



**UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES**

EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD AL DAÑO POR HUMEDAD DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE UTILIZANDO ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA

JAVIERA PAZ ARANDA BÖHM

Ingeniero Civil

Junio de 2017



UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES

EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD AL DAÑO POR HUMEDAD DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE UTILIZANDO ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA

Memoria de Título presentada por

JAVIERA PAZ ARANDA BÖHM

Como requisito parcial para optar al título de

Ingeniero Civil

Profesor Guía
Cristián Díaz

Profesor Correferente
Rodrigo Delgadillo

Junio de 2017

Agradezco al Centro de Desarrollo e Investigación por su confianza, especialmente a mi profesor guía Cristián Díaz y laboratorista Pedro Quezada por siempre brindarme su apoyo y motivación.

Agradezco a mis compañeros y amigos de universidad, por sobretodo a mis amigas que desde el primer día estuvieron a mi lado, enfrentando todos los desafíos juntas.

Agradezco a mi novio Alexis, quien ha sido un apoyo incondicional y pilar para mi.

Por siempre agradeceré a mi familia, mi padre quien siempre me enseñó el amor hacia lo que uno hace. Mi madre, a quien admiro cada día por su esfuerzo, dedicación y cariño. A mis hermanas mayores Fernanda y Maricela, quiénes son un ejemplo a seguir, tanto como profesionales y como madres.

Resumen

Dentro de las principales etapas de las Obras de Vialidad, se encuentran diferentes factores de diseño, procedimientos y ensayos para determinar las propiedades de los materiales de las mezclas asfálticas, y así, poder caracterizarlas. El diseño de estas mezclas tiene que tener en consideración que se elaboran con áridos y ligante, cuyas características y dosificaciones se determinan mediante diferentes normas, con el objetivo de cumplir los requerimientos que aseguren un buen funcionamiento estructural, comodidad y seguridad a los usuarios.

El siguiente trabajo de investigación presenta un estudio de la susceptibilidad a daño por humedad de las mezclas asfálticas en caliente provenientes de dos plantas de la empresa BITUMIX, ubicadas en las zonas del Maule, e Iquique, Chile. El ensayo se realiza aplicando tracción indirecta mediante 3 métodos diferentes: el primero de ellos mediante la norma AASHTO T283-14, el segundo basado en la norma ASTM D 4867-09 y finalmente la Norma Española UNE EN 12697-12 con especificaciones del Laboratorio Nacional de Vialidad (LNV). Además, cada ensayo se realiza con 3 tipos de mezclas: con cemento asfáltico CA-24, CA-24 más un aditivo de mejoramiento de adherencia y CA-24 más un aditivo de mejoramiento de trabajabilidad. Por otro lado, este estudio contempla el ensayo de rueda de Hamburgo para tener otra perspectiva de análisis a la susceptibilidad al daño por humedad.

De los resultados obtenidos, la mayoría de las mezclas con cemento asfáltico sin aditivo no cumplen con las normas de estudio. Del mismo modo, para la mayoría de los casos, con la utilización de los aditivos mejoradores, se obtienen mejoras significativas en las propiedades de las mezclas asfálticas como la adhesión y resistencia de las muestras.

Palabras Claves: Stripping, daño por humedad, TSR, Rueda de Hamburgo.

Abstract

One of the most important things to do in every road project is to know the different design factors, procedures and tests to determine the properties of the materials and characterize asphaltic mixtures. The designs of the asphalt mixtures are made with aggregate and binder, whose characteristics are determined by different standards to accomplish certain requirements to ensure a good structural operation, comfort and safety to users. To do this, you must consider the emplacement of the project, as well as the expected solicitations.

The following investigation determinate the susceptibility of hot asphalt mixtures to moisture-Induced damage from two plants of the company BITUMIX, located in Maule and Iquique, Chile, containing aggregates with different compositions and their respective approved design. The test made is for indirect-tensile strength through 3 different procedures, the first one is AASHTO T283-14, second ASTM D4867-09 and finally Spanish Norm UNE EN 12697-12 with modifications by National Road Laboratory (LNV). However, each method is executed by 3 types of asphalt mixtures: CA-24 without modifications, CA-24 with an additive that improved adherence and finally, CA-24 with an additive that improved workability. On the other hand, this study performs a Hamburg wheel test through the design of Iquique; this is a way to have another perspective of analysis to the susceptibility of the damage by humidity.

From the results, most hot mixtures without additive do not comply with the limit of the Norms standards. Also, we have visualized that in most cases, it is preferred to occupy an additive, to prevent any problem with the moisture of the mixtures and to give confidence of a pavement with a high percentage of resistance to damage.

Key words: Stripping, moisture damage, TSR, Hamburg wheel

CONTENIDO

RESUMEN	IV
ABSTRACT	V
CONTENIDO	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE TABLAS	X
ÍNDICE DE ECUACIONES	X
1 INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	4
2 RECOPIACIÓN BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 Antecedentes	5
2.2 Marco conceptual	10
3 METODOLOGÍA Y MATERIALES	20
3.1 Procedimiento para el ensayo Tensile Strength Ratio (TSR)	21
3.2 Procedimientos para el ensayo Rueda De Hamburgo (HWTD: Hamburg Wheel Tracking Device)	26
3.3 Factores de influencia en el daño por humedad	28
3.4 Materiales	31
4 RESULTADOS Y ANÁLISIS	36
4.1 Resultados TSR Planta MAULE	38
4.2 Resultados TSR Planta IQUIQUE	56
4.3 Análisis TSR de daño por planta de árido	75
4.4 Análisis Rueda de Hamburgo	81
4.5 Análisis ensayos de Adherencia mediante el métodos estático, dinamico y Riedel-Weber.	83
5 DISCUSIONES	85
5.1 Agregado	85
5.2 Aditivo	86

5.3	Envejecimiento	87
5.4	Temperatura ensayo	88
5.5	Normas	88
5.6	Ensayo TSR vs Rueda de Hamburgo	89
5.7	Ensayo TSR vs Actualidad	90
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		92
REFERENCIAS		96
ANEXOS		99

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Compuestos del asfalto.	10
Figura 2: Proceso de refinación del petróleo.	11
Figura 3: Representación de los volúmenes en una mezcla asfáltica compactada.	16
Figura 4: Estructura Pavimento Flexible.	19
Figura 5: Fuentes de humedad en una estructura de Pavimentos Flexibles.	20
Figura 6: Fotografía equipo TSR.	22
Figura 7: configuración de la carga, así como la rotura del ensayo TSR.	23
Figura 8: Definición de los resultados del ensayo Rueda de Hamburgo. (Yildirim & Thomas Kennedy, 2001)	27
Figura 9: Gráfico ITS AASHTO T 283.	38
Figura 10: Gráfico Resultados Porcentaje ITSR AASHTO T 283.	40
Figura 11: Fotografía de Probeta CA-24 en Condición Seca y húmeda respectivamente.	42
Figura 12: Gráfico ITSR ASTM D 4867.	43
Figura 13: Gráfico Resultados porcentaje ITSR ASTM D 4867.	45
Figura 14: Gráfico ITSR LNV.	47
Figura 15: Gráfico Resultados porcentaje ITSR LNV.	48
Figura 16: Fotografía de Probeta CA-24 en condición Húmeda y probetas CA-24+AMA en condición seca y húmeda respectivamente.	50
Figura 17: Resumen NormasEnsayo TSR–Blanco.	51
Figura 18: Resumen NormasEnsayo TSR [kPa]– AMA.	52
Figura 19: Resumen NormasEnsayo TSR [kPa]- AMT1.	52
Figura 20: Gráfico ensayos TSR de Normas de probetas en condición Secas.	54
Figura 21: Gráfico ensayos TSR de Normas de probetas en condición Húmedas.	54
Figura 22: Gráfico ITSR AASHTO T 283.	56
Figura 23: Gráfico Resultados porcentaje ITSR AASHTO T 283.	58
Figura 24: Fotografía de Probeta CA-24 y CA-24+AMA en condición húmeda respectivamente.	59
Figura 25: Fotografía de Probeta AMT1 en condición Húmeda.	60
Figura 26: Gráfico ITSR ASTM D 4867.	61
Figura 27: Gráfico Resultados porcentaje ITSR ASTM D 4867.	63
Figura 28: Fotografía de Probeta CA-24 en condición Húmeda.	64
Figura 29: Gráfico ITSR LNV.	65
Figura 30: Gráfico Resultados porcentaje ITSR LNV.	67
Figura 31: Fotografía de Probetas en condiciones húmedas y secas respectivamente.:	68
Figura 32: Resumen NormasEnsayo TSR [kPa]– Blanco.	70
Figura 33: Resumen NormasEnsayo TSR [kPa]–AMA.	71
Figura 34: Resumen NormasEnsayo TSR [kPa]- AMT1.	71
Figura 35: Gráfico ensayos TSR de Normas de probetas en condición Secas.	73
Figura 36: Gráfico ensayos TSR de Normas de probetas en condición Húmeda.	73
Figura 37: ITSR para distintas mezclas asfálticasplanta MAULE - Norma AASHTO T283...75	

