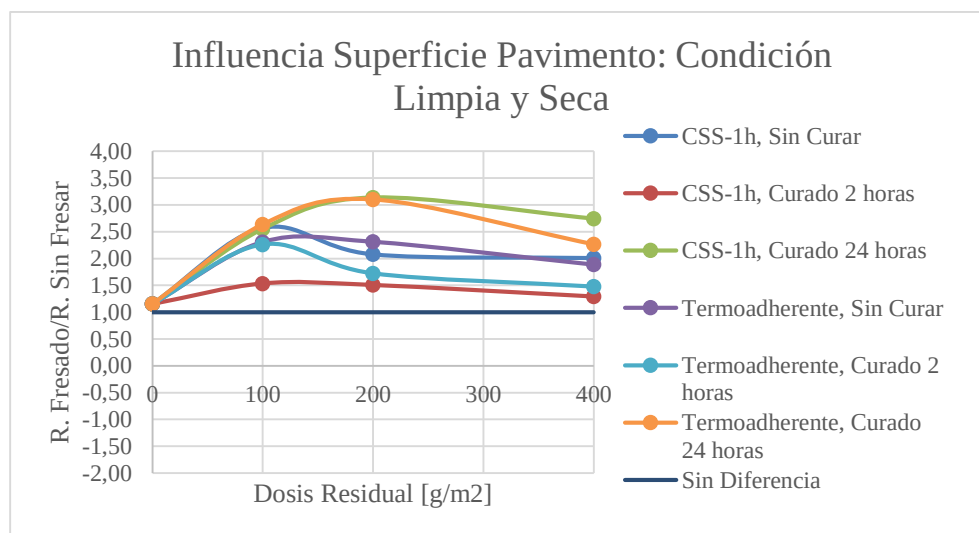


Gráfico 38: Influencia de Superficie del Pavimento (Limpio y Seco).

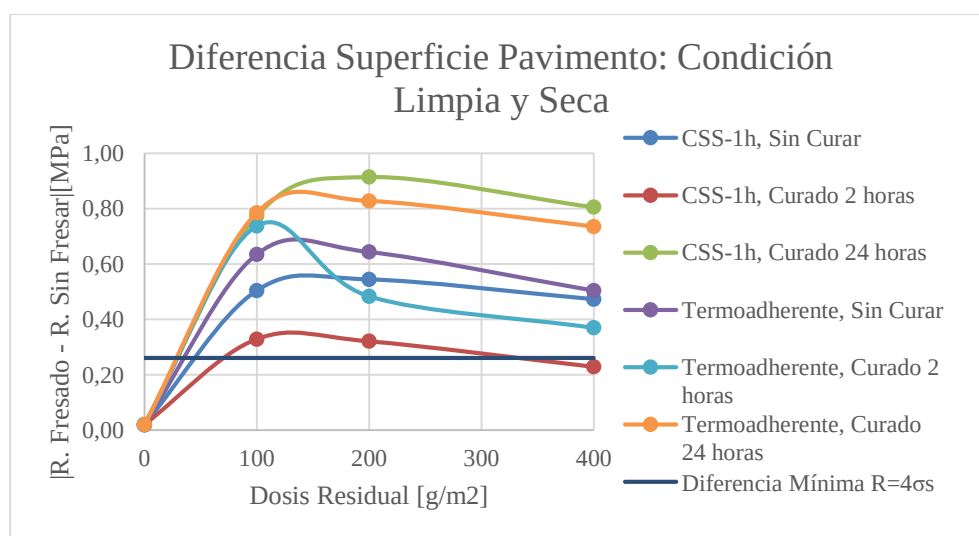


Gráfico 39: Diferencia de Superficie del Pavimento (Limpio y Seco).

5.6.2. Influencia del tipo de emulsión: CSS-1h v/s E. Termoadherente

Según lo observado en el Gráfico 40, que corresponde a la Influencia del tipo de emulsión de superficies fresadas y secas, la mayoría de los puntos se encuentran situados en un rango de 0,7 y 1,1, salvo por uno, el cual alcanza un valor cercano a 0,5 al utilizar una dosis residual de 100 g/m². Además, sólo 4 de todos los puntos totales, se encuentran sobre el valor unitario, esto quiere decir, que la emulsión Termoadherente presenta tímidamente mejores resultados respecto a la resistencia al corte. Respecto a la forma de las curvas del Gráfico 40, todas presentan una similitud entre sí,

donde se puede ver que la pendiente es más pronunciada y positiva entre los 100 y 200 g/m² y sobre los 200 g/m², ésta es prácticamente nula, denotando una baja amplitud respecto al valor unitario. Sólo dos curvas se encuentran sobre 1. Al analizar el gráfico de diferencia (Gráfico 41), se puede ver que la gran mayoría de puntos, salvo por algunos correspondientes a la dosis de 100 g/m², se encuentran bajo el valor de tolerancia mínima de 0,26 MPa, de tal modo que no se puede afirmar que la emulsión Termoadherente presenta mejores resultados que CSS-1h. El gráfico de Influencia del tipo de emulsión para superficies fresadas y húmedas (Gráfico 42), presenta curvas con pendientes menos pronunciadas que en el caso seco, con puntos situados en un rango de 0,8 y 1,2, manteniendo la tendencia de encontrarse sólo 2 de estas curvas sobre el valor unitario. El gráfico de diferencia para estas combinaciones (Gráfico 43), presenta sólo un único punto sobre el valor de tolerancia mínimo, lo que invalida una diferenciación consistente entre las resistencias al corte de superficies con la emulsión Termoadherente y CSS-1h.

Para las superficies sin fresar y secas, el gráfico de Influencia (Gráfico 44), presenta puntos situados entre 0,6 y 1,1, salvo por un punto anómalo y extremo, el cual tiene un valor cercano a 1,6, indicando una resistencia muy alta con la emulsión CSS-1h en comparación a la E. Termoadherente. El resto de curvas en su mayoría, se encuentran por debajo del valor unitario, lo que indica que se tienen resistencias al corte levemente mejores con la E. Termoadherente. Sin embargo, tomando en cuenta el gráfico de Diferencia para esta configuración (Gráfico 45), se puede observar que ningún punto supera la diferencia mínima aceptable determinada en el análisis de repetitividad, por lo tanto, tampoco existe una diferencia considerable en las resistencias de corte al utilizar CSS-1h y E. Termoadherente. En general, e independiente del tipo de superficie de la capa de soporte, ya sea fresada o sin fresar, la Emulsión Termoadherente presenta levemente mejores resultados que la emulsión CSS-1h. No obstante, ya que estas diferencias son tenues e insuficientes, no se puede afirmar, para estas condiciones, que la emulsión Termoadherente presenta mejores resultados de adherencia que la emulsión CSS-1h.

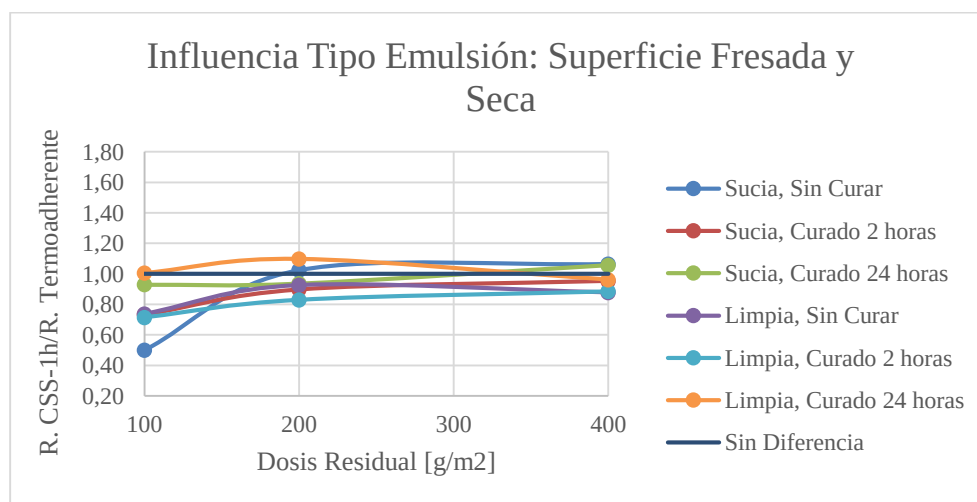


Gráfico 40: Influencia del Tipo de Emulsión (Fresado y Seco).

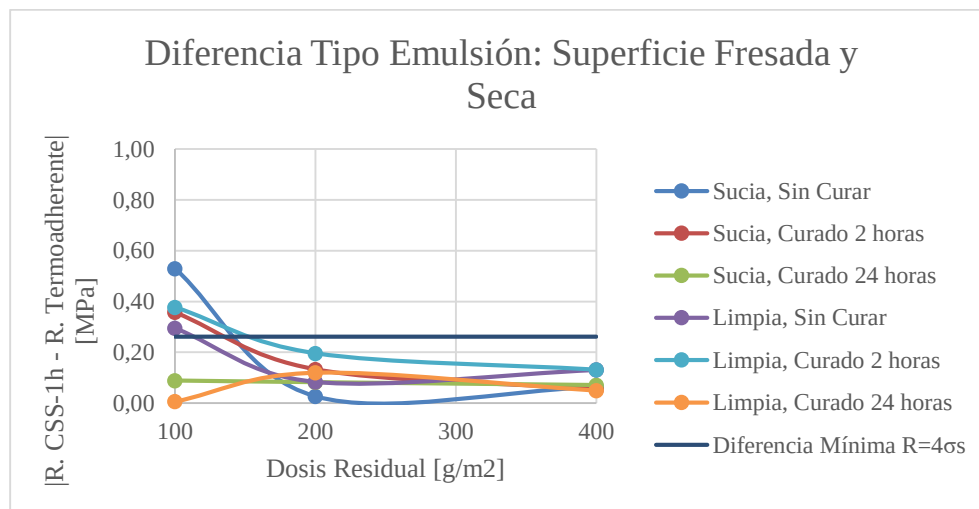


Gráfico 41: Diferencia del Tipo de Emulsión (Fresado y Seco).

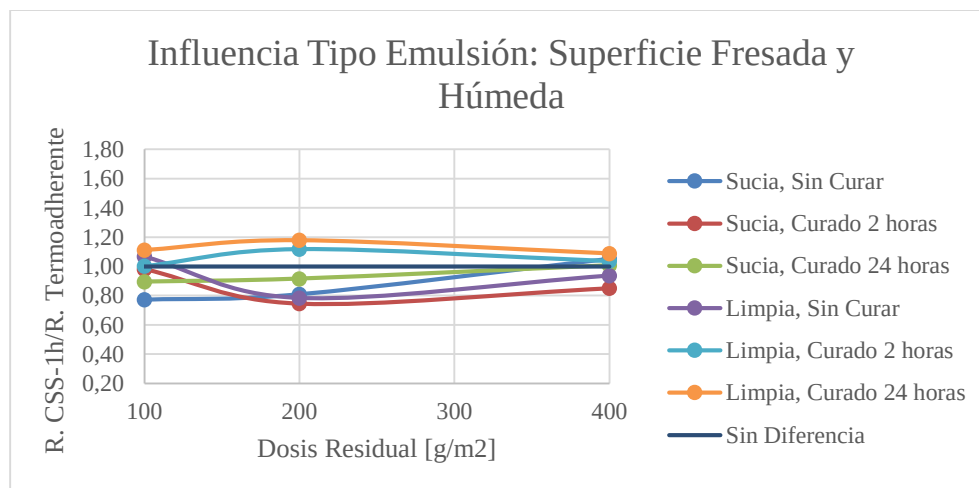


Gráfico 42: Influencia del Tipo de Emulsión (Fresado y Húmedo).

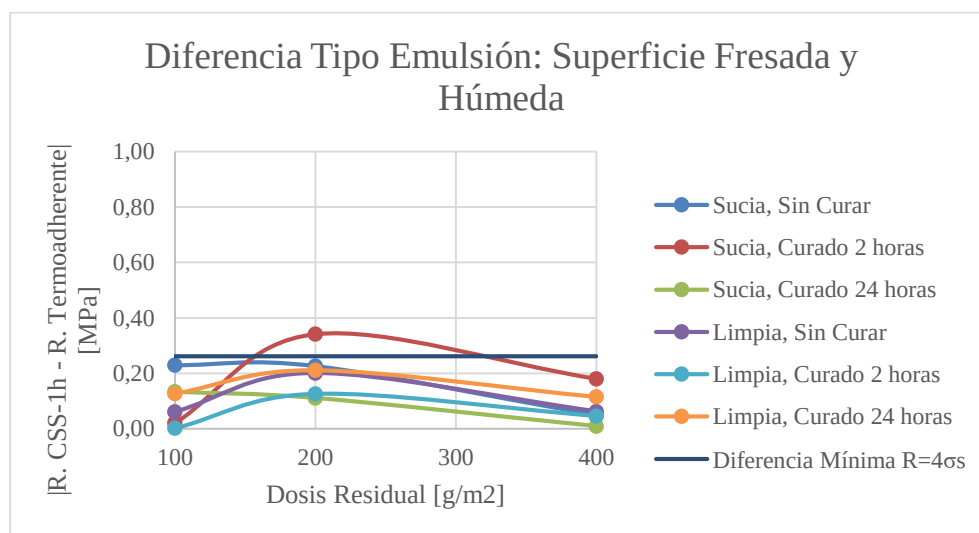


Gráfico 43: Diferencia del Tipo de Emulsión (Fresado y Húmedo).

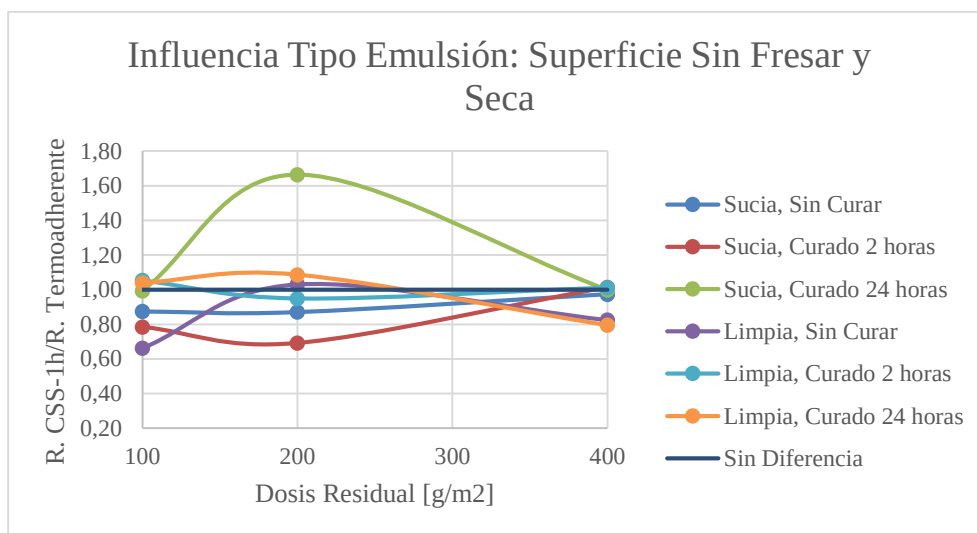


Gráfico 44: Influencia del Tipo de Emulsión (Sin Fresar y Seco).

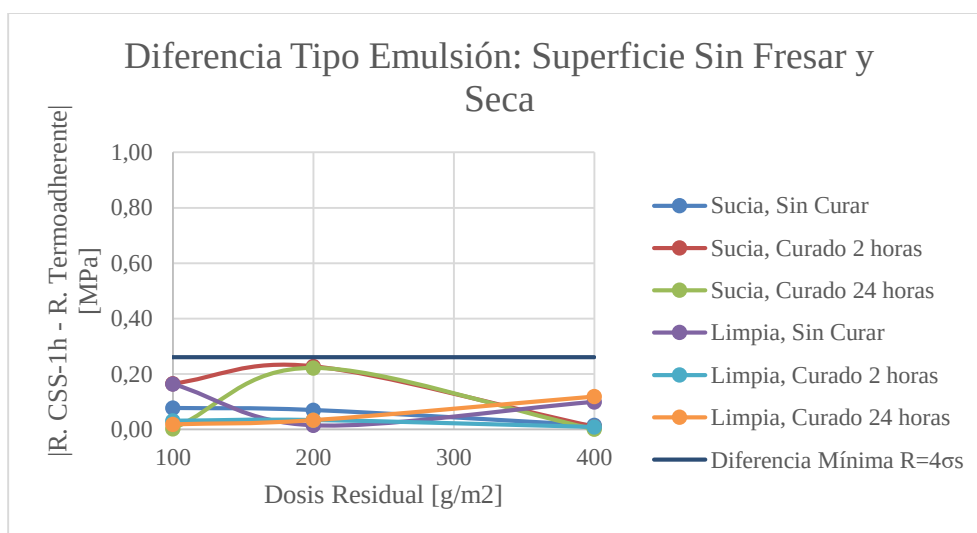


Gráfico 45: Diferencia del Tipo de Emulsión (Sin Fresar y Seco).