Figura 38: ITSr para distintas mezclas asfálticas planta IQUIQUE - Norma AASHTO T283.	76
Figura 39: ITSr para distintas mezclas asfálticas planta MAULE - Norma ASTM D 4867.	77
Figura 40: ITSr para distintas mezclas asfálticas planta IQUIQUE - Norma ASTM D 4867.	78
Figura 41: ITSr para distintas mezclas asfálticas planta MAULE - LNV.	79
Figura 42: ITSr para distintas mezclas asfálticas planta IQUIQUE - LNV.....	80
Figura 43: Gráfico resultado Rueda de Hamburgo.	81
Figura 44: Fotografía de probeta luego de ser ensayada mediante rueda de Hamburgo.	82

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Clasificación Mezcla asfáltica en Caliente de acuerdo a su granulometría.....	13
Tabla 2: Parámetros ensayo Normas ASTM D4867, AASHTO T283 y LNV.	25
Tabla 3: Diseño de la Planta del Maule.	31
Tabla 4: Diseño de la Planta Iquique.	32
Tabla 5: Tabla de contenidos de cemento asfáltico en el Diseño.	33
Tabla 6: Especificación Banda IV-A-12- Maule.	34
Tabla 7: Características de la mezcla-Maule.	34
Tabla 8: Mezcla de Trabajo- Maule.	34
Tabla 9: Especificación Banda 3/4' Iquique.	35
Tabla 10: Características de la mezcla-Iquique.	35
Tabla 11: Mezcla de trabajo- Iquique.....	35
Tabla 12: Resumen resultados TSR - AASHTO T 283.....	39
Tabla 13: Resumen del porcentaje de Daño AASHTO T 283.....	41
Tabla 14: Resumen resultados TSR – ASTM D4867	44
Tabla 15: Resumen del porcentaje de Daño ASTM D4867.....	46
Tabla 16: Resumen resultados TSR - LNV	48
Tabla 17: Resumen del porcentaje de Daño - LNV.....	49
Tabla 18: Resumen resultados TSR - AASHTO T283.....	57
Tabla 19: Resumen del porcentaje de Daño AASHTO T 283.....	59
Tabla 20: Resumen resultados TSR - ASTM D4867.....	62
Tabla 21: Resumen del porcentaje de Daño ASTM D4867.....	64
Tabla 22: Resumen resultados TSR - LNV	66
Tabla 23: Resumen del porcentaje de Daño LNV.	68
Tabla 24: Resumen características de la mezcla proveniente del Maule.	83
Tabla 25: Resumen características de la mezcla proveniente de Iquique.	83

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1: Porcentaje de compactación.	14
Ecuación 2: Porcentaje de Vacíos de aire.	15
Ecuación 3: Porcentaje de Vacíos de agregado mineral.....	16
Ecuación 4: Cálculo resistencia tracción indirecta.	23
Ecuación 5: Cálculo razón de resistencia TSR.	23

INTRODUCCIÓN

En Chile, casi el 90% de las vías pavimentadas son de asfalto (Vial, 2015) y utilizan un método empírico para su diseño estructural. Este método se basa principalmente en una ecuación de regresión experimental determinada a partir de una pista de prueba realizada a mediados del siglo pasado en los Estados Unidos, llamada prueba AASHTO.

Hoy en día, ya se han encontrado un gran número de pavimentos que han evidenciado muestras de deterioros, como, por ejemplo: desprendimiento de material (stripping), fallas por fatiga en las capas asfálticas o acumulación de deformaciones permanentes.

Un aspecto de suma importancia, que generalmente, no se considera para los métodos de diseño de pavimentos, es el daño por humedad de las capas asfálticas, que no necesariamente es causado por acumulación de esfuerzos, sino por una interacción

deficiente entre el ligante y agregados durante condiciones de humedad. Existen fenómenos que tienen directa relación con problemas de humedad, entre los cuáles se encuentran: agrietamientos prematuros, fisuras reflejadas, ondulaciones del pavimento y grietas longitudinales (National Cooperative Highway Research Program, 2000).

Este trabajo, se enfoca en evaluar la susceptibilidad al daño por humedad que tiene la mezcla asfáltica, para poder identificar los efectos adversos del agua y garantizar una resistencia mínima al daño por humedad. Además, de procedimientos y aditivos que promueven dicha resistencia.

Las manifestaciones más comunes del deterioro, causado por la presencia del agua al interior de una mezcla, son: desprendimiento (stripping), rotura de los agregados y problemas de adherencia. Sin embargo, hay varios factores adicionales que pueden afectar la adherencia la mezcla asfáltica, como lo son la adición de un modificante.

La importancia de esta investigación recae en que las mezclas dañadas por efecto de la humedad pierden cohesión y reducen la vida útil, acelerando el proceso de falla del pavimento. La utilización de diferentes normas, agregados y diseños en este estudio son fundamentales para observar y demostrar la sensibilidad de estas variables en las mezclas asfálticas en caliente. En Chile, aún no existe un análisis detallado de la susceptibilidad al daño por humedad, por ende, este factor no es considerado para el diseño y las fallas debidas al agua siguen ocurriendo, debilitando los caminos y carreteras, generando un descontento entre los usuarios.

Existen diversos métodos para caracterizar este tipo de daño en mezclas asfálticas. La mayoría de estos métodos tienden a ser empíricos y buscan evaluar la resistencia de la mezcla a daño por humedad. Algunos de estos ensayos son: Ensayo de ebullición, ensayo estático de inmersión, rueda de Hamburgo y ensayo a tracción indirecta (TSR: Tensile Strength Ratio).

En esta ocasión, se utilizan dos ensayos para poder compararlos: la rueda de Hamburgo y resistencia a Tracción Indirecta. Este último ensayo es el utilizado en este trabajo de investigación, debido a su simplicidad, siendo la metodología vigente para cuantificar el daño por humedad de las mezclas asfálticas tanto en Estados Unidos con la Norma AASHTO-T283, como en Europa con la Norma UNE EN-12697-12.

Caracteriza de forma eficiente, fiable y económica las muestras y a diferencia de otros ensayos, éste se basa en dos propósitos principales: el primero de ellos, es identificar si una combinación de ligante asfáltico y agregado es susceptible a la acción del agua. En segundo lugar, mide la efectividad de los aditivos mejoradores que, en este caso, son de adherencia y trabajabilidad.

El departamento de carreteras del Estado de Texas, por medio de investigaciones de Thomas Kennedy (Kennedy, 1982) de la Universidad de Austin, presentó las siguientes ventajas del ensayo TSR:

- Relativamente Sencillo.
- El tipo de muestra y equipo son los mismos que los utilizados para otros ensayos.
- La rotura no se ve afectada por condiciones de la superficie de la probeta.
- La rotura se inicia en una región relativamente uniforme de tensiones de tracción.
- El ensayo puede utilizarse bajo cargas estática y permite modificar la prensa para aplicar cargas dinámicas en función del tipo de estudio que se realice.

Sin embargo, cabe mencionar, que los resultados que se obtienen mediante el ensayo de TSR, no se pueden relacionar de forma directa con el desempeño real del pavimento, pero sí existen correlaciones entre lo determinado en laboratorio con el servicio de los pavimentos flexibles (National Cooperative Highway Research Program, 2000).

Se utilizaron tres métodos diferentes para realizar el ensayo, cada uno de ellos, tiene diferentes temperaturas de almacenamiento, tiempos de acondicionamiento, saturaciones, entre otros. Además, para determinar el daño por humedad, se fabricaron tres tipos de mezclas asfálticas en caliente, una con cemento asfáltico convencional (CA-24), y otras dos con aditivos mejoradores de adherencia (AMA) y trabajabilidad (AMT1). Este análisis evidencia el daño por humedad de forma cuantitativa, por medio del ensayo TSR y cualitativa, en función de un análisis visual de las probetas luego de ser examinadas.

OBJETIVOS

Objetivos Generales

- Determinar la susceptibilidad al daño por humedad de las mezclas asfálticas en caliente realizadas en laboratorio para carpeta de rodadura de 20[mm].

Objetivos Específicos

- Caracterizar muestras sometidas a condiciones de humedad.
- Determinar las mejoras físico-mecánicas de las mezclas asfálticas convencionales, CA-24, con aditivos de mejoramiento.
- Determinar el daño por humedad por medio del ensayo TSR.
- Evaluar la adhesión en la susceptibilidad del daño por humedad mediante ensayo de rueda de Hamburgo.
- Determinar la influencia de los agregados, aditivos y diferentes formas de ensayo de TSR en la susceptibilidad al daño por humedad.

RECOPILACIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 Antecedentes

Uno de los factores más relevantes en los pavimentos flexibles y que se ha estado estudiando hace años, es la sensibilidad al daño por humedad de las mezclas asfálticas. Esta se puede definir, como la pérdida en el desempeño de la capacidad estructural del pavimento, producto de la presencia de agua en estado líquido o gaseoso al interior de su microestructura (Spinel, 2010).

Desde comienzos de la década 30, Nichiolson (Nicholson, 1932), fue uno de los

primeros investigadores en estudiar los problemas de cohesión de las mezclas asfálticas. En su documento “Adhesion tension in asphalt pavements, its significance and methods applicable in its determination”, planteó la importancia de la elección del tipo de agregado y la presencia de la humedad en los pavimentos de asfalto. Luego, Francis Hveen (Hveen, 1943) planteó por primera vez métodos empíricos para poder determinar la susceptibilidad a la humedad, pero recién por los años 70, tomó importancia debido a la cantidad de reportes sobre el mal estado de las vías y grandes inversiones para poder repararlas.

En 1988, el Centro Nacional de Tecnologías del Asfalto de la Universidad Auburn, en Alabama, publicó un artículo cuya importancia recae en el estudio de los mecanismos de desprendimiento de material y cómo evaluar la función, necesidad y costo de aditivos mejoradores (Kiggundu, 1988). Dentro de esta extensa investigación, se definió el deterioro y la pérdida del enlace entre el ligante asfáltico y el agregado debido a la acción del agua.

Se han desarrollado una serie de ensayos de laboratorio con el fin de medir el efecto de la humedad en mezclas asfálticas para identificar las fallas en la unión entre el ligante asfáltico y el agregado. La mayoría de ellos, son métodos empíricos ensayados en laboratorio, que no siempre se relacionan directamente con lo observado en terreno. A continuación, se mencionan los ensayos más utilizados para la medición del daño por humedad:

- **Ensayo de ebullición y de inmersión estática:** Se realizan en mezclas en estado suelto. Ambas pruebas son cualitativas. No implican ningún análisis de resistencia en las mezclas de asfalto. Además, dado a que son subjetivas, la variabilidad en los resultados entre laboratorios es muy alta. (AASHTO T 182-84: Standard Method of Test for Coating and Stripping of Bitumen-Aggregate Mixtures)
- **Lottman Test:** Fue desarrollado por Lottman, como uno de los proyectos del Programa Cooperativo de Investigación de Carreteras Nacional de Estados Unidos (NCHRP- 246). La relación de resistencia a la tracción indirecta (TSR) de muestras en condiciones secas e húmedas. Mediante estudios realizados por Stuart (Stuart, 1986), Parker y Gharaybeh (Gharaybeh, 1987), se encontró,

que existe una relación relativamente buena entre los ensayos realizados en laboratorio con los resultados determinados mediante muestras de pavimentos existentes.

- **Acondicionamiento de Tunncliff y Root (ASTM D4867):** Fue propuesto por Tunncliff por medio de un Proyecto NCHRP 274 (Root, 1984). Especifica un TSR mínimo de 0,75. El uso de un ciclo de hielo-deshielo no es obligatorio. El aspecto más relevante de este ensayo, es la saturación de las probetas, que demostraron, que con una duración de tan sólo 24 horas era suficiente para inducir daños relacionados con la humedad.
- **Lottman Test Modificado (AASHTO T283):** Fue propuesto por Kandhal, donde combina las mejores características del ensayo de Lottman (NCHRP 246) y la Prueba de Tunncliff y Root (NCHRP 274). Este método ha sido aprobado en muchas agencias especializadas y además está incluido en las especificaciones de Superpave. Especifica un TSR mínimo de 0,8. (National Cooperative Highway Research Program, 2000).
- **Procedimiento Norma Española (EN 12697-12):** Este ensayo se basa en características del ensayo de Lottman, en muestras confeccionadas de acuerdo a metodología Marshall. Tiene una exigencia de TSR mínimo de 0,85 para capas superficiales.
- **Rueda de Hamburgo (HWTD):** Fue desarrollado a principios de 1970 por Helmut-Wind de Hamburgo, Alemania. Este ensayo entrega como resultados la profundidad de la ranura, puntos de inflexión del desprendimiento. Además, es utilizado para estimar la resistencia relativa de las muestras de asfalto al daño por humedad. (EN 12697-22).
- **Scanning Electron Microscope (SEM):** El microscopio con alta resolución fue desarrollado por Manfred von Ardenne en 1937, pero fue recién en 1995 donde Coomarasamy y Walzak lo utilizaron por primera vez para el análisis visual de muestras de pavimento asfáltico.
- **Asphalt Pavement Analyzer (APA):** Fue desarrollado por primera vez en 1996 por

Pavement Technology, Inc, pero fue en el año 2000, que se hizo uso la rueda de carga para medir el daño por humedad en mezclas asfálticas. Este método de análisis es utilizado para evaluar rotura, fatiga y los últimos años para estudios de resistencia al daño por humedad.

En la actualidad, el ensayo AASHTO T 283 es el más utilizado para evaluar el daño por humedad de las mezclas asfálticas en caliente. Se utiliza en el método Superpave (Superior Performing Asphalt Pavements) para el diseño de pavimentos, el cual está enfocado en producir una mezcla que se comporte adecuadamente mediante una cuidadosa selección y proporcionamiento de los materiales. Este método, considera en sus procedimientos el análisis del daño por humedad de las mezclas asfálticas para determinar con mayor precisión el comportamiento futuro de la estructura del pavimento.

Además, se han realizado investigaciones sobre la veracidad de estos ensayos, al igual que los factores que influyen en los resultados. Dentro de los que se destacan los siguientes:

Se desarrolló una investigación (Airey, Collop, Zoorob, & Elliot, 2007) que establece varios métodos de pruebas para identificar la susceptibilidad al daño por humedad en las mezclas asfálticas, como el método AASHTO T283 y la prueba de laboratorio combinando el daño de envejecimiento y la humedad, conocido como Saturation Ageing Tensile Stiffness (SATS). Esta prueba consiste en evaluar los efectos combinados del envejecimiento y el daño por humedad en las mezclas asfálticas, mediante el envejecimiento de los especímenes de mezcla compactas de asfalto con presencia de humedad (100 mm de diámetro y 60 mm de espesor), presión y temperaturas elevadas. Dicha prueba ha sido capaz de reproducir satisfactoriamente en el laboratorio, la pérdida de módulo de rigidez observada en campo por el daño por humedad. Adicionalmente, logra discriminar la resistencia al daño por humedad para diferentes combinaciones de mezclas de asfalto.

El año 2010, J.P Nieto (Nieto, 2010) realiza un estudio sobre los criterios de valorización en caliente para carpetas asfálticas y la resistencia al ahuecamiento, donde describe que las deformaciones plásticas en las mezclas asfálticas son producidas por la acumulación de pequeñas deformaciones irreversibles como resultado de las

cargas aplicadas. Este tipo de fallas se presentan en pavimentos asfálticos sometidos a condiciones ambientales como la humedad, la temperatura y especialmente a las cargas y frecuencia del tránsito, sobretodo cuando dichas cargas son pesadas y lentas. Como conclusión de su investigación, determina que los agregados pétreos en cuanto a su textura, tamaño, distribución granulométrica son aportantes de resistencia a las deformaciones plásticas. La temperatura del ligante asfáltico, es una característica decisiva en la resistencia a la deformación de la mezcla asfáltica.

Hoy en día, Estados Unidos y Europa cuentan con especificaciones que miden la susceptibilidad de las mezclas al contacto con el agua, y así, garantizan una resistencia mínima al daño por humedad y adoptan procedimientos para emplear modificadores que promuevan dicha resistencia.

En Chile, se utiliza el método Marshall para el diseño de mezclas basado en la estabilidad y contenido de vacíos (Dirección de Vialidad, 2016). Sin embargo, pese a todos los estudios realizados a nivel internacional sobre el daño por humedad, en Chile, aún no existe un estudio amplio y una normativa determinada para exigir límites de susceptibilidad de las mezclas al daño en condiciones de humedad.