5.6.3. Influencia de la condición de humedad: Seca v/s Húmeda

Al realizar un análisis de los resultados, respecto a la influencia de la condición de Humedad, para superficies fresadas (la matriz de ensayo no considera la humedad en tramos sin fresar), se puede observar en el Gráfico 46, de superficies ensuciadas con material fresado, que los puntos se encuentran dispersos por debajo y sobre el valor unitario, comprendidos en el rango de 0 y 1,5. El cociente que corresponde a la combinación que no considera la aplicación del riego de liga, presentan una resistencia al corte nula para el caso húmedo y una resistencia bajísima de 0,15 MPa para la condición seca. Esto indica que, a pesar de sólo ganar 0,15 MPa, la presencia de humedad afecta considerablemente y de forma negativa, la adherencia entre capas asfálticas sin emulsiones asfálticas. Esto se puede contemplar en los puntos ubicados en el origen del gráfico, en el cual, el cociente Húmedo/seco de resistencia al corte se desploma al valor nulo. En presencia de riego de liga, el comportamiento relativo a la resistencia es diferente, pero no se puede observar que exista una tendencia que deje en evidencia la diferencia entre superficies húmedas y secas, ya que en ciertos casos, las superficies con humedad presentan valores de resistencia levemente más altos y en otros casos no. El gráfico de Diferencia de Humedad (Gráfico 47), para las condiciones Fresadas

y Secas, ratifica el hecho de que las diferencias de resistencia al corte, entre condiciones húmedas y secas, no son suficientes para determinar la existencia de una tendencia cuando se encuentran por debajo del valor mínimo admisible.

Los gráficos de Influencia y Diferencia de Humedad, para las condiciones Fresadas y Limpias (Gráfico 48 y Gráfico 49), presentan resultados muy similares a los obtenidos para superficies sucias. El primero contiene puntos situados entre 0 y 1,3, ubicados sobre y bajo la unidad, y el segundo presenta sólo 3 puntos que cumplen con el valor de diferencia mínimo aceptable. Por lo tanto y en general, se observa que las dosis de agua aplicadas en el tramo de pruebas, con el fin de emular la humedad post-fresado, no influyen de forma considerable en la adherencia de capas asfálticas de diferente edad y en las cuales se aplica riego de liga.

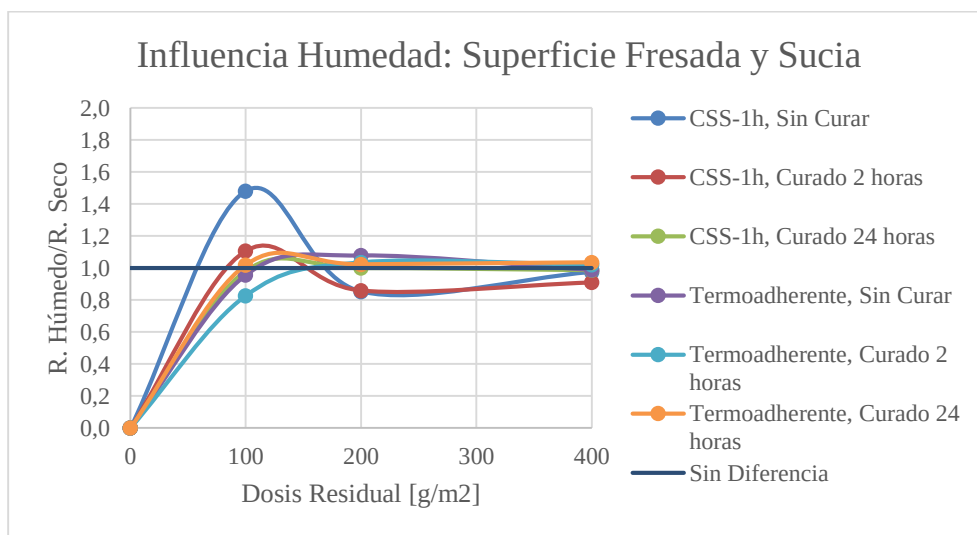


Gráfico 46: Influencia de Humedad (Fresado y Sucio).

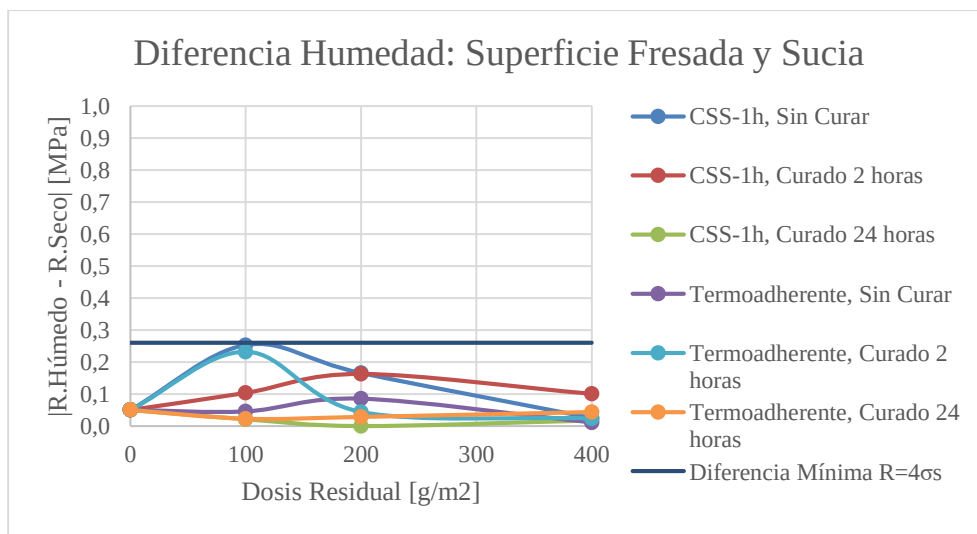


Gráfico 47: Diferencia de Humedad (Fresado y Sucio).

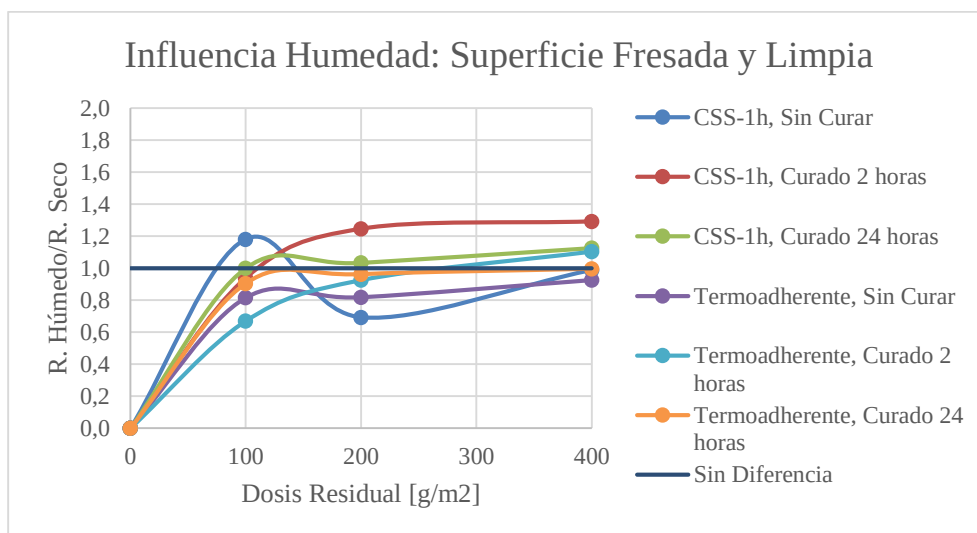


Gráfico 48: Influencia de Humedad (Fresado y Limpio).

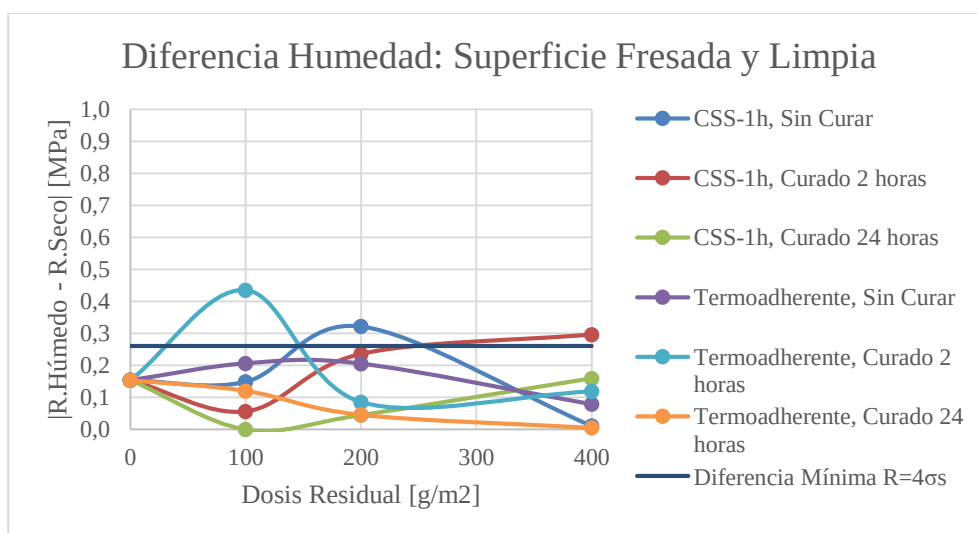


Gráfico 49: Diferencia de Humedad (Fresado y Sucio).

5.6.4. Influencia de la condición de limpieza: Limpia v/s Sucia

De acuerdo a lo solicitado por Bitumix S.A., se requiere analizar la influencia que tiene la suciedad en el nivel de adherencia, que por diversos motivos puede presentarse antes de aplicar el riego de liga, produciendo posibles alteraciones en la unión entre la capa asfáltica de soporte y la capa de rodadura colocada encima. Según los resultados de resistencias al corte obtenidas, en el Gráfico 50, el cual agrupa los cocientes de Influencia de Suciedad para superficies fresadas y secas, se puede observar que los puntos se encuentran situados sobre y bajo el valor unitario, en un rango comprendido entre 0,3 y 1,2. Esto indica que en el tramo de pruebas confeccionado, hay resultados en los cuales la suciedad (material fresado) presenta levemente una mayor adherencia. Existe una notoria diferencia entre el cociente que representa el caso sin riego de liga y el resto de situaciones, las cuales se encuentran más cercanas a 1. Esto refleja que, en ausencia de riego de liga, existe una mayor diferencia entre las resistencias al corte de superficies sucias y limpias, donde esta última triplica el valor de resistencia con suciedad. Los puntos que corresponden a casos en que se utiliza riego de liga, presentan valores poco dispersos y muy cercanos a 1, lo que imposibilita distinguir una diferencia considerable dada por la condición de limpieza. El gráfico de Diferencia

de las condiciones Fresadas y Secas (Gráfico 51), indica sólo un punto situado sobre el valor de diferencia mínima aceptable, lo que significa que las diferencias entre resistencias al corte, definidas por la condición de limpieza (o suciedad), no son suficientes para determinar la existencia de un cambio en la adherencia de los testigos del tramo de pruebas producto de dicha condición.

Para las superficies Fresadas y Húmedas, el gráfico de Influencia del Nivel de Limpieza (Gráfico 52), refleja un comportamiento similar que la configuración Fresada y Seca, salvo por una diferencia particular al no utilizar emulsión asfáltica como riego de liga, en la cual, tanto la resistencia al corte sucia como limpia, arrojan valores nulos. Como estos valores son parte de un cuociente, para evitar la indeterminación de éste, de manera criteriosa se opta por designarlo con el valor de 1, ya que ambas resistencias son el “mismo número”. Esta situación, corrobora lo mencionado respecto a las superficies del tramo de pruebas que son Fresadas, contienen humedad y no se les aplica riego de liga, donde los valores de adherencia, independiente del nivel de limpieza, son nulos. Los cuocientes de resistencia Sucio/Limpio de este gráfico, se encuentran comprendidos entre 0,8 y 1,4, repartidos por sobre y bajo la unidad.

El gráfico de diferencia para superficies Fresadas y Húmedas (Gráfico 53), arroja prácticamente a todos sus puntos por debajo de la diferencia mínima aceptable. Se mantiene el mismo comportamiento respecto al caso del gráfico anterior, donde no se puede validar una diferencia consistente en la adherencia, entre el nivel de limpieza y suciedad aplicados en el tramo de pruebas. Ahora, revisando el gráfico de Influencia de Limpieza para superficies Sin Fresar, las cuales no consideran humedad (Gráfico 54), se puede distinguir una gran dispersión de puntos, donde no existe ninguna tendencia clara, salvo por el hecho que hay más puntos situados sobre la unidad que bajo de ésta. Por consiguiente, distinto a las configuraciones con superficies Fresadas, para superficies Sin Fresar, la suciedad (polvo roca), en varios casos, presenta valores de resistencia al corte mayor que su análogo sin suciedad. Los cuocientes se encuentran situados en un rango de 0,8 y 1,7, denotando en ciertas situaciones, un aumento de resistencia al corte debido a la suciedad. A pesar de existir casos en los cuales la resistencia, para superficies sucias, es casi 1,7 veces mayor que su análogo en condición limpia, el gráfico de Diferencia para superficies Sin Fresar (Gráfico 55), contiene sus puntos, al igual que el resto de los gráficos de Diferencia del nivel de Limpieza, por debajo del valor mínimo aceptable, por ende, no se puede validar que exista una diferenciación sustancial en el nivel de adherencia, producto de la cantidad de suciedad aplicada en el tramo de pruebas.

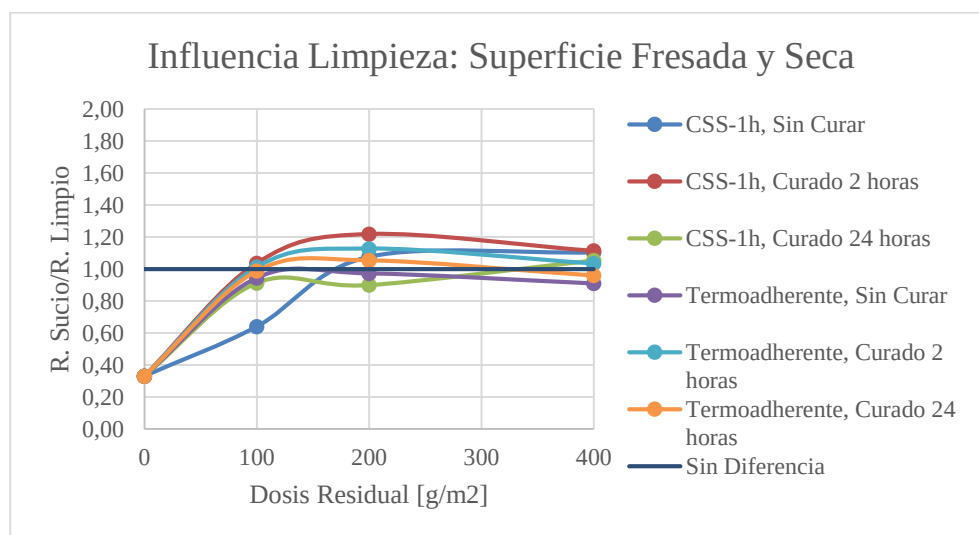


Gráfico 50: Influencia del Nivel de Limpieza (Fresado y Seco).