2.2 Marco conceptual

Para comprender los conocimientos básicos de este trabajo de investigación se detallarán los siguientes conceptos: ligante asfáltico, clasificación de las mezclas asfálticas, mezclas asfálticas en caliente y su comportamiento, método y densidad Marshall, pavimento asfáltico y las principales fuentes de la humedad en pavimentos.

2.2.1 Ligante Asfáltico

Características Químicas (Laboratorio Nacional de Vialidad, 2015)

En su composición química el ligante está compuesto por una mezcla de hidrocarburos (combinaciones de hidrógeno y carbono) y pequeños porcentajes de azufre, oxígeno, nitrógeno y otros compuestos químicos. Cuando es diluido en heptano, se observan principalmente dos compuestos: asfaltenos y maltenos. El desglose del asfalto se puede ver en la siguiente figura:

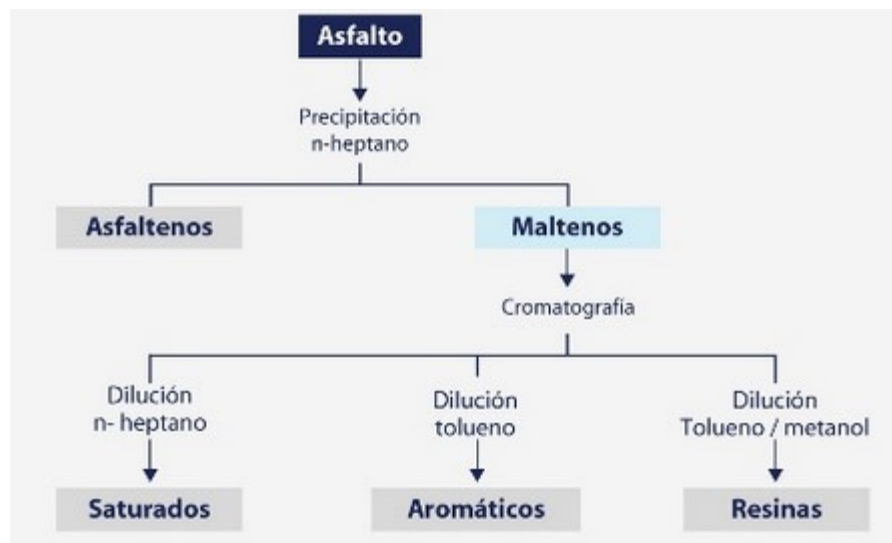


Figura 1: Compuestos del asfalto. Fuente: Instituto del Asfalto

Los maltenos son sustancias solubles en h-heptano y están constituidos por resinas, saturados y aromáticos. Son de menor peso molecular que los asfaltenos, de bajo punto de ebullición. Son las moléculas de resina que aportan la característica de adhesión y actúan como dispersantes de los asfaltenos. Además, los maltenos entregan fluidez, adherencia y ductilidad a la mezcla.

Los asfaltenos son compuestos orgánicos del petróleo crudo de alto peso molecular y, por tanto, alto punto de ebullición. Son un conjunto de compuestos con una elevada cantidad de anillos aromáticos unidos entre sí por cadenas. Se definen como la fracción orgánica insoluble en n-parafinas, como, por ejemplo, n-heptano y solubles en compuestos aromáticos, como lo son el tolueno o benceno. Tienen una polaridad relativamente alta y su alta viscosidad provee elasticidad, resistencia y color al asfalto.

La proporción de los asfaltenos y maltenos en el ligante asfáltico es variable, depende de muchos factores, como lo son las altas temperaturas, el tipo de agregado que se usará en la mezcla asfáltica, espesor de la película de asfalto en las partículas de agregado, entre otros.

Producción (Laboratorio Nacional de Vialidad, 2015)

El ligante asfáltico es elaborado a partir del residuo proveniente de la destilación del crudo del petróleo. Para la obtención del asfalto, se debe separar las distintas fracciones del crudo del petróleo mediante destilaciones. En la siguiente figura se observa el proceso de refinación del petróleo:

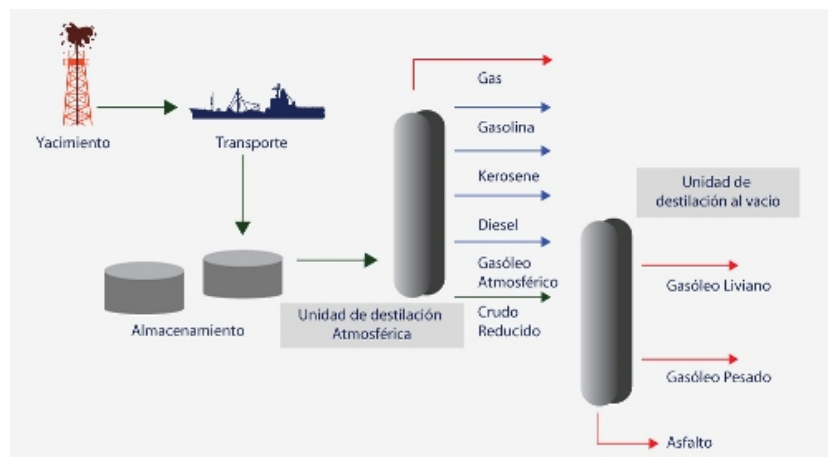


Figura 2: Proceso de refinación del petróleo. Fuente: Instituto del asfalto

Dentro de estas etapas se encuentran: la destilación primaria, destilación al vacío y finalmente la desasfaltización con propano o butano.

- **Destilación Primaria:** Es para extraer las componentes livianas del petróleo, a

presión cercana a la atmosférica, a temperaturas aproximadamente de 375°C, donde hierven hasta esta temperatura y se transforman en vapor. Estos vapores pasan a una columna fraccionada y a medida que se condensan, salen por la tubería lateral.

- **Destilación al Vacío:** Utiliza equipos especiales para aumentar el vacío (bajar la presión) en la columna fraccionada, logrando que los productos más pesados hiervan a menor temperatura que a presión atmosférica. El residuo asfáltico se denomina residuo de vacío. Dependiendo a la cantidad de vacío que se aplica, se obtienen distintos tipos de residuos asfálticos, que pueden ser utilizados como ligante.
- **Extracción con solventes:** El residuo de vacío tiene asfáltenos dispersos en un aceite muy pesado, y una forma de separarlos es disolver el aceite en gas licuado (propano o butano líquido,) a presión alta y temperaturas relativamente altas (70-120°C).

Propiedades

El asfalto es un material altamente impermeable, adherente y cohesivo, capaz de resistir altos esfuerzos instantáneos y fluir bajo la acción de cargas permanentes.

2.2.2 Clasificación de las mezclas asfálticas (Dirección de Vialidad, 2016)

De acuerdo a su granulometría

La clasificación por granulometría se basa en definir el tipo de graduación de acuerdo a la cantidad de partículas que pasan por el tamiz N°8:

Tabla 1: Clasificación Mezcla asfáltica en Caliente de acuerdo a su granulometría.

Tipo de Graduación	Porcentaje que pasa el Tamiz N°8
Abierta	5-20
Gruesa	20-35
Semi Densa	28-42
Densa	35-50
Fina	>50

De acuerdo a la cantidad de Huecos en la mezcla

1. Mezcla Abierta: huecos >6%
2. Mezcla semi densa o densa: Huecos <6%

De acuerdo al proceso constructivo utilizado

1. En caliente
2. En frío

2.2.3 Mezcla asfáltica en caliente

Concreto asfáltico, también conocido como mezcla asfáltica, es un material compuesto de un ligante asfáltico y un agregado pétreo. La mezcla asfáltica puede corresponder a un cemento asfáltico o un cemento asfáltico modificado. Se llama mezcla asfáltica en caliente (HMA="Hot mix asphalt") debido a su proceso de fabricación, el cual implica calentar el agregado pétreo y el ligante a alta temperatura.

2.2.4 Comportamiento de la Mezcla Asfáltica

El comportamiento de una muestra de mezcla de pavimento preparada en el laboratorio puede ser analizada para determinar su posible desempeño en la estructura del pavimento. Las mezclas asfálticas dependen principalmente de cuatro características:

- Densidad de la mezcla.
- Vacíos de aire.
- Vacíos en el agregado mineral.
- Contenido de asfalto.