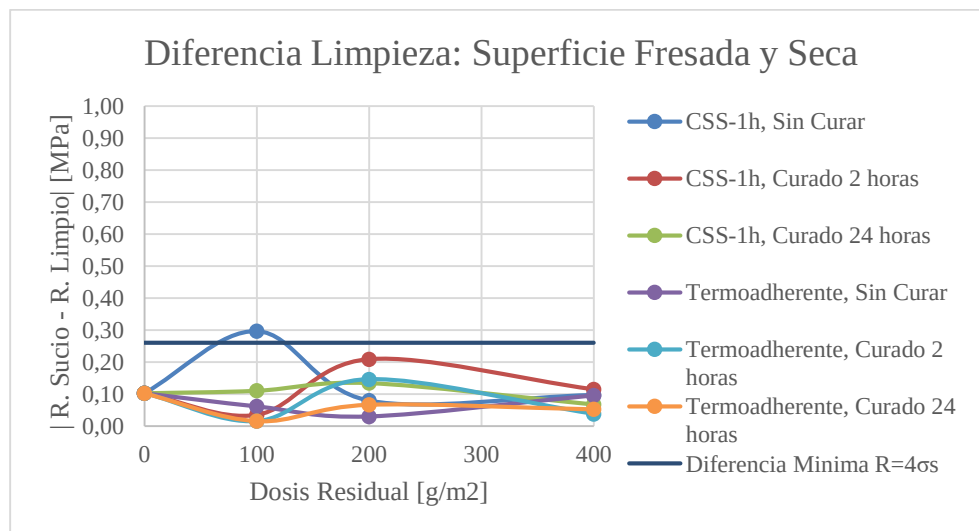


Gráfico 51: Diferencia del Nivel de Limpieza (Fresado y Seco).

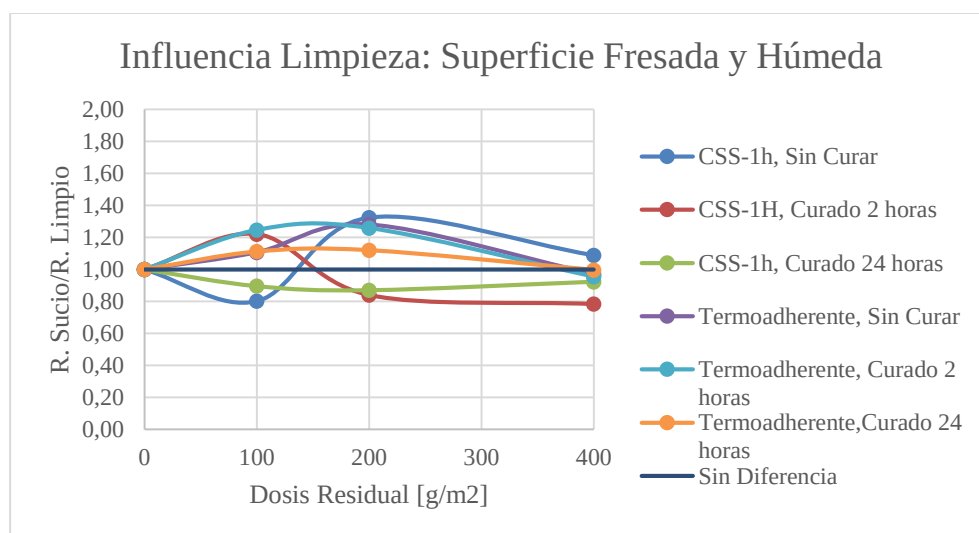


Gráfico 52: Influencia del Nivel de Limpieza (Fresado y Húmedo).

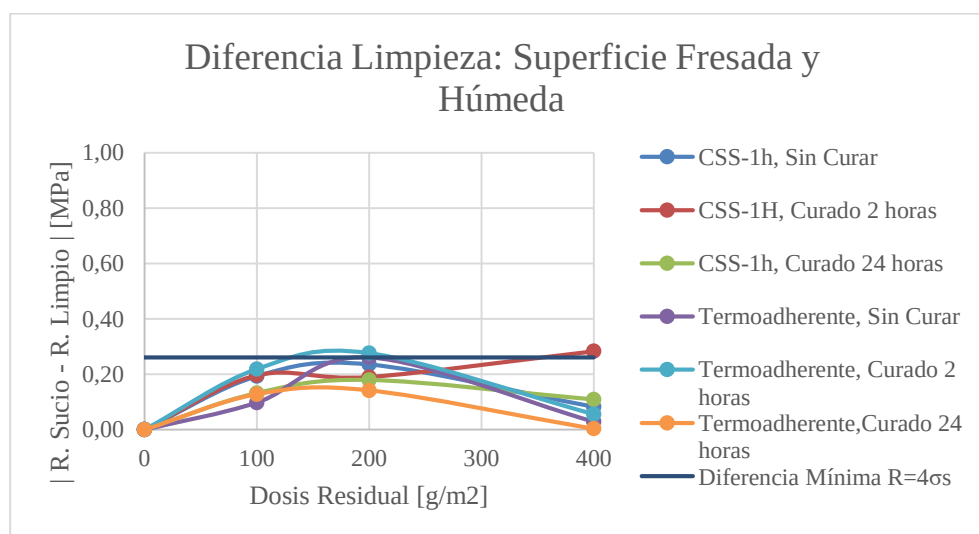


Gráfico 53: Diferencia del Nivel de Limpieza (Fresado y Húmedo).

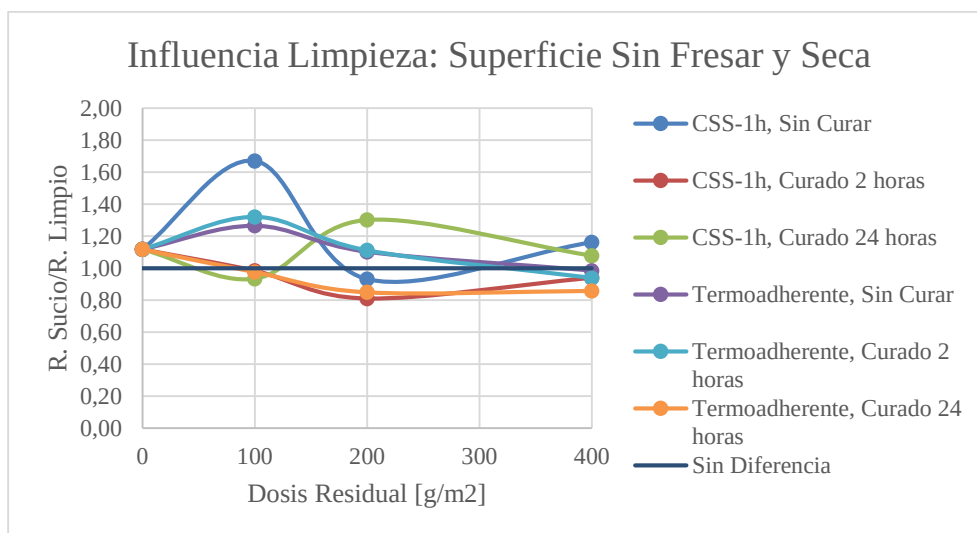


Gráfico 54: Influencia del Nivel de Limpieza (Sin Fresar y Seco).

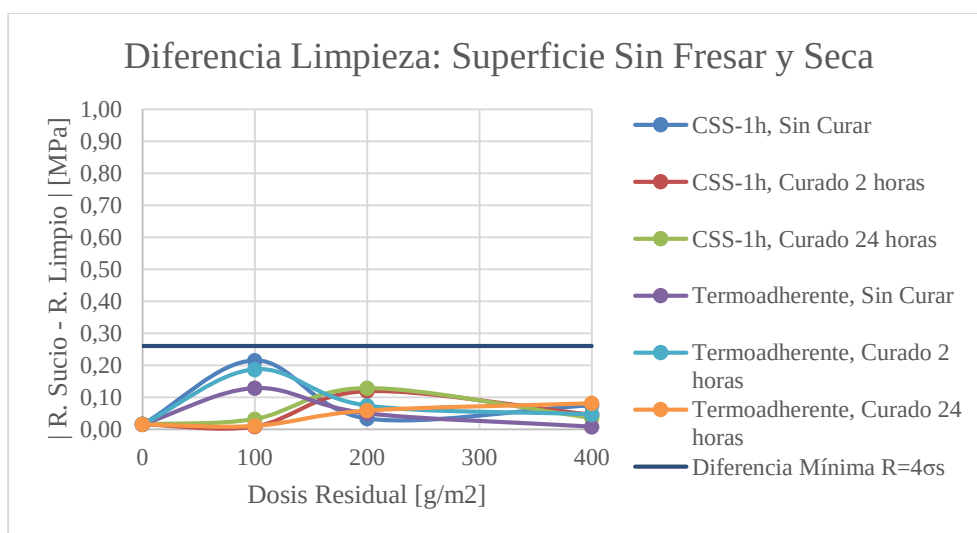


Gráfico 55: Diferencia del Nivel de Limpieza (Sin Fresar y Seco).

5.6.5. Influencia del tiempo de curado: 24 h., 2 h. y Sin Curar

Para analizar los resultados, según la influencia de los tiempos de curado de las emulsiones asfálticas utilizadas como riego de liga, no se utilizarán los gráficos de Influencia con cuocientes. Los datos serán expuestos mediante un gráfico compuesto de 3 curvas, diferenciadas por las dosis residuales de 100, 200 y 400 g/m². Cada una de estas curvas contiene los 3 puntos que representan las resistencias al corte promedio por combinación, en mega pascales, para los tiempos de curado de 0 (Sin Curar), 2 y 24 horas. Los 12 gráficos generados, se dividen en 4 grupos para facilitar su visualización:

- Influencia del tiempo de curado con emulsión CSS-1h para superficies Fresadas.
- Influencia del tiempo de curado con emulsión CSS-1h para superficies Sin Fresar.
- Influencia del tiempo de curado con emulsión Termodherente para superficies Fresadas.
- Influencia del tiempo de curado con emulsión Termodherente para superficies Sin Fresar.

5.6.5.1. Influencia del tiempo de curado con CSS-1h para superficies Fresadas

De acuerdo a los 4 gráficos, que corresponden a testigos con superficies fresadas con CSS-1h (Gráfico 56 al Gráfico 59), se puede observar, que la resistencia al corte más alta se alcanza con un tiempo de curado de 24 horas, seguida por las resistencias con tiempos de curado de 2 horas y finalmente una resistencia menor, alcanzada con un tiempo de curado de 0 horas (Sin Curar). En algunos de los casos considerados en estos gráficos, las barras de error para cada punto, las cuales tienen como función, exponer de manera gráfica las desviaciones estándar por combinación, se traslapan y, en otros casos no ocurre lo mismo, por ende, es importante considerarlas cuando no se observa una tendencia clara en las curvas o al momento de corroborar una anomalía puntual que se pueda atribuir a errores experimentales. La forma de las curvas, en términos generales, es similar y en su mayoría presentan una pendiente positiva desde el instante en que se aplica la emulsión hasta el tiempo de 24 horas póstumo.

Tomando en cuenta las pendientes de las curvas entre 0 y 2 horas, para estos 4 gráficos, se puede percibir que ésta es más pronunciada en este intervalo de tiempo que en el intervalo de 2 y 24 horas de tiempo de curado. Además, con dosis residuales de 100 g/m² de emulsión, la ganancia de adherencia es mayor en comparación con las dosis residuales de 200 y 400 g/m², salvo en el Gráfico 59, donde se nota una disminución en la resistencia al corte entre las 0 y 2 horas de tiempo de curado, al poder contemplar que la pendiente es negativa (curva azul), no obstante, se puede distinguir que las barras de desviación estándar del curado de 0 y 2 horas se traslapan, por lo que esta anomalía se puede atribuir a los errores experimentales mencionados. Otra anomalía, en la cual la pendiente de la curva es negativa en el rango de 0 y 2 horas de curado, ocurre en el Gráfico 58, para una dosis residual de 200 g/m², donde también se puede contemplar una barra de desviación muy considerable para el tiempo de curado de 0 horas. Para el rango comprendido entre las 2 y 24 horas de tiempo de curado, en los 4 gráficos, se distingue que todas las curvas presentan una pendiente sostenida positiva y similar, de menor magnitud en comparación con el rango de 0 y 2 horas.

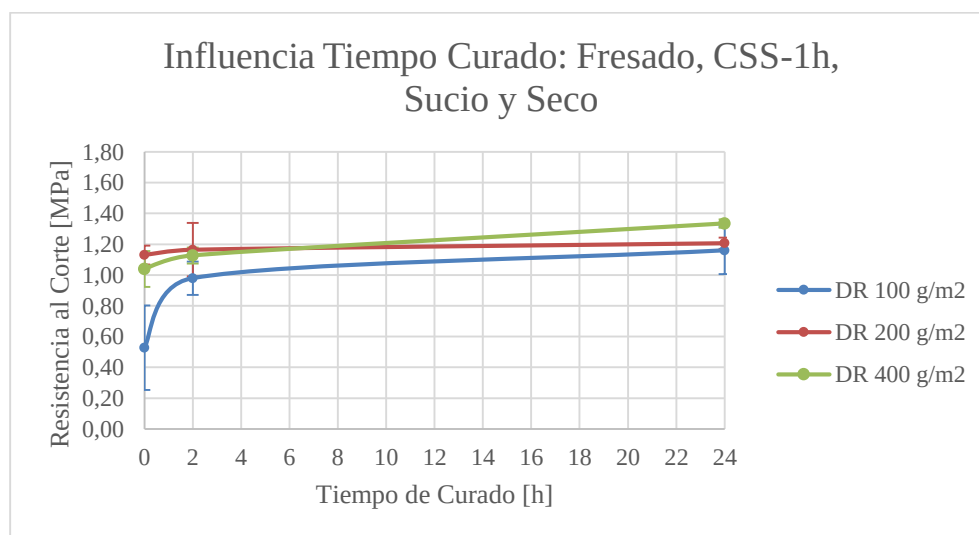


Gráfico 56: Influencia del Tiempo de Curado (Fresado, CSS-1h, Sucio y Seco).

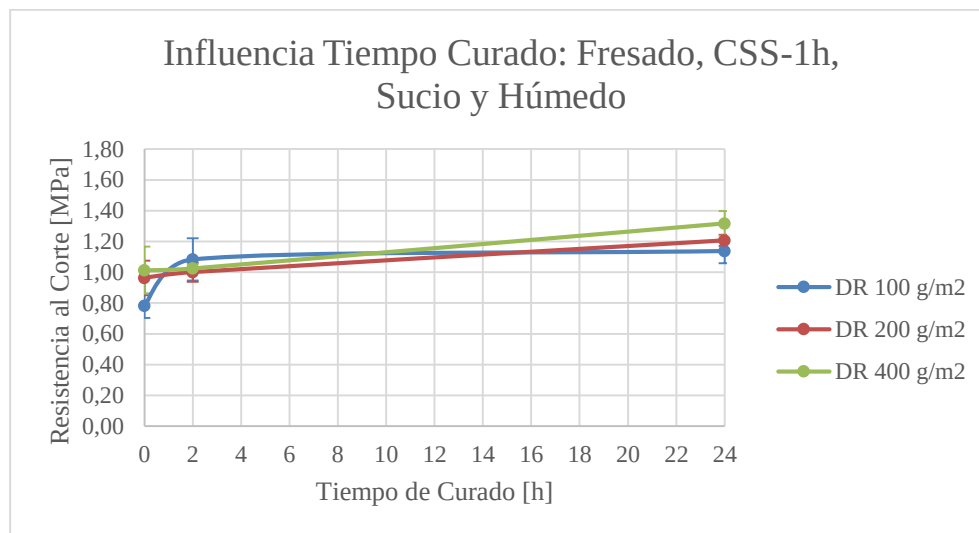


Gráfico 57: Influencia del Tiempo de Curado (Fresado, CSS-1h, Sucio y Húmedo).

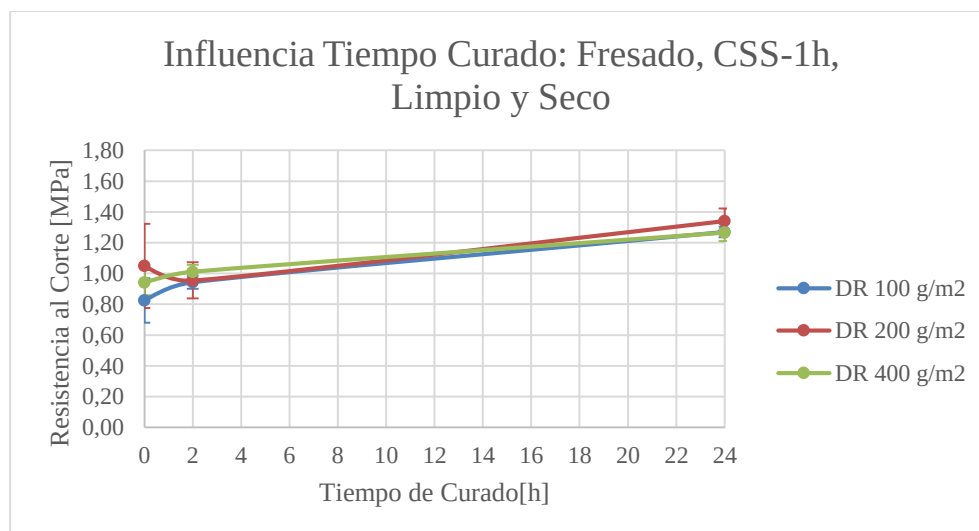


Gráfico 58: Influencia del Tiempo de Curado (Fresado, CSS-1h, Limpio y Seco).