2.2.4.1 Densidad (D)

La densidad de la mezcla compactada se define como la masa de un volumen específico de la mezcla. Las características de la densidad son fundamentales para obtener un rendimiento duradero en el pavimento, ya que una alta densidad entrega un mejor desempeño.

En las pruebas y en el análisis de diseño de mezclas, la densidad de la muestra compactada se expresa, generalmente, en kilogramos por metro cúbico (kg/m^3) o libras por pie cúbico (lb/ft^3).

La densidad que se obtiene de las probetas de laboratorio se considera de referencia y es usada para determinar el porcentaje de compactación en terreno con respecto a la ya obtenida. El porcentaje de compactación se determina mediante la siguiente ecuación:

$$\% \text{ de compactación} = \frac{\text{Densidad de terreno}}{\text{Densidad de Laboratorio}} \times 100$$

Ecuación 1: Porcentaje de compactación.

2.2.4.2 Vacíos de aire (Va)

Los vacíos de aire son el volumen total de pequeñas bolsas de aire entre partículas de agregado cubiertos con asfalto, expresado como porcentaje de volumen total de mezcla compactada. Es necesario que todas las mezclas densamente graduadas contengan cierto porcentaje de vacíos para permitir alguna compactación adicional a producirse debido al tráfico, y proporcionar espacios a donde pueda fluir el asfalto durante esta compactación adicional. El porcentaje permitido de vacíos (en muestra de laboratorio) para capas de base y capas superficiales varía entre 3 y 5 por ciento, dependiendo del diseño específico.

La vida útil del pavimento asfáltico está directamente relacionada con el contenido de vacíos de aire: por ejemplo, entre menor sea la cantidad de vacíos, la mezcla tiene menor permeabilidad. Un contenido muy alto, tiene mayor capacidad de almacenar agua y aire, por lo que acelera el envejecimiento y mayor posibilidad de causar deterioros previos. Por otro lado, un contenido demasiado bajo de vacíos puede

producir exudación de asfalto; una condición en donde el exceso de asfalto es exprimido fuera de la mezcla hacia la superficie.

La densidad y el contenido de vacíos están directamente relacionados. Entre más alta la densidad, menor es el porcentaje de vacíos en la mezcla, y viceversa. Las especificaciones de la obra requieren, usualmente, una densidad que permita acomodar el menor posible (en la realidad) de vacíos; preferiblemente menos del 8 por ciento.

El porcentaje de vacíos de aire en la mezcla asfáltica se calcula de la siguiente forma:

$$V_{ai} = 100 \times \left[\frac{D_{mm} - D_i}{D_{mm_i}} \right]$$

Ecuación 2: Porcentaje de Vacíos de aire.

Donde,

- D_{mm} = Densidad máxima de la mezcla.
- D = Densidad de la mezcla compactada.
- i = Serie de probeta a distinto porcentaje.

2.2.4.3 Vacíos en el agregado mineral (VAM)

Los vacíos en el agregado mineral son el volumen de vacíos entre las partículas de agregado de una mezcla compactada; incluye los huecos de aire y el contenido de asfalto efectivo, expresado como porcentaje del volumen.

Entre mayor sea el VAM, existe mayor espacio disponible para las películas de asfalto. Existen valores mínimos para VAM los cuales están recomendados y especificados como función del tamaño del agregado. Estos valores se basan en cuanto más gruesa sea la película de asfalto que cubre las partículas de agregado, más durable será la mezcla. En la siguiente ilustración, se representa los diferentes volúmenes que contiene una muestra de mezcla asfáltica:

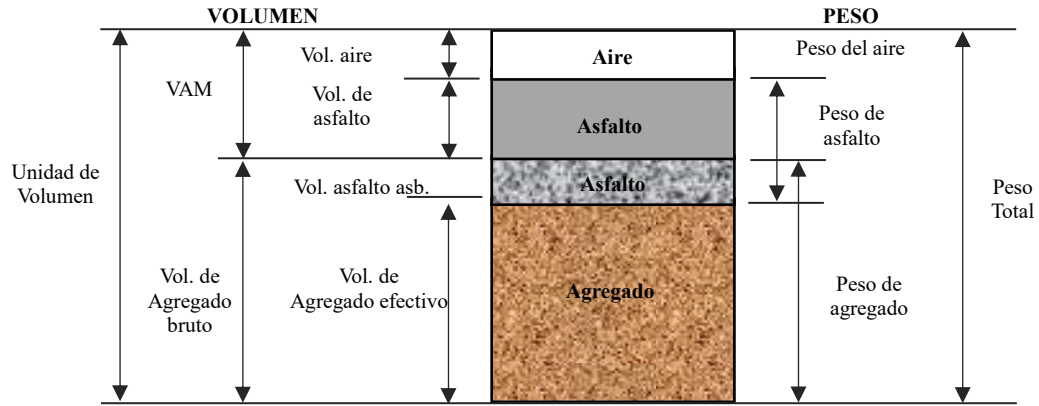


Figura 3: Representación de los volúmenes en una mezcla asfáltica compactada. Fuente: Elaboración propia

Del mismo modo que en el caso del volumen de vacíos de aire, se requiere un valor mínimo de VAM para poder asegurar un espesor de película de asfalto. Un VAM por debajo del mínimo, puede significar una baja durabilidad en el pavimento debido a la falta de película de asfalto en los agregados. Por lo tanto, es perjudicial, para la calidad del pavimento, disminuir el VAM para economizar el contenido de asfalto. La siguiente ecuación determina el porcentaje de vacíos de agregado mineral:

$$VAM_i = 100 \times \left[1 - \frac{G_i \cdot 100}{\delta_{rs} \cdot (100 + Pb_i)} \right]$$

Ecuación 3: Porcentaje de Vacíos de agregado mineral.

Donde,

- δ_{rs} = Densidad real seca del agregado, [Kg/m³].
- Pb = Porcentaje de asfalto referido al agregado seco.
- i = Serie de probeta de distinto porcentaje.

2.2.4.4 Contenido de asfalto

La proporción de asfalto en la mezcla es importante y debe ser determinada exactamente en el laboratorio y luego controlar con precisión en la obra. El contenido de asfalto de una mezcla particular se establece usando los criterios dictados por el método de diseño seleccionado.

El contenido óptimo de asfalto de una mezcla depende, en gran parte, de las características del agregado, tales como la granulometría y la capacidad de absorción. La granulometría del agregado está directamente relacionada con el contenido óptimo de asfalto. Entre más finos contenga la graduación de la mezcla, mayor será el área superficial total, y mayor será la cantidad de asfalto requerida para cubrir uniformemente todas las partículas. Por otro lado, las mezclas más gruesas (agregados más grandes) exigen menos asfalto debido a que poseen menos área superficial total.

Cualquier variación en el contenido de relleno mineral, causa cambios en las propiedades de la mezcla, haciéndola variar de seca a húmeda. Si una mezcla contiene poco o demasiado relleno mineral cualquier ajuste arbitrario para corregir la situación, probablemente la empeora. En vez de hacer ajustes arbitrarios, se deberá efectuar un muestreo en unas pruebas apropiadas para determinar las causas de las variaciones y si es necesario establecer otro diseño de mezcla.

La capacidad de absorción (habilidad para absorber asfalto) del agregado utilizado en la mezcla es importante para determinar el contenido óptimo de asfalto. Esto se debe a que se tiene que agregar suficiente asfalto a la mezcla para permitir absorción, y para que además se pueda cubrir las partículas con una película adecuada de asfalto.

Existen dos tipos de asfalto cuando se refieren al asfalto absorbido y al no absorbido; contenido total de asfalto y contenido efectivo de asfalto.

El contenido total de asfalto es la cantidad de asfalto que debe ser adicionada a la mezcla para producir las propiedades deseadas en la mezcla. El contenido efectivo de asfalto es el volumen de asfalto no absorbido por el agregado, es la cantidad de asfalto que forma una película ligante efectiva sobre las superficies de los agregados.

2.2.5 Método Marshall

El método Marshall fue desarrollado por el ingeniero Bruce Marshall del Estado de Mississippi, en Estados Unidos en 1943 (Instituto del Asfalto, 1992). El propósito principal de su método es determinar el contenido óptimo de asfalto para una combinación específica de agregados. El método original únicamente es aplicable a mezclas asfálticas en caliente para pavimentación, que contengan agregados con un tamaño máximo de 25mm o menor. El método Marshall modificado se desarrolló para tamaños máximos por encima de 38 mm, y está pensado para diseño en laboratorio y control en campo de mezclas asfálticas en caliente, con graduación densa. Debido a que la prueba de estabilidad es de naturaleza empírica, la importancia de los resultados en términos de estimar el comportamiento en campo se pierde cuando se realizan modificaciones a los procedimientos estándar. Se encuentra especificado en el Manual de Carreteras volumen 8, sección 8.302.4 y 8.302.47.