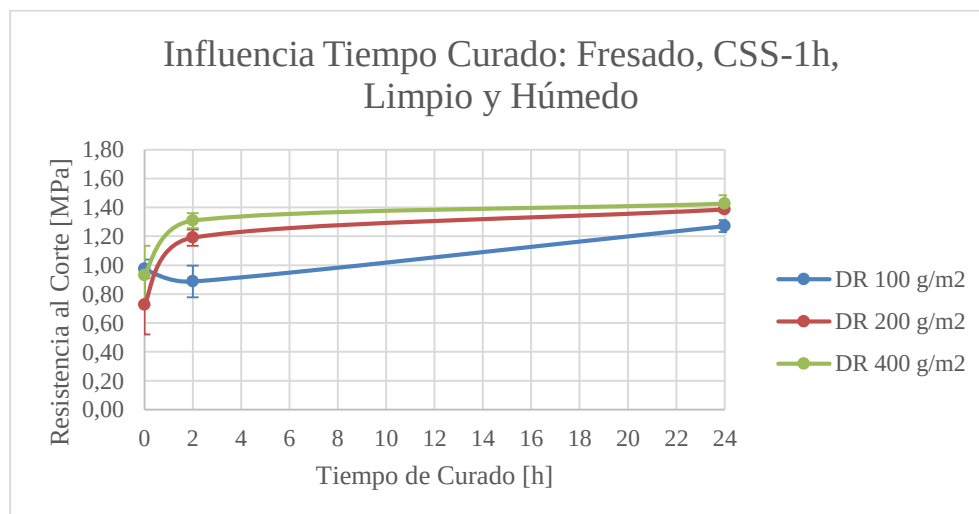


Gráfico 59: Influencia del Tiempo de Curado (Fresado, CSS-1h, Limpio y Húmedo).

5.6.5.2. Influencia del tiempo de curado con CSS-1h para superficies Sin Fresar

Observando los 2 gráficos correspondientes a los resultados de superficies sin fresar, con Emulsión CSS-1h (Gráfico 60 y Gráfico 61), las resistencias al corte más altas se obtienen para tiempos de curado de 2 horas, salvo por un caso del Gráfico 60, al aplicar 200 g/m² de emulsión, donde la resistencia es mayor a las 24 horas. Los valores de adherencia para los tiempos de curado de 0 (Sin Curar) y 24 horas son muy similares, por lo que no se puede decir con certeza, que exista una superioridad entre los niveles de adherencia de estos tiempos de curado. Las barras de error de cada punto, en general, son bastante menores si se comparan con las pertenecientes al caso fresado con CSS-1h, y no se traslapan en su mayoría, corroborando un cambio real en la adherencia producto del dejar curar hasta 2 horas la emulsión asfáltica luego de aplicarla. La forma de las curvas, en estos 2 gráficos, es similar en términos generales, y en su mayoría presentan una pendiente positiva desde el instante en que se aplica la emulsión asfáltica hasta el tiempo de 2 horas. Posteriormente van decayendo estas curvas con una pendiente negativa sostenida hasta las 24 horas, con una menor magnitud que la pendiente positiva del primer rango.

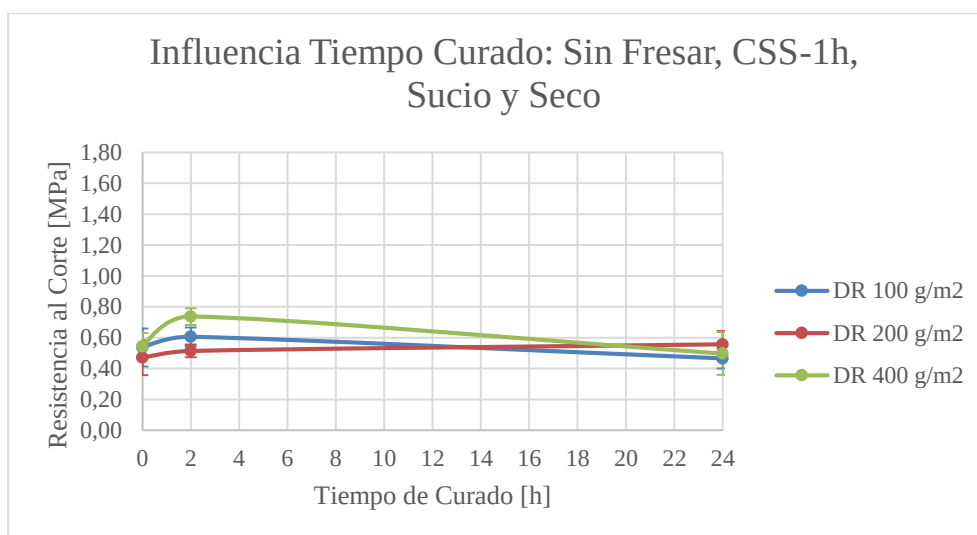


Gráfico 60: Influencia del Tiempo de Curado (Sin Fresar, CSS-1h, Sucio y Seco).

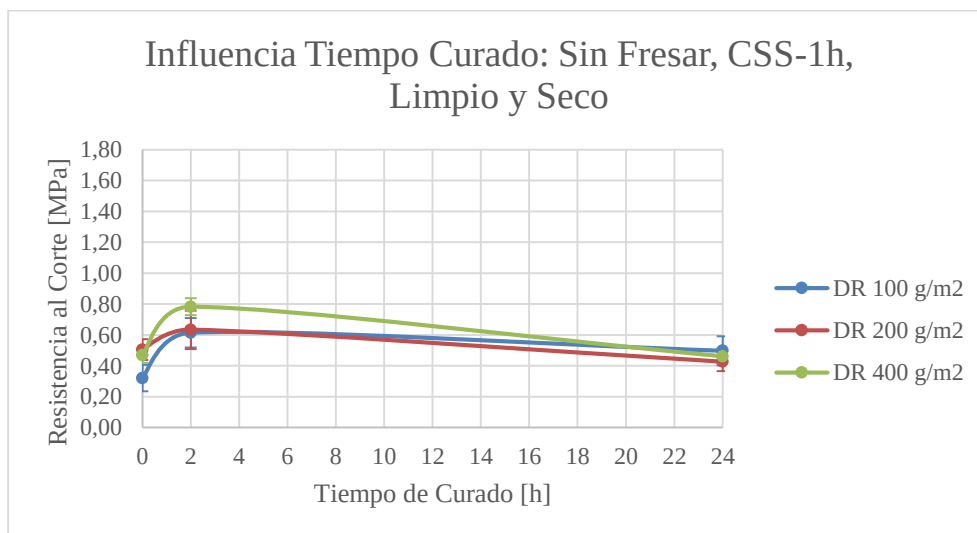


Gráfico 61: Influencia del Tiempo de Curado (Sin Fresar, CSS-1h, Limpio y Seco).

5.6.5.3. Influencia del tiempo de curado con E. Termoadherente para superficies Fresadas

Revisando los datos correspondientes a los 4 gráficos de superficies fresadas con Emulsión Termoadherente (Gráfico 62 al Gráfico 65), se puede divisar que las resistencias del tiempo de curado de 2 y 24 horas son similares entre sí. Los valores que sí difieren de los datos mencionados, son las correspondientes a los tiempos de curado de 0 horas (Sin Curar), las cuales son en su mayoría menores. Comparando las barras de error de estos 4 gráficos, entre los tiempos de 0 y 2 horas, se distingue cierto traslape en el Gráfico 63, Gráfico 64 y Gráfico 65, excepto por el primero (Gráfico 62), no obstante, la tendencia de los resultados, indican que se obtienen mejores resistencias con 2 horas de tiempo de curado que con 0 horas. Por otro lado, al ser muy similares los valores de adherencia entre los tiempos de 2 y 24 horas, es claro que, independiente del tamaño de las barras de error, estas se traslapan de igual forma. Respecto de la forma de las curvas, pertenecientes a este numeral, para el primer rango entre 0 y 2 horas, todas éstas, salvo una excepción, presentan una pendiente positiva y de mayor magnitud, en comparación con su análoga en tiempos de curado superiores. Luego, para el siguiente rango de 2 y 24 horas, en general las pendientes son prácticamente nulas y sostenidas, con razones de cambios leves, tanto de signo positivo como negativo.

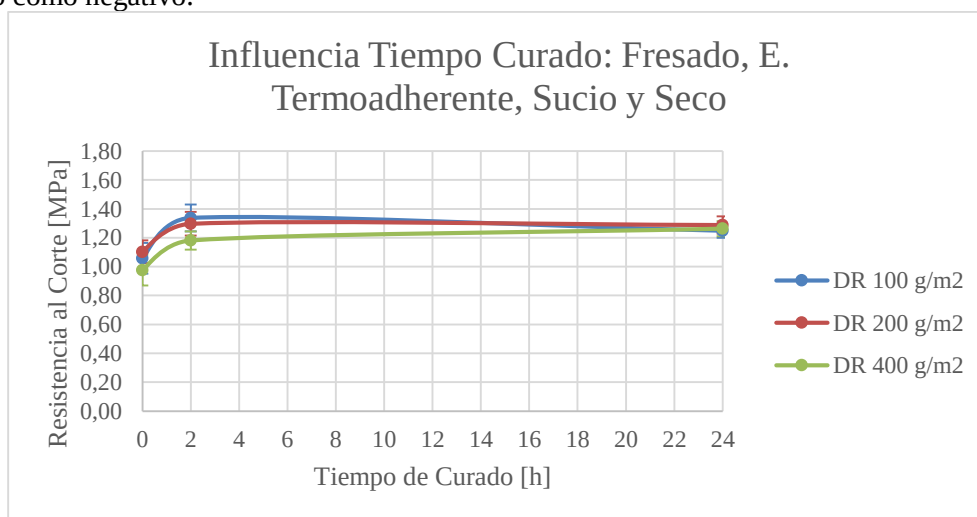


Gráfico 62: Influencia del Tiempo de Curado (Fresado, Termoadherente, Sucio y Seco).

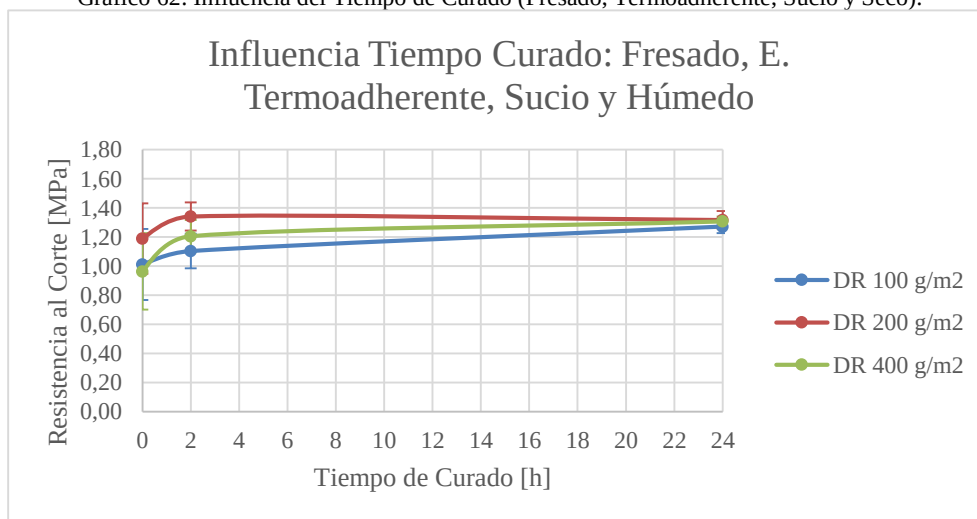


Gráfico 63: Influencia del Tiempo de Curado (Fresado, Termoadherente, Sucio y Húmedo).

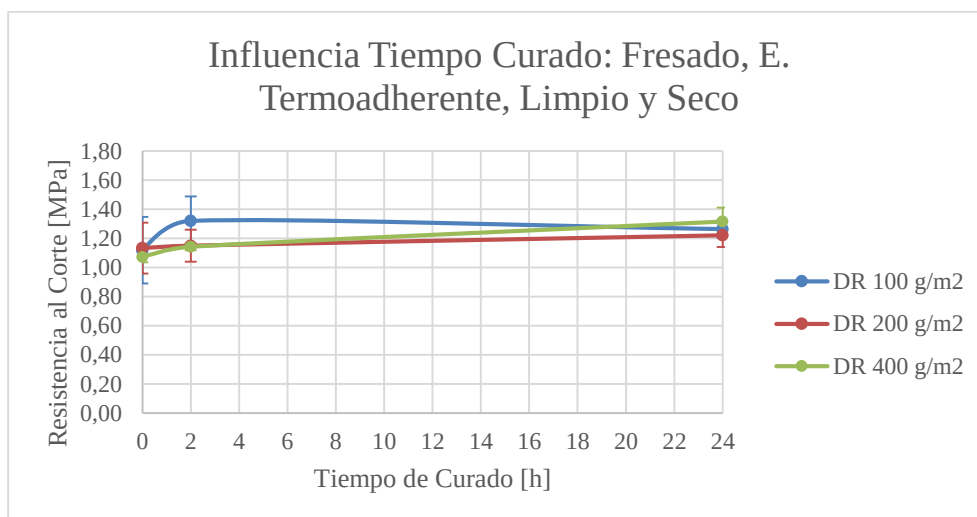


Gráfico 64: Influencia del Tiempo de Curado (Fresado, Termoadherente, Limpio y Seco).

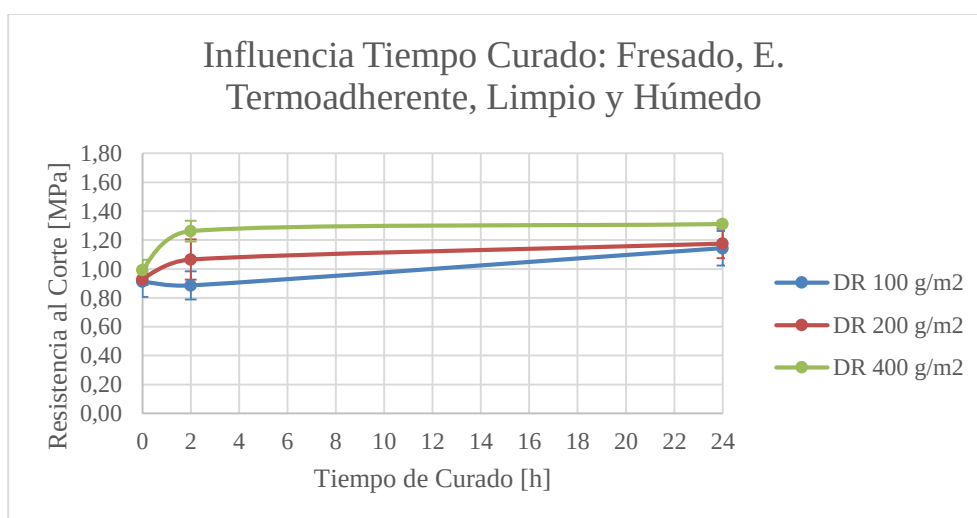


Gráfico 65: Influencia del Tiempo de Curado (Fresado, Termoadherente, Limpio y Húmedo).

5.6.5.4. Influencia del tiempo de curado con E. Termoadherente para superficies Sin Fresar

De acuerdo a los 2 gráficos que corresponden a testigos con superficies Sin Fresar y E. Termoadherente (Gráfico 66 y Gráfico 67), se puede contemplar que las resistencias al corte más altas se alcanzan con un tiempo de curado de 2 horas, seguidas por las resistencias con tiempos de curado de 0 horas (Sin Curar) y finalmente los valores más bajos, con un tiempo de curado de 24 horas. En estos casos, distinto al resto de configuraciones en las cuales la adherencia era menor con 0 horas de curado, se obtienen resistencias más bajas con un tiempo de curado de 24 horas. De las barras de error totales de estos gráficos, sólo una se traslapa tangencialmente con otra en términos del tiempo de curado, por lo tanto, se puede evidenciar una distinción del nivel de adherencia, dependiente del tiempo de curado de la emulsión Termoadherente aplicada en la pista Sin Fresar del tramo de pruebas. La forma de las curvas, en términos generales, es similar, presentado una pendiente positiva y mayor, desde el instante en que se aplica la emulsión asfáltica hasta el tiempo de 2 horas de curado. Posterior a este tiempo, las curvas comienzan a decaer con una pendiente negativa constante, sostenida y un poco más pronunciada que las otras 3 configuraciones de los incisos anteriores, hasta llegar al punto final de 24 horas de curado.

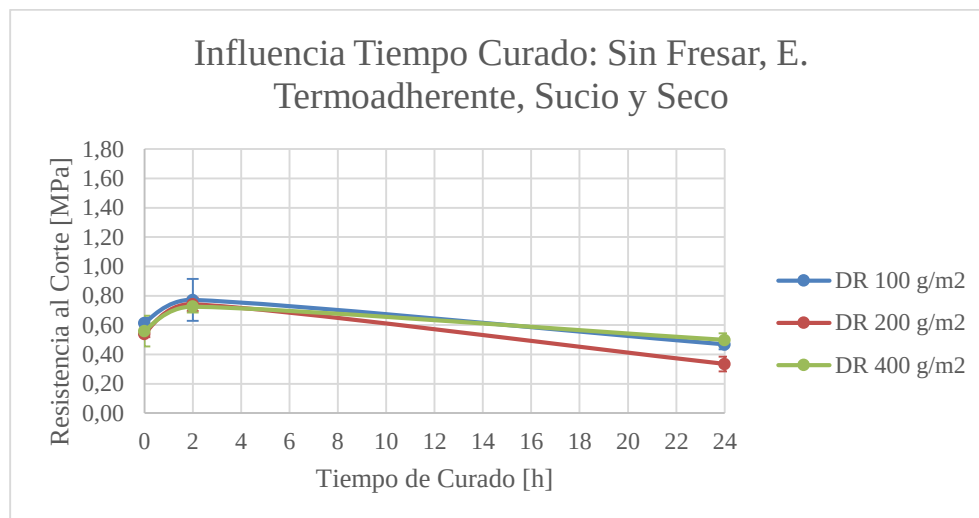


Gráfico 66: Influencia del Tiempo de Curado (Sin Fresar, Termoadherente, Sucio y Seco).

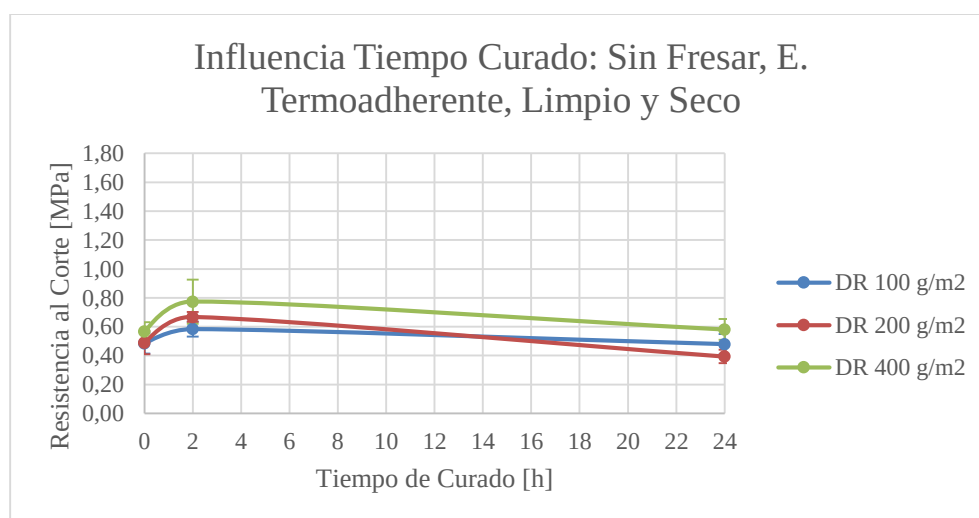


Gráfico 67: Influencia del Tiempo de Curado (Sin Fresar, Termoadherente, Limpio y Seco).

5.6.6. Variables más influyentes y niveles con mejores resultados

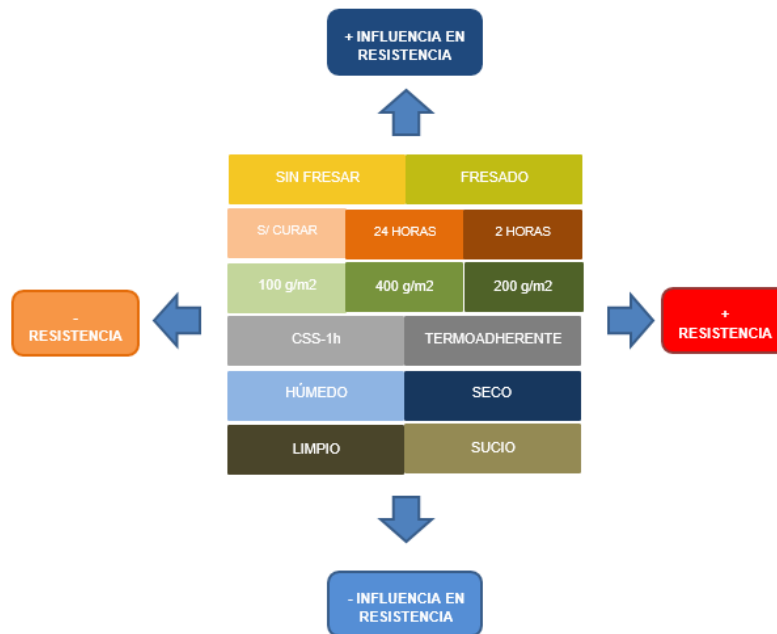


Ilustración 39: Esquema de variables y niveles del estudio de adherencia ordenados según influencia y resistencia.

De acuerdo a los promedios calculados de cada nivel, como se puede ver en la Tabla 37, se realiza una comparación de la resistencia al corte, para cada variable de influencia, con el fin de estimar de manera criteriosa, qué niveles respectivos, son los que arrojaron mejores resultados respecto a los testigos doble capa del tramo de pruebas. Tomando en cuenta además, el análisis de influencia realizado en el numeral 5.6, en el esquema de la Ilustración 39, se agrupan de forma decreciente, las variables que tienen una mayor influencia en el nivel de adherencia, habida consideración, que valores mayores en los cuocientes entre resistencias al corte, indican una mayor influencia en la unión entre capas asfálticas. Este orden descrito, permite visualizar de mejor forma, la toma de decisiones que se debe realizar en obras que constituyan pavimentos asfálticos, siempre en pos de obtener un nivel de adherencia lo más alto posible, de acuerdo a las condiciones específicas del proyecto. De acuerdo a la información entregada en el diagrama de la Ilustración 39 y la Tabla 37, se hacen las siguientes aseveraciones:

- Conforme al diagrama, se observa que la resistencia al corte es más sensible al tipo de superficie, presentando valores bastante mayores en una superficie fresada que en una superficie sin fresar, de modo que, si el tipo de obra lo permite, a priori, se debiesen asumir los costos del fresado a fin de proveer una mayor adherencia entre las capas asfálticas y así extender la vida útil del pavimento.
- Las resistencias al corte promedio para las dosis de 200 y 400 g/m², presentan promedios prácticamente iguales, en consecuencia y en términos prácticos, se determina que una dosis residual de 200 g/m² presenta mejores resultados, ya que se alcanza un nivel de adherencia casi igual, con la mitad de emulsión.
- Siguiendo el orden de mayor a menor influencia en la adherencia, se puede advertir que los promedios de resistencia, para el riego de liga sin curar, son más bajos en comparación a los tiempos de curado de 2 y 24 horas, haciéndose difícil indicar una superioridad en el nivel de unión entre estos dos últimos, ya que existe un comportamiento tendencial, dependiendo del

tipo de superficie y la emulsión que se utilice, presentándose en $\frac{1}{4}$ de los casos, mejores resultados con 24 horas y, en el resto, mejores resultados con 2 horas.

- En cuanto al tipo de emulsión utilizada como liga, la E. Termoadherente presenta de forma muy leve, y en términos muy generales, una mayor adherencia que la emulsión CSS-1h.
- Respecto a los niveles de Humedad y Limpieza en la superficie de la capa de soporte, antes del riego de liga, se puede ver que cada uno presenta promedios muy similares, lo que obstaculiza afirmar con certeza, que un nivel presente mejores resultados que otros.
- Tomando en cuenta los resultados del análisis ANOVA de la Tabla 31 para los testigos doble capa, el orden de influencia se ve determinado por el Valor F. En este distinto caso, de acuerdo a la información de la Tabla 37, el orden se determina según la diferencia máxima Δ entre los promedios de cada nivel. Con ambos métodos, el orden decreciente de mayor a menor influencia es bastante similar, salvo por la “Dosis” ($F=10,32$ y $\Delta=0,07$) y el “Tipo de Emulsión” ($F=20,05$ y $\Delta=0,06$). En la Ilustración 39, se opta de manera criteriosa, por considerar más influyente la dosis residual aplicada que el tipo de emulsión, puesto que en el análisis ANOVA no se consideraron los testigos sin emulsión asfáltica, los cuales arrojaron resistencias al corte muy bajas.

Tabla 37: Promedios de resistencias según niveles.

VARIABLE	DESCRIPCIÓN	PROMEDIO RESISTENCIA [MPa]	MÍNIMO [MPa]	MÁXIMO [MPa]	DIFERENCIA Δ [MPa]
Superficie Pavimento	Sin Fresar	0,53	0,53	1,06	0,53
	Fresado	1,06			
Tiempo de Curado	Sin Curar	0,82	0,82	0,99	0,18
	2 Horas	0,98			
	24 Horas	0,99			
Dosis Residual	0 g/m ²	0,08	0,89	0,96	0,07
	100 g/m ²	0,89			
	200 g/m ²	0,94			
	400 g/m ²	0,96			
Emulsión	CSS-1h	0,90	0,90	0,96	0,06
	Termoadherente	0,96			
Limpieza	Sucio	0,89	0,88	0,89	0,02
	Limpio	0,88			
Humedad	Seco(Sólo fresado)	1,08	1,05	1,08	0,03
	Húmedo(Sólo fresado)	1,05			

5.7. Resistencia monolítica v/s resistencia doble capa

En el Gráfico 68, se tienen los 114 valores promedios de resistencias al corte de testigos doble capa de 6 pulgadas, para cada combinación de la matriz de ensayo (puntos de color azul), distribuidos según la dosis residual de 0, 100, 200 y 400 g/m², como se puede observar. La recta horizontal de color rojo, corresponde al promedio de la Resistencia Monolítica de los resultados del ensayo de 10 testigos de recapado, del numeral 5.2 del Análisis de Repetitividad, con un valor de 1,02 MPa., y la recta de color verde, corresponde al promedio de las resistencias doble capa de 6 pulgadas de todas las combinaciones, es decir, esta recta representa la media de todos los puntos azules.

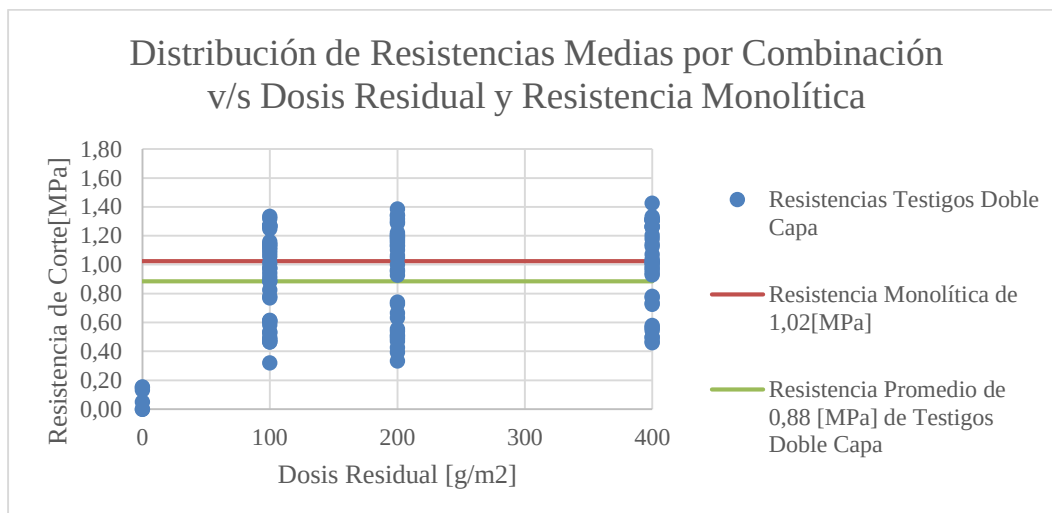


Gráfico 68: Resistencias medias doble-capa v/s resistencia monolítica del recapado.

Como se puede observar, para cada una de las dosis residuales de riego de liga (100, 200 y 400 g/m²), existe una gran similitud en los rangos de dispersión de dichas dosis, comprendidos entre los 0,3 y 1,5 MPa aproximadamente. De los 114 valores de resistencia media de testigos doble capa, 27 de ellos se encuentran sobre los 1,02 MPa, es decir, que del total de las combinaciones, un 23,7% de ellas sobrepasa la resistencia al corte de los testigos monolíticos de recapado. Un punto que es importante a considerar, es que este porcentaje de valores tiene las siguientes características:

- Todos estos valores que sobrepasan la resistencia monolítica, respecto al tipo de superficie del pavimento, solo se encuentra el nivel de superficie Fresada.
- Ninguno de estos datos contiene una dosis residual nula (0 g/m²), es decir, todos contienen riego de liga en distintas dosis de 100, 200 y 400 g/m².
- Ninguno de estos datos contiene la condición del tiempo de curado “Sin Curar”, por lo tanto, sólo contienen los tiempos de curado de 2 y 24 horas.
- Respecto a las otras variables, se encuentran todos los niveles respectivos del tipo de emulsión (CSS-1h, Termoadherente), de la condición de limpieza (sucio, limpio) y de la condición de humedad (húmeda, seca).

El 76,3% restante de estos datos de resistencias, los cuales se encuentran por debajo del valor de resistencia monolítica de 1,02 MPa, contienen todos los niveles respectivos de cada variable de influencia de este estudio, encontrándose también la condición fresada. Esto indica que el hecho que una superficie sea fresada no significa que, necesariamente, puede sobrepasar la resistencia de un elemento monolítico.

5.8. Relación de resistencia entre testigos de diámetro de 4 y 6 pulgadas

De acuerdo a la matriz de ensayo, se extrajeron 24 testigos de diámetro de 4 pulgadas correspondientes a 6 combinaciones del tramo de pruebas, de las cuales todas contienen E. Termoadherente como riego de liga, 3 de éstas con una superficie fresada y las otras 3 con una superficie sin fresar. Respecto al nivel de suciedad, todas contienen una superficie limpia y seca, considerando las dosis residuales de 100, 200 y 400 g/m². Al comparar los resultados de estas 6 combinaciones, se espera determinar la existencia o no, de alguna relación entre las resistencias al

corte de 4 y 6 pulgadas de forma homóloga para cada combinación. Como se puede notar en el Gráfico 69, existe una relación lineal para estos seis puntos, cada uno correspondiente al promedio de los 4 testigos que representan cada combinación. El coeficiente de correlación, con un valor de 0,91, indica que la curva lineal representa de buena forma estos puntos. En la ordenada se tiene la resistencia de 6 pulgadas y en la abscisa la resistencia de 4 pulgadas. La línea diagonal de color rojo, corresponde a la “curva identidad”, la cual representa el caso en que las resistencias de 4 y 6 pulgadas, para una misma combinación, son idénticas.