2.2.6 Densidad Marshall

Es la densidad del diseño, se determina mediante el gráfico de densidad con el porcentaje de asfalto óptimo obtenido.

2.2.7 Pavimento asfáltico

Conocido con el nombre de pavimento flexible, es un pavimento cuya estructura total se deflecta o flexiona dependiendo de las cargas que transitan sobre él. Generalmente está constituido por una serie de capas que permiten transmitir las cargas vehiculares hasta el terreno natural. En la siguiente figura se puede observar las capas del pavimento flexible:

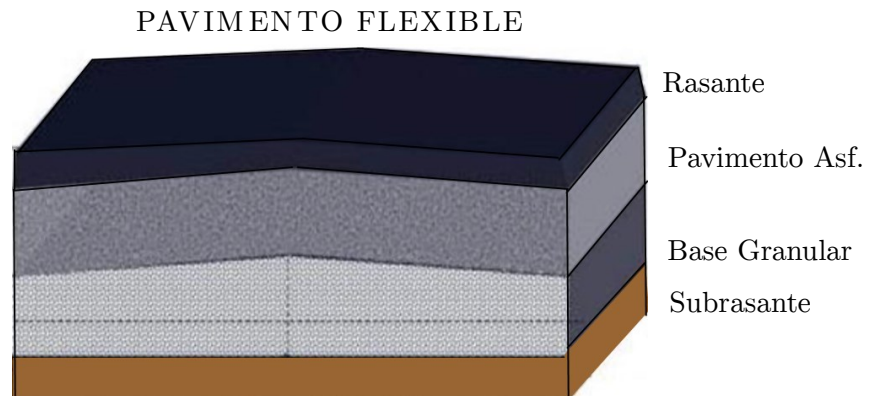


Figura 4: Estructura Pavimento Flexible. Fuente: Elaboración propia.

La capa superficial (o capa de rodadura), es la que se encuentra directamente en contacto con el tránsito, compuesta por agregados pétreos y asfalto, generalmente semi cerrada o cerrada diseñada para resistir abrasión y desintegración por efectos ambientales. La Base granular, es la capa que se encuentra bajo la capa superficial, compuesta por agregados y puede estar estabilizada o no, generalmente una mezcla abierta o graduada densa o gruesa. La sub-base granular, es la capa se encuentra bajo la base y se puede no ser necesaria dependiendo de la categoría de la vía, resistencia estructural.

2.2.8 Humedad en Pavimentos

Las fuentes de humedad en mezclas asfálticas pueden ser externas o internas. De forma externa, proviene desde la superficie, lateralmente, desde las zonas de drenaje o de las capas debido al alto nivel de agua subterránea (Santucci), como se puede observar en la siguiente figura:

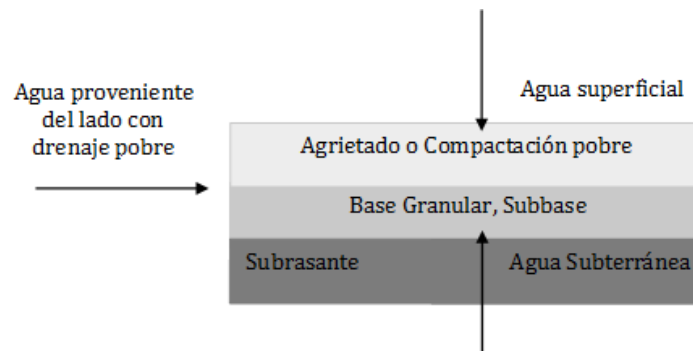


Figura 5: Fuentes de humedad en una estructura de Pavimentos Flexibles. Fuente: Elaboración propia.

También puede estar presente de forma interna en un pavimento, como resultado de agregados parcialmente secos o características climáticas del área de emplazamiento de la obra.

METODOLOGÍA Y MATERIALES

El material para la fabricación de las probetas utilizadas para realizar los ensayos ha sido proporcionado por dos plantas de la empresa Bitumix, ubicadas en las zonas del Maule e Iquique. El cemento asfáltico empleado proviene de la empresa Probisa, que junto con la empresa Bitumix forman el Centro de Desarrollo e Investigación (CDI, (Centro de Desarrollo e Investigación, 2006)) en donde se realizó el presente estudio. El cemento asfáltico provisto fue convencional (CA-24), CA-24 con aditivo de mejoramiento de adherencia y finalmente CA-24 con aditivo mejorador de trabajabilidad.

Para llevar a cabo de análisis, cada muestra se realizó mediante las diferentes normativas de estudios con los ensayos: TSR y rueda de Hamburgo que se detallarán a continuación.

3.1 Procedimiento para el ensayo Tensile Strength Ratio (TSR)

En todos los ensayos se utiliza la compactación por impacto utilizando el Martillo de Compactación Marshall. Las probetas compactadas tienen un diámetro de 101,6 $\pm$ 1 [mm] y altura de 63 $\pm$ 2,5 [mm]. Cabe destacar que las probetas fueron compactadas a diferentes temperaturas debido al tipo de ligante asfáltico, para CA-24 y CA-24 más aditivo AMA se compactó a 147°C, mientras que las muestras de CA-24 más aditivo AMT1 a 117°C.

3.1.1 Compactación por impacto o Sistema de compactación Marshall

El martillo Marshall consiste en un dispositivo de acero formado por una base circular de 98.4 mm de diámetro y un pistón de 4.54 Kg, peso total del componente, montado de tal manera que proporciona una caída desde una altura de 45.57 cm. El Martillo de Compactación está instalado sobre un pedestal de madera de base cuadrada de 200.3 mm de lado y 457.2 mm de altura. En la cara superior de este pedestal debemos tener una platina cuadrada de acero fijada sobre el mismo. Todo este conjunto debe estar fijado a una base de cemento, quedando la platina de acero en posición horizontal.

El martillo deberá tener un soporte para el molde diseñado para centrar rígidamente el molde completo en su posición durante todo el proceso de compactación.

Existen dos tipos de martillos, uno de funcionamiento manual y otro de funcionamiento mecánico. En nuestro estudio hemos realizado la compactación con un martillo Marshall mecánico.

3.1.2 Ensayo TSR

El ensayo de tracción indirecta implica la aplicación de una carga de compresión a lo largo de los ejes diametrales de la probeta. La mecánica del ensayo es tal que un estado de tensiones de tracción casi uniformes se desarrolla a lo largo del plano diametral.

El ensayo reproduce el estado de tensiones en la fibra inferior de la capa asfáltica o zona de tracción. Es un método práctico y sencillo para caracterizar las

propiedades de las mezclas bituminosas o evaluar el fallo provocado por tensiones de tracción. La siguiente fotografía es del equipo utilizado para este ensayo:



Figura 6: Fotografía equipo TSR.

El ensayo consiste en cargar una muestra cilíndrica con una carga de compresión diametral (Figura 7 a) a lo largo de dos generatrices opuestas. Este tipo de carga provoca un esfuerzo de tracción relativamente uniforme en todo el diámetro del plano de carga vertical y esta tracción es la que agota la probeta y desencadena la rotura en el plano diametral (Figura 7 b).

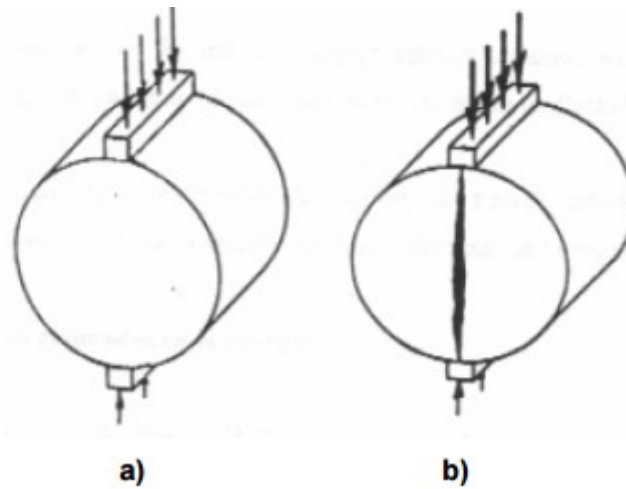


Figura 7: configuración de la carga, así como la rotura del ensayo TSR. Fuente: Elaboración Propia.