En este gráfico, además se puede denotar que los 3 puntos inferiores, situados bajo los 0,6 MPa para la resistencia de 6 pulgadas, corresponden a las condiciones sin fresar y los otros 3 puntos, los cuales son de mayor resistencia, pertenecen a la condición fresada. En estos casos, sólo se considera la condición ideal esperada para la unión de capas asfálticas, en la cual la superficie de la estructura de soporte se encuentra limpia y seca, además de contar con riego de liga (E. Termoadherente), por ende, no representa necesariamente la relación de resistencias de testigos de diámetros de 4 y 6 pulgadas en otras condiciones de adherencia. De acuerdo a los coeficientes de la curva lineal de la correlación, la pendiente de la recta indica que las resistencias de 6 pulgadas corresponden a un 75% de las resistencias de 4 pulgadas aproximadamente. Este comportamiento se puede corroborar, ya que para el rango situado entre 0,6 y 1,6 MPa, de las resistencias de 4 pulgadas y el rango situado entre 0,5 y 1,1 MPa de las resistencias de 6 pulgadas, la recta se encuentra por debajo de la curva identidad, encontrándose más cercana a la abscisa. Para los rangos inferiores a 0,5 MPa y superiores a los 1,6 MPa no se puede confirmar que exista el mismo comportamiento. Para bajos rangos, en términos prácticos, se le resta importancia ya que resistencias inferiores a 0,5 MPa, son consideradas insuficientes e inadmisibles para proveer una buena adherencia. En función de estos resultados, el tamaño del diámetro de los testigos extraídos influye en la forma de cuantificar la adherencia, por consiguiente, es importante tener claro que, para realizar comparaciones entre resistencias al corte, con distintas condiciones de adherencia entre capas, los diámetros de testigos extraídos deben ser iguales. Por esta razón, de acuerdo al estudio realizado, se espera que se obtengan resistencias más altas en testigos de 4 pulgadas que en testigos de 6 pulgadas. Los puntos en verde corresponden a las resistencias análogas obtenidas para probetas doble capa en la Memoria de Jara P. en el CDI, valores que se comentarán en la sección de Discusiones.

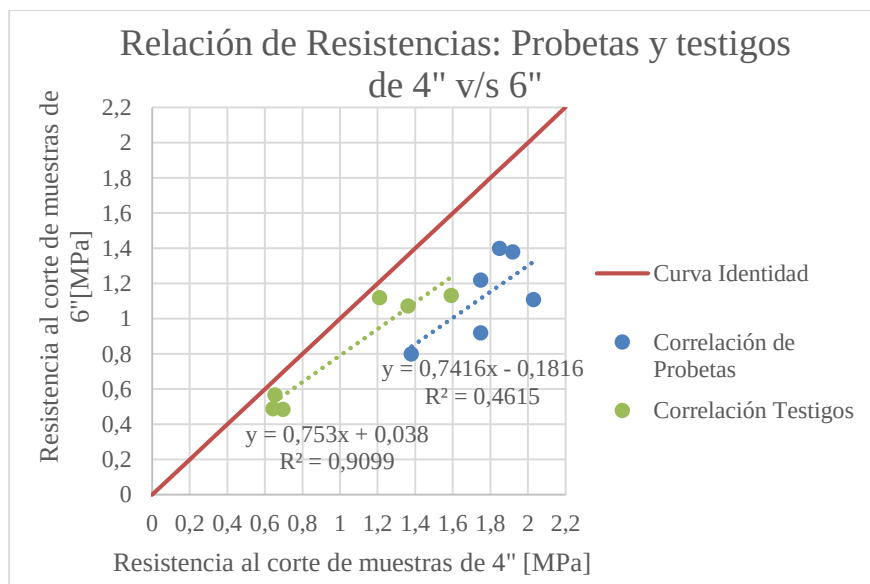


Gráfico 69: Resistencia de testigos de diámetro 4" v/s 6".

6. CAPÍTULO VI: DISCUSIONES

6.1. Capas asfálticas con riego de liga v/s sin riego de liga

Son variadas las hipótesis expuestas, en relación a la necesidad de utilizar o no riego de liga como agente adhesivo entre las diferentes capas asfálticas. Según los resultados obtenidos en este trabajo, correspondientes a testigos doble capa del tramo de pruebas confeccionado, y considerando además que la capa de soporte se compone de HMA IV-A-12, con 11 años de antigüedad y un recapado de un material similar, se ha determinado que el riego de liga es indispensable para la provisión de adherencia entre capas asfálticas que no sean colocadas consecutivamente. De ello se puede inferir, al observar las diferencias sustanciales entre las resistencias con y sin riego de liga, especialmente, para elementos con una interfaz fresada.

Otro estudios, tales como el realizado por Abd-Naby y S.M. Easa [18], comprobaron el incremento en la adherencia producto de la utilización del riego de liga y la temperatura, al momento de compactar la capa superior de las probetas de laboratorio. Como se puede avistar en el Gráfico 14, si las dos capas se encuentran aun con altas temperaturas y sin riego, la resistencia al corte es mayor que la de una probeta con riego y con su capa superior compactada, al momento en que su capa inferior se encuentra ya fría. Por otro lado, el trabajo realizado por Raab C. y Partl M.N [17], señala los buenos resultados que se obtienen para probetas doble capa sin riego de liga, alcanzando resistencias prácticamente iguales a las de probetas en las que sí se utilizaron emulsiones asfálticas, tomando en cuenta, que ambas capas se unieron a altas temperaturas. Ya que pueden ser variadas las condiciones que se pueden presentar para los distintos tipos de pavimentos de asfálticos, es importante señalar que en ciertas condiciones acotadas, si se puede prescindir del riego de liga, no obstante, si la capa asfáltica de soporte o inferior, ya se encuentra fría, o corresponde a una estructura de cierta antigüedad, es crucial aplicar el riego de liga en una dosis adecuada, pues su ausencia puede inducir una disminución considerable del nivel de adherencia, dado que la temperatura del recapado no es suficiente para reactivar el cemento asfáltico de la capa inferior, siendo imposible unir ambas capas de forma monolítica.

6.2. Dosis de emulsión

La dosis de emulsión asfáltica aplicada como riego de liga, juega un papel determinante en el nivel de adherencia entre capas asfálticas, no obstante, y dependiendo de las circunstancias, las dosis óptimas y el comportamiento de la resistencia, en función de la dosis residual, no serán únicos, ya que la influencia de otros factores, tales como la edad de la mezcla, el tipo de mezcla, si es fresado o no, el tipo de emulsión, la suciedad y humedad en la superficie, entre otros, también afectan el desempeño del riego de liga y por consecuencia, los rangos de dosis óptimas respectivos. En consecuencia, para este estudio, el análisis de los resultados del tramo de pruebas se clasificará según el tipo de emulsión utilizada y el tipo de superficie. Como se ha mencionado, una cantidad insuficiente, como también una cantidad excesiva de emulsión, induce una calidad de adherencia deficiente. Según los datos obtenidos de este trabajo, se puede afirmar de manera general, que la Ecuación Polinómica de Segundo Grado representa de forma satisfactoria la relación entre la dosis residual aplicada y la resistencia al corte, con coeficientes de correlación aceptables, pudiendo además representar de manera expedita, los rangos de dosis óptimas necesarios para maximizar la adherencia entre capas. En cuanto a las resistencias obtenidas empíricamente, con el Ensayo de Corte LCB, para dosis residuales de 100, 200 y 400 g/m², se puede decir, que los mejores resultados se obtienen con 200 y 400 g/m², y ya que los valores entre estas dos dosis son bastante similares, resulta del todo conveniente utilizar 200 g/m² que 400 g/m² por un tema de costos.

Respecto a la forma de las curvas, éstas corresponden a una parábola de segundo grado, denotando un máximo de resistencia al corte para cierta dosis residual de emulsión asfáltica. Comparando ahora los gráficos de cada condición de superficie y tipo de emulsión, al respecto se puede decir:

- La dosis óptima residual promedio para superficies fresadas, con CSS-1h, corresponde a 282 g/m².
- La dosis óptima residual promedio para superficies sin fresar, con CSS-1h, corresponde a 257 g/m².
- La dosis óptima residual promedio para superficies fresadas con Emulsión Termoadherente, corresponde a 273 g/m².
- La dosis óptima residual promedio para superficies sin fresar, con Emulsión Termoadherente, corresponde a 263 g/m².

Según esta información, se puede comentar que, para lograr un óptimo en superficies fresadas, se necesita levemente una cantidad superior de dosis de emulsión asfáltica, debido a que esta configuración posee una mayor superficie específica y, además los agregados desmembrados, producto de la fresadora, cuentan con una capacidad más grande de absorber el riego de liga. Comparando los resultados de esta memoria, con los valores del estudio de Jara P. [11], para superficies sin fresar, con CSS-1h, los valores de resistencia para las probetas confeccionadas en laboratorio son mayores, con un óptimo cercano a los 1,4 MPa al aplicarse una dosis residual de 250 g/m² de emulsión. El Gráfico 33, que considera la relación de dosis residual v/s resistencias de corte, para los testigos doble capa de superficies sin fresar, con CSS-1h y un tiempo de curado de 2 horas (se considera que la emulsión ya se encuentra quebrada en dicho instante), muestra resistencias menores, con un óptimo de 0,8 MPa al aplicarse una dosis residual de también 250 g/m², similar al caso de las probetas. Según esta comparación no existe, prácticamente, diferencia en cuanto a la dosis residual necesaria para maximizar la adherencia, no obstante, los valores máximos entre testigos y probetas de características similares difieren, atribuyéndose esta diferencia de resistencia, a que la capa de soporte de las probetas corresponde a un BINDER y no a una de banda IV-A-12 para los testigos. En cuanto a la emulsión Termoadherente, el Gráfico 7, no cuenta con un buen ajuste, además de no presentar un óptimo cercano a los 250 g/m², distinto a lo que ocurre con los datos obtenidos en este estudio, los cuales cuentan con buenas correlaciones de dosis v/s resistencia.

Como se ha expuesto anteriormente, el Manual de Carreteras sugiere una tasa de aplicación del riego de liga situada entre 0,4 y 1 kg/m², dicho de otra manera, considerando un porcentaje de asfalto residual del 60%, un rango entre 240 y 600 g/m² aproximadamente. Por otro lado, los datos obtenidos en este estudio, estimaron que la dosis óptima se encuentra cercana a 260 g/m² para superficies sin fresar, y 280 g/m² para superficies fresadas, situándose estos valores, dentro del rango recomendado en la normativa actual chilena, sin embargo, se encuentran muy por debajo de las dosis máxima recomendada, por lo que sería no sólo interesante sino además conveniente seguir investigando sobre el tema, habida consideración que no se puede ignorar el efecto lubricante producto de un exceso de riego de liga. De acuerdo a lo obtenido y a la literatura disponible, relacionada con la dosis de riego de liga, se puede afirmar que es imposible ajustar una curva o correlación que represente todas las emulsiones y situaciones específicas, corroborando el hecho que se debe sugerir un rango de dosis de emulsión que considere y abarque de forma criteriosa, las emulsiones utilizadas en Chile para las distintas situaciones constructivas. Por ello, se insta a

continuar investigando nuevos productos y diferentes condiciones de superficie, a modo de apuntar a una futura especificación de dosis óptima para ciertos casos particulares.

6.3. Tipo de superficie

Como se ha afirmado anteriormente, la superficie de las capas asfálticas y, por ende, las graduaciones de las mezclas, se consideran preponderantes en el nivel de unión entre éstas. De acuerdo a los resultados obtenidos en este estudio, comparando el nivel de adherencia entre superficies fresadas y sin fresar para una misma estructura, se obtuvieron resistencias al corte bastante más altas en las superficies Fresadas, logrando superar, en general, entre 1,5 y 4 veces más la resistencia de superficies sin fresar, todo ello, tomando en cuenta la aplicación del riego de liga y que la capa de soporte tiene 11 años de antigüedad. Por otro lado, según el estudio realizado por la WCAT [10], en el cual se realizó un análisis similar, confeccionando un tramo de pruebas compuesto de una estructura preexistente y un recapado, según lo obtenido, los niveles de adherencia para una capa de soporte fresada llegan a ser el triple de la resistencia en superficies sin fresar.

Con esta información, se puede afirmar, que en una estructura preexistente de HMA con cierta antigüedad, la acción de fresar dicha capa, aumenta considerablemente el nivel de adherencia con la capa superior que se colocará posteriormente, mejorando en consecuencia su calidad y vida útil. Esto se debe a la trabazón mecánica producida entre dichas capas, la cual, se opone a las tensiones de corte generadas por las cargas de tráfico, evitando su separación y la aparición de ciertos deterioros, tales como la corrugación o el desprendimiento de la capa superior. Es importante mencionar, el rol que juega la compactación de la capa superior para que la trabazón mecánica se haga efectiva, pues, la superficie luego de ser fresada, presenta una sinuosidad compuesta de pequeños valles y crestas, haciéndose necesario, rellenar con la mezcla de la capa superior, de forma continua, todos los valles o forados originados por la fresadora, y esta última acción, sólo se puede realizar mediante una buena compactación que permita la intrusión de la mezcla asfáltica en dichos espacios. Así, el agarre entre la mezcla inferior y superior, producto de esta configuración, se materializa, tendiendo a comportarse dicho conjunto, como una estructura monolítica.

6.4. Tipo de emulsión

Como se ha mencionado en diversos estudios relacionados al tema, el tipo de emulsión asfáltica utilizada puede significar una variación importante en el nivel de adherencia entre capas asfálticas. Según lo obtenido en la investigación de Álvarez C. [1], la Emulsión Termoadherente M1 presenta una mayor estabilidad para diferentes dosis residuales y nivel de adherencia en comparación al resto de emulsiones tales como CSS-1h, CSS-1h MOD, CRS-2, entre otras. De acuerdo a este trabajo, la emulsión Termoadherente presenta tímidamente mejores resultados respecto a la emulsión CSS-1h, no obstante, no se puede afirmar con seguridad que una tenga un mejor desempeño que otra. Es importante mencionar, que la E. Termoadherente presenta una adhesión mayor a la superficie en la cual se aplica, en comparación con otras emulsiones, evitando que ésta se adhiera a los neumáticos de camiones que ingresan y pasan sobre el riego de liga ya aplicado. El único problema presente en la emulsión termoadherente, es el hecho que tiende a sedimentar con mayor rapidez, pues su residuo es más duro. Esto queda demostrado en los ensayos de penetración de dichos materiales, los cuales rondan entre los 25-30 dmm, muy por debajo de los valores respectivos (50-60 dmm) de la emulsión CSS-1h. Para evitar este problema, es que se recomienda la agitación periódica de la emulsión termoadherente junto con la incorporación de un

sistema de calentamiento en los tanques y camiones que contienen este material asfáltico (65-70°C), a fin de que no se aglomere en zonas singulares, afectando su maniobrabilidad.

Otro punto importante a considerar, es la susceptibilidad que puede tener cada emulsión respecto a la temperatura. Las especificaciones del fabricante, en este caso PROBISA S.A., indican que la emulsión Termoadherente es menos susceptible a bajas temperaturas para el proceso de curado. Es más, la emulsión termoadherente quiebra químicamente de todas formas en un periodo no superior a la hora, aun cuando las condiciones sean desfavorables, por lo que este proceso ocurre antes en comparación a otras emulsiones. Ya que el tramo de pruebas se construyó en un periodo de altas temperaturas, bordeando los 30 °C, no es posible distinguir alguna diferenciación sustancial en el nivel de adherencia debido a este comportamiento, por tal razón, se invita a futuro, que se realicen pruebas de comparación del nivel de adherencia para distintas emulsiones, con diferentes condiciones de temperatura, es decir, en diferentes periodos del año, con el fin de corroborar la existencia o no, de alguna distinción del desempeño de las emulsiones asfálticas, producto de la susceptibilidad térmica.

6.5. Condición de humedad

El Manual de Carreteras indica, explícitamente, que no se debe realizar la aplicación del riego de liga si el clima no es favorable, es decir, si existe una alta probabilidad de lluvia, llovizna o neblina que afecte dicho proceso. En cuanto a la humedad que se puede presentar luego del proceso de fresado, no se especifica ninguna sugerencia o instrucción. Respecto a estudios que representan estas situaciones climatológicas, considerando la aplicación de ciertas cantidades de humedad, luego de que el riego de liga se ha aplicado, se puede afirmar lo siguiente:

- El nivel de adherencia, según los resultados obtenidos para testigos doble capa, de un tramo de pruebas confeccionado por la NCHRP [12], no se ve comprometido si la aplicación de la humedad, con 0,27 l/m², ocurre antes del proceso de quiebre de la emulsión. Esto se ve reflejado en el Gráfico 9, en el cual, las diferencias en la resistencia de corte son mínimas, incluso habiendo casos en los que el nivel de adherencia es levemente mayor en condiciones húmedas en comparación con las condiciones secas.
- Según los resultados obtenidos por Álvarez C. [1], para probetas doble capa confeccionadas en laboratorio, la resistencia al corte se reduce considerablemente si la aplicación de agua (0,2 l/m²) se realiza luego del quiebre de la emulsión ya colocada. Esto se puede observar en el Gráfico 10, en el cual, las resistencias de probetas con agua post-quiebre se encuentran por debajo de las resistencias de probetas sin emulsión, afirmando además, que el efecto del agua acrecienta la disminución de resistencia, conforme se disminuye la dosis de residuo asfáltico.

De acuerdo a este estudio, considerando la simulación de agua producto del fresado, con una dosis de 75 ml/m² en el tramo de pruebas construido, se puede decir, que la presencia de humedad, bajo estas condiciones, antes de la aplicación del riego de liga, no fue un factor preponderante en el nivel de adherencia, ya que en la mitad de casos, el efecto de humedad arroja datos situados por encima de las resistencias de condiciones secas, cercanas a un 20%, y en la otra mitad ocurrió lo contrario, también con un porcentaje cercano al 20%. Con estos indicadores, se puede afirmar que no existe evidencia comprobada de que la humedad, producto del fresado, afecta de forma considerable la adherencia de capas asfálticas.

6.6. Condición de limpieza

En las especificaciones del Manual de Carreteras, se exige que la superficie de la capa inferior, previa a la colocación de la emulsión asfáltica, debe de estar limpia de cualquier agente externo mediante un equipo barredor. En cuanto a la presencia de suciedad, luego del riego de liga, sólo se hace mención de la facultad que tiene el inspector fiscal de validar o no el trabajo realizado, dejando de lado alguna acción preventiva detallada, que no comprometa la calidad de unión entre capas, ante la posibilidad de que dicha superficie, con el riego ya quebrado, sea ensuciada por algún depósito de áridos, tal como ocurrió hace algunos años en la pista del Aeropuerto de Santiago, como también por los neumáticos sucios de los camiones con mezcla asfáltica en cualquier obra vial.

El estudio realizado por la NCHRP [12] (Gráfico 11), para un tramo de pruebas húmedo, exhibe en la mayoría de los casos, que existen diferencias en la adherencia entre condiciones limpias y sucias con 342 g/m^2 de arcilla limosa, e incluso, en bastantes situaciones, se obtienen mayores resistencias al corte con los testigos extraídos de zonas polvorientas. Esto se puede atribuir a la formación de una especie de macilla arenosa de alta viscosidad, cuando se combina la humedad con el polvo de arcilla, proporcionando una mayor resistencia de corte. Por su parte, el CDI, ha requerido investigar puntualmente si los materiales áridos, correspondientes a Polvo Roca y Fresado, de tamaños inferiores a la malla #16, en dosis de 140 g/m^2 , afectan la unión entre capas asfálticas previo a la aplicación del riego de liga, con el propósito de averiguar si en algunos casos excepcionales, dependiendo del tipo de suciedad depositada, es posible abrir la discusión de suprimir una limpieza fina y detallada, la cual en algunos casos, puede comprometer significativamente los recursos disponibles en obra.

De acuerdo a los resultados de este estudio, respecto al tramo de pruebas, tanto para condiciones de superficie fresadas como sin fresar, no existe evidencia suficiente que permita comprobar que la suciedad de polvo roca para la pista fresada, y de material fresado remanente para la pista sin fresar, afecte de manera significativa la adherencia entre capas asfálticas. Incluso en algunas combinaciones, similar a lo que ocurrió en el tramo de pruebas de la NCHRP, las resistencias de testigos de zonas sucias superan a las de zonas limpias, avalando la posibilidad de que el polvo roca y el material fresado, al ser materiales nobles para la conformación de asfalto, actúan también como una especie de macilla de alta viscosidad, la cual se reactiva gracias a las altas temperaturas de la capa de rodado, permitiendo reforzar la unión entre las capas asfálticas.

En términos generales y de acuerdo a lo mencionado, es importante precisar, en qué situaciones la presencia de suciedad puede ser realmente nociva para la adherencia entre capas, permitiendo en ciertos casos, la posibilidad de prescindir de manera criteriosa, de algunos procesos sobredimensionados, con el fin de optimizar los tiempos y recursos, sin desmedro de afectar la calidad la adherencia en los pavimentos asfálticos. Reparando que en el presente, todavía no existe una cantidad de información suficiente respecto a la influencia de la suciedad en la adherencia entre capas, es mandatorio mantener las superficies totalmente limpias, sin ninguna presencia de agentes externos. Por lo que corresponde seguir investigando sobre el tema, considerando diversos tipos de suciedad, en diferentes cantidades y condiciones, en pos de complementar las especificaciones actuales.

6.7. Tiempo de curado

Respecto a la afirmación que indica que no es aconsejable dejar que la emulsión asfáltica cure demasiado tiempo, es importante recalcar que se debe especificar qué tiempo de curado se considera puntualmente como “demasiado”. Las emulsiones asfálticas son sustancias en las que su proceso de quiebre se ve totalmente influenciado por las condiciones atmosféricas del ambiente, en

especial por la temperatura. De acuerdo al tramo de pruebas confeccionado, éste fue construido en el mes de diciembre durante el verano, con altas temperaturas ambientales cercanas a los 30°C. Tanto para el tiempo de curado de 2 horas, como para el tiempo de 24 horas, las dos emulsiones utilizadas ya se encontraron totalmente quebradas al momento de colocar posteriormente la capa de rodadura. Esto se puede confirmar de acuerdo a la notoria diferencia existente entre las resistencias al corte de testigos Sin Curar con los otros valores de tiempos de curado de 2 y 24 horas. Con estos resultados, se puede apoyar la premisa que afirma que la película asfáltica de emulsión ya debe estar quebrada al momento de colocarse la capa superior de asfalto, no obstante, en términos económicos, se debe minimizar en lo más posible el tiempo desde que el riego de liga está quebrado a la superposición de la mezcla asfáltica.

Los resultados obtenidos en este estudio, indican que los testigos extraídos con riego de liga Sin Curar (1 hora en realidad), tanto para la emulsión CSS-1h como Termoadherente, presentan resistencias al corte menores, dejando sólo en discusión los tiempos de 2 y 24 horas de curado, para este caso. También es importante mencionar, de acuerdo a lo obtenido, que el mayor aumento en el nivel de adherencia se produce en los primeros instantes, dentro del rango comprendido entre la colocación del riego de liga y las 2 horas de tiempo de curado. Con el fin de facilitar el análisis de la influencia del tiempo de curado en el nivel de adherencia entre capas asfálticas, se han distinguido 4 grupos, definidos por el tipo de superficie y la emulsión utilizada:

- Para superficies Fresadas con CSS-1h, las resistencias al corte más altas se obtienen con un tiempo de curado de 24 horas, distinguiéndose un aumento sutil de no más de 0,2 MPa entre las 2 y 24 horas.
- Para superficies Sin Fresar con CSS-1h, los valores de adherencia mayores se obtienen con un tiempo de curado de 2 horas, observándose las diferencias mayores entre las 2 y 24 horas, las cuales, no logran superar los 0,25 MPa.
- Para superficies Fresadas con E. Termoadherente, las resistencias al corte de los tiempos de curado de 2 y 24 horas son muy similares, por lo tanto, no existe una superioridad bien definida en cuanto al nivel de adherencia.
- Para superficies Sin Fresar con E. Termoadherente, el tiempo de curado de 2 horas logra resistencias de corte bastantes mayores que las de 24 horas, diferenciándose en algunos casos con valores cercanos a los 0,4 MPa.

Conforme a estos resultados, se obtienen en general, mejores resultados con un tiempo de curado de 2 horas, confirmando la suposición de que el quiebre ya ocurrió luego de las 2 horas de la aplicación del riego de liga, ya que las temperaturas y el porcentaje de humedad ambiente, favorecen este proceso químico. También es por mucho más conveniente en términos económicos, que el tiempo de curado necesario sea de 2 horas y no de 24 horas, sin desmedro de disminuir considerablemente el nivel de adherencia por causa de adelantar la colocación de la capa de rodadura. El hecho de que la combinación que considera una superficie Fresada con CSS-1h, haya obtenido levemente mejores resultados con un tiempo de curado de 24 horas, puede atribuirse a la presencia de sobreacumulación de riego de liga en los valles de la superficie fresada. Simultáneamente a esto se puede considerar, además, que la emulsión CSS-1h requiere de un mayor tiempo de curado para quebrar en comparación con la emulsión Termoadherente, puesto que la primera corresponde a una emulsión de curado lento, además de ser bastante más susceptible a bajas temperaturas. Por este motivo, que para seguir complementando la información referida al tema, se invita a futuro a confeccionar tramos de pruebas en diferentes periodos del año, a fin de estimar la

influencia que tienen las condiciones atmosféricas en el desempeño de las distintas emulsiones asfálticas utilizadas como riego de liga.

6.8. Resistencia monolítica v/s resistencia doble capa

Los datos obtenidos mediante el Ensayo de Corte LCB, en el Gráfico 68, para testigos doble capa de 6 pulgadas, arrojaron resistencias al corte situadas en un rango de 0,13 y 0,78 MPa, con un promedio de 0,53 MPa para superficies sin fresar, y un rango de 0 y 1,43 MPa, con un promedio de 1,07 MPa para superficies fresadas. El promedio general de todos los testigos doble capa, corresponde a 0,88 MPa. Por otro lado, se ensayaron 10 estructuras monolíticas correspondientes al recapado de banda granulométrica IV-20, obteniéndose un promedio de resistencia de 1,02 MPa. En cuanto a la densidad de los testigos monolíticos de recapado extraídos, su promedio corresponde a 2358 kg/m³, con una desviación estándar de 27 kg/m³. Es importante mencionar, que los valores de resistencia doble capa que superan la tensión monolítica, corresponden a un 23,7% de los datos totales, todos ellos convergen a una superficie fresada, encontrándose también todos los niveles respectivos para el resto de variables, excepto por la dosis residual nula y el riego de liga Sin Curar. Según la investigación realizada por Álvarez C. [1], que considera probetas doble capa de banda IV-12 (densa), con superficies sin fresar y monolíticas, en el Gráfico 5, las tensiones máximas de las primeras no logran superar los 0,57 MPa y mucho menos los 0,65 MPa correspondientes a la resistencia monolítica de la mezcla IV-12 (con 5,7% de cemento asfáltico y una densidad Marshall de 2395 kg/m³), afirmando que la resistencia de probetas monolíticas es mayor que la resistencia de probetas doble capa. Algo similar se obtuvo en la memoria de Jara P. [11], donde se puede observar en el Gráfico 6 y Gráfico 7, que las resistencias doble capa IV-A-12/BINDER con emulsión Termoadherente y CSS-1h, en ningún caso superan la resistencia monolítica de 1,6 MPa para probetas confeccionadas con mezcla IV-A-12, de densidad al 98% Marshall correspondiente a 2322,6 kg/m³. De acuerdo a la información obtenida en estas investigaciones expuestas, se puede afirmar lo siguiente:

- La resistencia al corte de un elemento monolítico, no necesariamente va a ser siempre superior a la resistencia de elementos doble capa, ya que la corrugosidad producto del fresado en la capa de soporte, provoca una trabazón de las crestas de cada capa, debido a su configuración propiamente tal, provisionando una mayor adherencia entre las capas asfálticas, las cuales en algunos casos, pueden resistir altas cargas de corte, incluso, superiores a las de un elemento monolítico.
- Es importante considerar además, que el asfalto al no ser un material isotrópico, con diferentes materiales de diversa rigidez, con una distribución difusa y aleatoria de sus componentes, permite que las fallas de corte de estructuras monolíticas se originen en singularidades, las cuales no representan necesariamente la adherencia al corte de toda la estructura de la mezcla, induciendo cierto nivel de sesgo en cuanto a la resistencia real.
- Otro punto a considerar, es la edad de la mezcla utilizada como referente del monolitismo de un elemento asfáltico, puesto que una estructura joven puede presentar menor resistencia que una estructura de igual característica, libre de deterioro pero de mayor edad. Por tanto, es de suma importancia tener en cuenta las características de diseño y la edad del elemento monolítico con el cual se comparan las adherencias de muestras doble capa.
- La resistencia monolítica depende directamente de la densidad y del tipo de mezcla. Con una mezcla abierta, lo más probable es que se obtengan resistencias menores en comparación con mezclas de graduación semi densa o densa. Si esto no se cumple, la

medición de los valores de resistencia máxima pueden haber sido influenciados por distintas velocidades de carga en el ensayo de corte, induciendo cierto nivel de sesgo en la comparación.

6.9. Relación de testigos de diámetro 4 v/s 6 pulgadas

Diversos estudios, relacionados con la mecánica de materiales, han determinado que la geometría de las muestras, en este caso el diámetro de testigos y/o probetas asfálticas, tiene una influencia directa en la tensión de corte máxima, apuntando a que la distribución de esfuerzos no es la misma si el radio y por ende, su superficie transversal respectiva que soporta las cargas, es distinta.

Como se puede observar en el Gráfico 69, se tienen las resistencias de corte para las muestras de 4 y 6 pulgadas del estudio realizado por Jara P. [11] (puntos azules, realizado con probetas de laboratorio) y por la investigación considerada en esta memoria (puntos verdes, realizado con testigos). Así, se puede distinguir que ambas correlaciones lineales se encuentran por debajo de la curva identidad, en este caso, indicando que se obtienen, para condiciones de adherencia similares pero diámetros distintos, resistencias mayores en muestras con diámetro de 4 pulgadas, avalando la postura de la existencia de una resistencia diferente producto de la geometría transversal. A pesar de que ambas aproximaciones lineales difieren en su coeficiente de posición y correlación, éstas presentan una pendiente muy similar, indicando que la resistencia de corte de los testigos cilíndricos, medidos de diámetro de 6, corresponde a un 75%, aproximadamente, de la resistencia en testigos de 4 pulgadas. Ya que el número de ensayos para este estudio es bastante acotado, es necesario complementarlo con un mayor número de ensayos de muestras, en distintas condiciones de riego de liga, emulsión y mezclas, a modo de estimar y materializar de forma más certera y completa, una relación matemática entre las resistencias de corte para diferentes diámetros de muestras asfálticas cilíndricas.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los efectos de diferentes parámetros de influencia en la adherencia entre capas asfálticas, son diversos y complejos en su conjunto, abarcando diferentes procesos físico-químicos en la unión de las distintas capas estructurales. Este estudio, realizado en el laboratorio del Centro de Desarrollo e Investigación (CDI) de Bitumix S.A y PROBISA S.A, ha medido los efectos de estas variables por medio del Ensayo de Corte LCB, cuantificando la resistencia al corte en la interfaz para testigos asfálticos de dos capas extraídos de un tramo de pruebas, que consideran de forma simultánea, un set de distintas condiciones de unión. La literatura señala, que la resistencia al corte medida en testigos depende de la provisión de adherencia entre capas por medio del riego de liga, pero además también se deben considerar otros factores tales como la Dilatancia, la Cohesión Interna y la Fricción Pura.

De acuerdo a la revisión de bibliografía a nivel nacional e internacional, relacionada con el tema, y al trabajo realizado, se verifica la importancia de proveer un nivel de adherencia adecuado entre las diferentes capas asfálticas que componen un pavimento, permitiendo un desempeño acorde con las exigencias actuales de diseño. Las diferentes capas al encontrarse unidas, lo más parecido a una estructura monolítica, permiten que la distribución de esfuerzos, producto de las cargas de tráfico, sea controlada, evitando la aparición prematura de ciertos deterioros causados por una ligazón deficiente.

Con los resultados obtenidos en este estudio, se puede afirmar que el riego de liga es un compuesto indispensable para unir estructuras asfálticas conformadas por una capa de soporte de cierta antigüedad, y una capa superior nueva, indistintamente del tipo de superficie base, ya sea fresada o no. El hecho de que ambas estructuras, a pesar de conformarse por mezclas similares, sean elaboradas y compactadas en periodos distintos y considerablemente extensos entre sí, hace que la provisión de unión, para dicho caso, tenga desventaja en comparación con las capas superpuestas consecutivamente, requiriendo obligatoriamente la necesidad de utilizar el riego de liga. Para otras situaciones, como las expuestas en la recopilación bibliográfica, donde las capas de las probetas se unen y compactan estando ambas aun a altas temperaturas, de acuerdo a los resultados de resistencias al corte, si se puede prescindir del riego de liga en algunos casos, no obstante, se debe ser cauto y criterioso para tomar dicha decisión, ya que ésta debe ser justificada previamente con información fundada, considerando las condiciones de cada caso en particular.