La reacción de los especímenes a la carga puede ser captada por medio de un registrador de multicanales o un dispositivo de adquisición de datos analógico digital. Se determina la resistencia a la tracción indirecta (ITS), tanto para probetas secas como húmedas, aplicando la siguiente fórmula:

$$ITS = \left[\frac{2 \cdot P}{\pi \cdot D \cdot H} \right]$$

Ecuación 4: Cálculo resistencia tracción indirecta.

Donde:

- P: Carga máxima [kN]
- D: Diámetro de la probeta [mm]
- H: Altura de la probeta [mm]

Con los valores promedio de ITS de cada grupo de probetas, se calcula la razón de resistencia a la tracción indirecta (ITSR) mediante la siguiente ecuación:

$$TSR = \frac{ITS(húmedas)}{ITS(secas)} \cdot 100\%$$

Ecuación 5: Cálculo razón de resistencia TSR.

El porcentaje resultante es la variación por las distintas condiciones en las que se encuentra la probeta, es decir, determina cuán susceptible es la mezcla en condiciones de humedad. Esto debido al grado de saturación, temperaturas que se encuentra. Se necesitan 6 probetas para la realización del ensayo, 3 muestras para condición de humedad y 3 muestras para condición seca.

Este ensayo tiene como objetivo dos ejes principales. El primero de ellos es identificar si una combinación de ligante asfáltico y agregado es susceptible a la acción del agua. Segundo, mide la efectividad de los aditivos mejoradores.

Sin embargo, el ensayo tiene límites para su veracidad, tras estudios dirigidos por Tesoriere, Marino y Canale (Tesoriere, 1990), demostraron que el rango de temperaturas para que el valor de la resistencia varíe de forma lineal es entre los 10-25 [°C], ya que a temperaturas de ensayo sobre los 30[°C], la función tiende a comportarse de forma parabólica, con valores dispersos y prevaleciendo la componente viscosa de la mezcla bituminosa.

Las variables más importantes del estudio son: Saturación, ciclo hielo/deshielo, condicionamiento de las muestras, temperatura ensayo TSR, tipo de agregado, tipo de aditivo. A continuación, se muestra tabla comparativa entre las 3 Normas:

Tabla 2: Parámetros ensayo Normas ASTM D4867, AASHTO T283 y LNV.

Parámetros del ensayo	ASTM D4867	AASHTO T283	LNV
Envejecimiento Mezcla suelta	No hay	Enfríe por 2 horas a Temperatura ambiente. Envejecer a 60°C por 16 horas.	No hay
Porcentaje Vacíos de aire en la mezcla	6-8	6,5-7,5	No hay límite, solo utiliza 50 golpes por cara de la probeta
Saturación	55-80% 5 min. A 525 [mmHg]	70-80% 5-10 min. entre 254-600 [mmHg]	No debe expandir la probeta en más del 2% de su volumen inicial.
Ciclo Hielo/deshielo	-18+/-0,1°C por 15 horas (Opcional)	-18+/-0,1°C por 16 horas	-18+/-0,1°C por 15 horas (Opcional)
Acondicionamiento en agua	60°C por 24 horas	60°C por 24 horas +/-1 hora	40°C por 68-72 horas.
Ensayo TSR	A 25+/-1°C A 51 [mmm/min]	A 25+/-1°C A 51 [mmm/min]	A 15+/-1°C A 51 [mmm/min]
Límite ITSR Exigido	75%	80%	85%
Análisis Visual	No hay	Solo exige realizarlo	No hay

3.2 Procedimientos para el ensayo Rueda De Hamburgo (HWTD: Hamburg Wheel Tracking Device)

Existen dos normativas para este ensayo, en EE.UU. especificaciones por la Norma Estadounidense (AASHTO T 324-4) y en Europa por la norma UNE-EN 12697-22 (UNE-EN12697-12, 2006). Para esta investigación, se utilizó la Norma UNE.

El ensayo de Hamburgo permite evaluar la susceptibilidad a la deformación permanente y el daño por humedad en mezclas asfálticas en caliente usando especímenes sumergidos bajo la acción de una rueda oscilante en el equipo Rueda de Hamburgo. Las probetas son hechas en laboratorio, con dimensiones de aproximadamente 150[mm] de diámetro y 62 [mm] de altura con una tolerancia de 2 [mm] para todas las medidas, que puedan resistir las condiciones de ensayo sin sufrir distorsión. Las muestras se compactan normalmente para poseer un índice de huecos de $7 \pm 1 \%$ para mezclas densamente graduadas. Para realizar el ensayo se necesitan 4 cilindros de mezcla asfáltica, dos para condiciones secas y dos para condición de humedad.

En todos los ensayos se utilizó el compactador giratorio para alcanzar el porcentaje de vacíos deseado del 7%. Para este ensayo, solo se utilizaron muestras con mezclas convencionales CA-24 para determinar una comparación con el ensayo TSR.

3.2.1 Compactación por el Compactador Giratorio

Para la compactación de las probetas se utiliza un ángulo de giro de $1,25^\circ$ y una velocidad de giro de 30 rpm, la cual permite ser modificada.

La compactación se realiza aplicando una fuerza vertical, normalmente 600 KPa, a través de un pistón a una masa conocida de mezcla bituminosa dentro de un molde de 100 ó 150 mm de diámetro interno. El eje longitudinal del molde gira en un ángulo fijo con respecto a la vertical, en tanto que los pistones se mantienen paralelos y horizontales. Durante la compactación, la altura de la muestra es medida automáticamente y se calculan la densidad de la mezcla y el volumen total de huecos. A medida que se efectúa la compactación, los datos pueden verse en formato gráfico y tabular en la pantalla, y también guardarse en formato compatible con Microsoft Excel, para un tratamiento más sencillo de los datos obtenidos.

El operador puede optar por compactar durante un cierto número de giros o hasta alcanzar una determinada densidad de mezcla o un volumen total de huecos. En el caso de nuestro estudio, hemos optado por ir variando el número de giros para poder llegar a un porcentaje de vacíos de aire del 7%.

3.2.2 Ensayo HWTB

La temperatura de ensayo de las probetas bajo agua es variable y ésta va desde los 25°C a los 70°C, pero la temperatura de ensayo más común es de 50°C. Se aplica una carga de 705 N sobre una rueda de acero de 47 milímetros de ancho. La rueda se desplaza hacia adelante y hacia atrás a lo largo de la superficie de la losa. El ensayo tiene una duración de 20.000 pasadas o hasta que se obtienen 20 milímetros de deformación. La frecuencia de paso de la rueda es de 53 pasadas por minuto (26,5 ciclos por minuto) y a una velocidad de 34 cm/seg.

Los resultados del ensayo se pueden identificar de forma representativa en la siguiente figura:

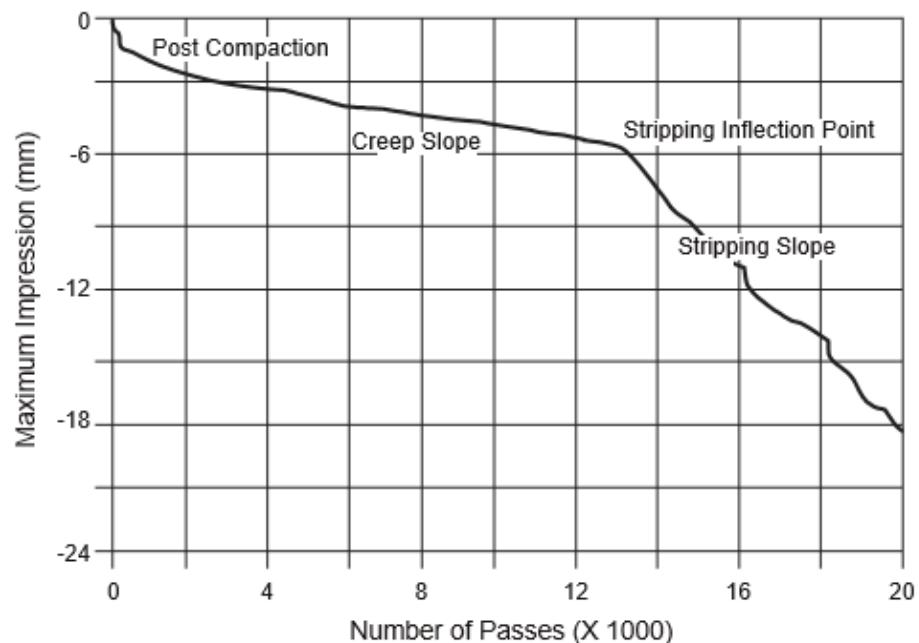


Figura 8: Definición de los resultados del ensayo Rueda de Hamburgo. (Yildirim & Thomas Kennedy, 2001)

De la Figura 8, se incluye, la consolidación posterior a la compactación que es la deformación en [mm] a 1000 pasadas de la rueda, se llama así ya que comenzando el ensayo la rueda estaría densificando las muestras con las primeras 1000 pasadas.