Considerando que en la práctica se pueden presentar diversas situaciones de unión en la interfaz, la dosis óptima de emulsión asfáltica utilizada como riego de liga, necesaria para proveer una unión suficiente entre las capas asfálticas, no corresponde a una mera cantidad puntual y específica, por lo que sólo se pueden recomendar rangos de aplicación para ciertas condiciones puntuales que diferencien de manera significativa las cantidades de dosis óptima, debido a parámetros tales como el tipo de superficie y la emulsión a utilizar. Es sabido, que cantidades bajas de emulsión asfáltica no son suficientes para adherir una capa con otra. Lo mismo ocurre si las cantidades son excesivas, debido a que en dichos casos, el asfalto se comportaría como una especie de lubricante, disminuyendo considerablemente la fricción en la interfaz. Este comportamiento, se puede respaldar matemáticamente en las correlaciones de los datos obtenidos en el tramo de pruebas construido, visto que la forma parabólica de las curvas indican la presencia de una cantidad óptima de dosis residual de emulsión, que maximiza la adherencia entre capas asfálticas. El rango de dosis óptima para las superficies sin fresar del tramo de pruebas se sitúa cercano a los 260 g/m², y para superficies fresadas a 280 g/m² aproximadamente, siendo levemente mayor la cantidad requerida para maximizar la adherencia, producto de una mayor superficie específica. También cabe mencionar, que estos valores si se encuentran dentro del rango recomendado por el Manual de

Carreteras, situados muy cerca del límite inferior, no obstante, sería provechoso estudiar en un tramo similar, las resistencias para testigos con dosis residuales de emulsión cercanas a los 600 g/m².

Realizando una comparación entre superficies fresadas y sin fresar, los resultados del tramo de pruebas indican que en las primeras, se alcanza considerablemente una mayor resistencia entre las capas asfálticas, debido a la trabazón mecánica producto de su configuración en la interfaz. Así, el componente de la fricción pura incrementa considerablemente la resistencia, incluso más que el aporte del riego de liga a la adherencia, a pesar de ello, esta condición se cumple mientras exista la aplicación del riego de adherencia. Por lo tanto, no es recomendable fresar y prescindir de la utilización de emulsión asfáltica, ya que las resistencias pueden ser incluso más bajas que en superficies sin fresar y sin emulsión. Con esta información, se puede afirmar que es considerablemente más conveniente fresar el espesor de capa asfáltica dañado y colocar un recapado, que remover la capa asfáltica total.

El tiempo de curado también debe considerarse como una variable de influencia importante en la unión de las capas asfálticas. De los resultados de este trabajo, se puede decir que la maximización de la adherencia se logró para tiempos de curado de dos horas, tanto para la emulsión CSS-1h y Termoadherente, en presencia de altas temperaturas ambientales de verano, rondando los 30°C, con el riego de liga expuesto al sol y con bajos porcentajes de humedad ambiental. Atendido que estas condiciones propician que el quiebre de la emulsión sea prematuro, y que los resultados en cuanto a la resistencia al corte son mayores, se puede afirmar que es imperante la necesidad de dejar que las emulsiones asfálticas quiebren y luego de eso, se pueda colocar la carpeta de rodadura, procurando no dejar el riego de liga un tiempo excesivo y mayor a un día, pues la disminución de la adherencia es considerable luego de las 24 horas.

Constantemente se trabaja para mejorar las características físico-químicas de las emulsiones asfálticas, a fin de perfeccionar su desempeño y manipulación en las obras viales. A lo largo del tiempo, se han implementado diferentes tipos de emulsiones, abarcando un gran espectro en cuanto al nivel de adherencia que cada una puede proveer. El estudio realizado, consideró el análisis del desempeño de adherencia para la emulsión catiónica de quiebre lento CSS-1h y la emulsión catiónica de quiebre rápido modificada Termoadherente. Los resultados en términos generales, indican resistencias al corte muy similares para estas dos emulsiones, notándose de forma muy leve, una superioridad de resistencia al corte con la emulsión Termoadherente. Un punto muy importante a considerar, es la característica especial que tiene en cuanto a un alto nivel de adherencia entre las capas asfálticas y la nula pegajosidad presente antes de la colocación de la carpeta superior, evitando el desprendimiento del residuo asfáltico por el paso del tráfico de obra y de la maquinaria de extensión de la mezcla. Tomando estas consideraciones, acotando que los resultados representan condiciones de temperatura ambiental altas, la emulsión Termoadherente se puede considerar como una mejor opción para utilizarse como riego de liga si se requiere un corto periodo entre la aplicación de emulsión y la colocación de la capa de rodado, empero, su puesta en obra debe realizarse rigurosamente, manteniendo una agitación periódica de la emulsión, junto a la incorporación de un sistema de calentamiento que permita un buen funcionamiento de los camiones imprimantes.

De acuerdo al estudio realizado y a la literatura disponible, el nivel de adherencia no se ve comprometido con dosis controladas de humedad sin saturar antes de la aplicación del riego de liga. Estas dosis mencionadas, se encuentran por debajo de los 0,27 l/m², cantidad suficiente para representar una humedad discreta sin excesos de agua, la cual no representa situaciones climáticas adversas tales como la lluvia, neblina excesiva, nieve o vaguada costera. Por otro lado, otros trabajos de investigación han analizado el efecto que tiene la humedad en dosis bajas de 0,2 l/m² por

encima del riego de liga ya quebrado, comprobando la influencia negativa que tiene en la adherencia entre capas asfálticas. Es por esto, que se puede concluir que la humedad remanente producto del fresado, tomando en cuenta que no existen ningún lugar con agua depositada, no produce un efecto significativo en la unión de capas asfálticas, sin embargo, y según las disposiciones del Manual de Carreteras, se debe suspender el proceso de provisión de adherencia y en sí, la obra, si las condiciones atmosféricas no son favorables.

En cuanto al nivel de limpieza antes de la aplicación del riego de liga, tanto los resultados de este estudio como la bibliografía disponible, señalan que la presencia de suciedad puede generar diferentes efectos en el nivel de adherencia, dependiendo del tipo de árido o agente depositado involuntariamente, además de la cantidad. En algunos casos, se produce una especie de macilla de alta viscosidad que incluso mejora la resistencia al corte, y en otras situaciones como la ocurrida en la pista de aterrizaje del aeropuerto de Santiago, donde se introdujo accidentalmente una capa de pomacita, se ha reducido considerablemente el nivel de unión de las capas asfálticas, provocando serios daños por desprendimiento. Más aún, si la intromisión de agentes externos sólidos ocurre encima, luego de que el riego de liga haya quebrado, la adherencia de capas se ve completamente afectada, y ni siquiera la reactivación de la emulsión, producto de las altas temperaturas de la capa de rodado, puede mitigar dicha deficiencia. En función de lo dicho anteriormente, y dado que en los casos que el aumento de la adherencia, producto de la intromisión de algún árido, no es considerablemente mejor que el caso opuesto, los estudios realizados avalan las disposiciones del Manual de Carreteras chileno, siendo necesaria una limpieza rápida de las superficies antes del riego de liga mediante barredoras si el agente es polvo. Para casos excepcionales como barro seco u otro elemento químico, la limpieza tendrá que realizarse con mayor minuciosidad mediante alguna especie de hidrolavadora. Por otro lado, si el riego de liga se deja curar un tiempo considerable y la presencia de polvo es inminente, no debiese descartarse la posibilidad de colocar una protección sobre el riego de liga luego que quiebre, evitando a como dé lugar que se ensucie.

Finalmente, de acuerdo al análisis ANOVA y al estudio realizado por medio de los gráficos de Influencia y Diferencia, las variables que tuvieron una mayor incidencia en la adherencia entre capas, en orden decreciente, corresponden al Tipo de Superficie, Tiempo de Curado, Dosis Residual y Tipo de Emulsión. En cuanto a los factores Nivel de Limpieza y Nivel de Humedad antes del riego de liga, se estimó que no se consideran como causantes de un efecto considerable en el grado de adhesión entre capas asfálticas. Tomando en cuenta los resultados, considerando los niveles de superficies fresadas y sin fresar, con emulsión Termoadherente a 200 y 400 g/m², un tiempo de curado de 2 horas, para una superficie limpia, sea húmeda o seca, todas las resistencias sobrepasan los 0,7 MPa., para testigos de 6 pulgadas, lo que indica, que para testigos de 4 pulgadas, sobrepasan de forma estimativa, los 0,9 MPa., valores considerados como aceptables para los criterios adoptados en la Memoria de Matías Roni de la UTFSM y por Vespucio Norte.

Recomendaciones

El Ensayo de Corte LCB, es un procedimiento de fácil implementación respecto a la ejecución del ensayo propiamente tal, pero de complicada manipulación, ya que las muestras, previamente, se deben ajustar dentro de una mordaza, la cual se debe apretar con ayuda de pernos, acción que resulta bastante tediosa debido al volumen de muestras a ensayar y al desgaste de los pernos que pierden el hilo. Es aconsejable que el ajuste de la mordaza y su posterior apriete, sea mejorado con algún otro sistema, que permita disminuir los tiempos de acomode de los testigos y evitar un gasto desmedido de pernos y tiempo.

Un parámetro que es importante controlar, es la temperatura de ensayo. De acuerdo a los ensayos realizados, la temperatura influye considerablemente en el nivel de adherencia de las muestras al ensayarse, por lo que se recomienda, idealmente, que el lugar en donde se acondicionen a 20°C las probetas o testigos, sea el mismo donde se encuentre el dispositivo de Ensayo de Corte LCB.

Respecto a la aplicación del riego de liga mediante rodillos, a pesar de no ser el método más idóneo, tomando en cuenta ciertas restricciones de recursos, esta metodología de aplicación, cumple de manera satisfactoria los requerimientos necesarios para cubrir cantidades relativamente acotadas de área con diferentes dosis de emulsión asfáltica, pudiendo representar las cantidades de dosis residual depositadas luego del quiebre. No obstante, es importante contar con un personal capacitado e instruido previamente mediante pruebas en terreno, con el fin de que la aplicación del riego de liga sea rigurosa y minuciosa, evitando cualquier margen de error a como dé lugar.

De acuerdo a la confección del tramo de pruebas, es mandatorio, que exista una completa y detallada planificación de su construcción, teniendo bien definidas las variables y los posibles inconvenientes que se pueden presentar durante la obra, en especial al momento de la aplicación del riego de liga. Por tanto, es crucial y relevante contar con la disponibilidad de personal idóneo, de los recursos necesarios y una correcta planificación sincronizada de las labores, en pos de obtener un buen producto que represente de manera fidedigna lo que se quiere medir de la obra.

Futuras líneas de investigación

De acuerdo al trabajo realizado, a continuación se mencionan algunos aspectos necesarios para abrir la posibilidad de incentivar futuras líneas de investigación, que ayuden a complementar los conocimientos en relación a la adherencia de capas y al riego de liga:

- Construir un tramo de pruebas doble capa, con diferentes mezclas asfálticas y que consideren además, otros parámetros de suciedad (diversos agentes contaminantes a diferentes dosis, bajo y sobre el riego de liga) en una época de bajas temperaturas, con el fin de analizar la susceptibilidad térmica en el desempeño de la adherencia, para distintas emulsiones a diferentes tiempos de curado.
- Realizar un estudio más exhaustivo y enfocado a relacionar matemáticamente los valores de resistencia al corte para muestras doble capa de diámetros de 4 y 6 pulgadas, con diferentes emulsiones y condiciones de unión.
- De acuerdo a un nuevo tramo de pruebas confeccionado, relacionar los distintos efectos producidos por las diferentes superficies de cada tipo de mezcla, en las dosis óptimas de emulsiones asfálticas, considerando los porcentajes de emulsión retenido por el ensayo de absorción de ligante.
- Corroborar, mediante un tramo de pruebas similar al construido en este estudio, que valores cercanos a 265 g/m², corresponden verídicamente a la dosis residual óptima general.
- Representar un tramo de pruebas similar al confeccionado en esta investigación, con altas dosis de emulsión, cercanas al límite superior del rango recomendado de aplicación del riego de liga según el Manual de Carreteras.

REFERENCIAS

- [1]. Álvarez, C. (2007). “*Estudio experimental de la resistencia de la adherencia entre capas en la construcción de carpetas asfálticas en caliente*”. Memoria Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Dpto. de Ingeniería Civil.
- [2]. Vargas, P. (2008). “*Estudio experimental de soluciones de construcción para asegurar la adherencia entre capas asfálticas*”. Memoria Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Dpto. de Ingeniería Civil.
- [3]. Manual de Carreteras, Vol. N°5: Especificaciones Técnicas Generales de Construcción, Ministerio de Obras Públicas, Chile. Diciembre 2016.
- [4]. Manual de Carreteras, Vol. N°8: Especificaciones y Métodos de Muestreo, Ensaye y Control, Ministerio de Obras Públicas, Chile. Diciembre 2016.
- [5]. Especificaciones de cementos asfálticos de PROBISA S.A. Retrieved from <https://www.probisa.cl/asfalticos.html>
- [6]. Laboratorio Nacional de Vialidad, curso de laboratorista vial, Volumen 4: Ligantes asfálticos y Sellos de Juntas, Chile.
- [7]. Laboratorio Nacional de Vialidad, curso de laboratorista vial, Volumen 5: Mezclas Asfálticas, Chile.
- [8]. Pattillo, J. (1998). Ingeniero Civil, M.Sc., PUC. Revista de Ingeniería de Construcción, N°4.
- [9]. Obras y servicios de Bitumix S.A. Retrieved from <https://www.bitumix.cl/que-hacemos/obras-y-servicios>
- [10]. L. Tashman, K. Nam, F. Rojas, T. Papagiannakis (2006). “*Evaluation of the influence of tack coat construction factors on the bond strength between pavement layers*”. Report prepared for Washington State Department of Transportation (WCAT).
- [11]. Jara, P. (2017). “*Implementación de ensayo de corte LCB en el CDI de Bitumix para evaluar la adherencia de riegos de liga para distintos diámetros (4” y 6”) de muestras*”. Memoria Universidad Central de Chile, Facultad de Ingeniería, Escuela de Obras Civiles y Construcción.
- [12]. L. Mohammad, A. Elseifi, A. Bae, N. Patel (2006). “*Optimization of Tack Coat for HMA Placement*”. Report 712 prepared for National Cooperative Highway Research Program (NCHRP).
- [13]. Roni, M. (2007). “*Análisis teórico y experimental de la adherencia entre capas asfálticas para cargas de aeronaves*”. Memoria Universidad Técnica Federico Santa María, Departamento de Obras Civiles, Ingeniería Civil.
- [14]. Laboratorio de Caminos de Barcelona. (2008). Norma NLT-382/08 “*Evaluación de la adherencia entre capas de firme, mediante ensaye de corte*”.

- [15]. Guerrero-Aguilera, S. (2015). *“Buenas prácticas constructivas en la aplicación de riego de liga para la colocación de sobrecapas asfálticas”*. Universidad Nacional de Costa Rica. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME).
- [16]. R. West, J. Zhang, J. Moore, (2005). *“Evaluation of bond Strength between pavement layers”*. Report prepared for National Center for Asphalt Technology (NCAT).
- [17]. C. Raab, M.N. Partl, (2004). *“Effect of tack coats on interlayer shear bond of pavements”*. Proceedings of the 8th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa.
- [18]. Abd-El Naby, S.M. Easa, (2002). *“Evaluation of the bond characteristics between asphalts concrete layers”*. Annual Conference of the Canadian Society for Civil Engineering. Montréal, Québec, Canada.
- [19]. J.C. Roffe, F. Chaignon, (2002). *“Characterisation Tests on Bond Coats: Worldwide Study Impacts, Tests, and Recommendations”*. 3rd International Conference Bituminous Mixtures and Pavements, Thessaloniki.
- [20]. Aravena, C. (2008). *“Validación de un método de impacto para verificar el monolitismo en pavimentos asfálticos multicapas”*. Memoria Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Dpto. de Ingeniería Civil.
- [21]. De la Fuente, S. (2006). *“Análisis de Varianza”*. Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales, Universidad Autónoma de Madrid.