La pendiente de fluencia (creep slope) se relaciona con la fluencia de la mezcla. Se encuentra entre la consolidación post-compactación y el punto de inflexión de la separación (stripping inflection point). La pendiente de fluencia se utiliza para medir la susceptibilidad al ahuellamiento. Mide la acumulación de deformación permanente principalmente debido a otros mecanismos que no sean daños por humedad.

La pendiente de pérdida de adherencia (stripping slope) mide la acumulación de deformación permanente principalmente debido al daño de humedad. Es la inversa de la velocidad de deformación (pasadas de la rueda por 1 mm de profundidad de ahuellamiento) después de la separación.

3.3 Factores de influencia en el daño por humedad

El daño por humedad de las mezclas asfálticas puede ocurrir debido a distintos factores, por lo que es difícil de predecir el modo de falla. En general, la susceptibilidad a la humedad incrementa por cualquier factor que haga aumentar el contenido de humedad de la mezcla bituminosa, disminuyendo la adhesión del ligante a la superficie del agregado. A continuación, se mencionan algunos de los factores que han sido estudiados a la susceptibilidad al daño por humedad en cierto grado, aún así, ninguna es punto de referencia para poder predecir este fenómeno. (Interactive, 2011).

3.3.1 Cemento asfáltico

La viscosidad indica concentraciones más altas de asfaltenos. Estas moléculas de mayor tamaño crean una mejor adherencia, por lo tanto, viscosidades más bajas, pueden representar concentraciones más bajas de asfaltenos, que generalmente son más susceptibles al desprendimiento.

3.3.2 Características del agregado

Normalmente, los agregados que son hidrófilos (atraen el agua) son más propensos a tener problemas con el desprendimiento que los agregados hidrófobos (repulsión al agua). Las propiedades que determinan estas características del agregado pueden ser:

- Química superficial: Las superficies con mayor facilidad a generar enlaces con el ligante, son menos propensas a causar fallas. En general, las superficies más ácidas, son más susceptibles al desprendimiento. Además, el hierro, magnesio y calcio son considerados minerales beneficiosos para la adherencia, a diferencia del sodio y potasio, que son perjudiciales. (Hicks, 1991).
- Porosidad y tamaño del poro: El tamaño del poro es de carácter crítico, ya que, si los poros son suficientemente grandes para permitir la entrada del ligante, contribuye a ser un factor susceptible a la humedad. La alta porosidad significa que se requiere mayor contenido de cemento asfáltico para llegar a la cantidad deseada para crear la película de ligante alrededor del agregado, causando un envejecimiento más rápido.
- Tratamiento al agregado: Se puede mejorar la superficie del material, reemplazando iones que no son compatibles con el betún a iones con mayor afinidad, donde las propiedades de adherencia incrementan y favorecen a ser menos susceptible a las condiciones adversas del agua.

3.3.3 Volumen de Aire

Cuando se tiene una mezcla abierta, con porcentaje de vacíos sobre el 8 por ciento, permite que el agua penetre fácilmente en la mezcla asfáltica y junto con ello, causar daño de humedad a través de la presión de poro o expansión de hielo. Es por esto, que el diseño de las mezclas limita el contenido de ligante y la graduación del agregado. Los vacíos de aire excesivos pueden ser un problema tanto en el diseño de la mezcla o en la construcción. En este trabajo de investigación, sólo se aborda el primero de estos problemas.

3.3.4 Condiciones climáticas al momento de la construcción

En condiciones de bajas temperaturas se puede conducir a una mala compactación, generando alto contenido de volumen de vacío y un pavimento relativamente permeable. Esto aumenta la posibilidad de agua en la estructura del pavimento y, por lo tanto, mayor susceptibilidad al daño por humedad. Además, las condiciones de climas húmedas, siempre pueden aumentar el contenido de humedad en las mezclas bituminosas.

3.3.5 Clima

Los ciclos de hielo-deshielo y las fluctuaciones de temperatura pueden permitir mayor humedad en la estructura del pavimento, además, con estos ciclos, se genera una presión interna dentro de la probeta, que hace más fácil los desprendimientos del material.

3.3.6 Tráfico

Si existe agua presente en la mezcla asfáltica, una mayor carga de tráfico aumenta la probabilidad del daño por humedad debido principalmente a un aumento en la presión de los poros, ya que el agua se encuentra atrapada en los poros, la carga vehicular tiende a comprimir estos espacios, empujando el aglomerante de las partículas de agregados. Por otro lado, la rueda del vehículo pasa sobre el pavimento, tendiendo a mover el agua. Esto se conoce con el nombre de lavado hidráulico, en donde la rueda, mediante un movimiento de fregado, puede eliminar el ligante de asfalto de la superficie del agregado.

3.4 Materiales

Para el desarrollo del trabajo de investigación se utilizaron diversos materiales, estos son: agregados de distintas regiones del país y ligante asfáltico preparados con y sin aditivos. A continuación, se verán en detalle cada uno de ellos.

3.4.1 Agregados

Planta MAULE

Los agregados utilizados en el estudio son áridos de tendencia silícea provenientes de la Planta de Bitumix ubicada en la Región del Maule. El diseño está compuesto por los siguientes áridos:

- Gravilla 3/4"
- Gravilla 1/2"
- Polvo Roca 1/4"
- Arena Industrial

La Sucursal Maule elabora principalmente la mezcla asfáltica compuesta por el siguiente Diseño, en base a una carpeta de 20[mm] y banda granulométrica IV-A-12:

Tabla 3: Diseño de la Planta del Maule.

Agregado	%
Gravilla 3/4"	15
Gravilla 1/2"	44
Polvo Roca 1/4"	25
Arena Industrial	16

Cabe destacar que los áridos provinientes del Río Maule, son agregados con poca porosidad, por lo que los destacan por ser de buena calidad para mezclas asfálticas. Esto se debe a que absorben menor porcentaje de asfalto, logrando poder disminuir la cantidad de asfalto necesaria en el diseño, generando diseños más económicos. Por otro lado, al ser menos porosos, tienen mayor densidad, por lo tanto, tienen mayor resistencia.

Además, todos los agregados extraídos del río pasan por un proceso de chancado, esto evita que haya partículas redondeadas y hace que aumente la calidad de la mezcla. Este proceso ayuda a mejorar la resistencia debido a que los áridos redondeados tienen menor trabazón, dando como resultado menores resistencias.

Se utilizaron 1100 [g] de agregados para las probetas de estudio, del total se obtuvieron las proporciones respectivas de cada material en función del diseño que se fue entregado por la empresa Bitumix al CDI.

Planta IQUIQUE

Los agregados utilizados en el estudio son áridos de tendencia silícea provenientes de la Planta de Bitumix ubicada en la Región de Tarapacá. El diseño está compuesto por los siguientes áridos:

- Gravilla 3/4''
- Gravilla 1/2''
- Polvo Roca 1/4''

La Sucursal Iquique elabora principalmente la mezcla asfáltica compuesta por el siguiente Diseño, en base a una carpeta de 20[mm] y banda granulométrica IV-A-12:

Tabla 4: Diseño de la Planta Iquique.

Agregado	%
Gravilla 3/4''	10
Gravilla 1/2''	35
Polvo Roca 1/4''	55

Los áridos provienen de “Quebrada de Sagasca”, son agregados de mayor porosidad y mayor contenido de sulfatos de sodio en comparación con los agregados del Maule, reflejado en el alto porcentaje de ligante asfáltico necesario para lograr las mismas características. El alto contenido de asfalto hace que estas mezclas tengan un mayor costo económico.

Del mismo modo que en el caso de Maule, se utilizaron 1100 [g] de agregados

para las probetas de estudio, del total se obtuvieron las proporciones respectivas de cada material en función del diseño que se fue entregado por la empresa Bitumix al CDI.

3.4.2 Cemento asfáltico

El estudio realizado se basó en la utilización de cemento asfáltico con y sin aditivos de mejoramiento provenientes de la empresa Probisa.

El cemento asfáltico base, es uno de los más utilizados en Chile, el cual es cemento asfáltico 24 (CA-24). Además, se trabajó con CA-24 + AMA, AMA es un paquete químico utilizado para mejorar la adherencia, el cuál es un aditivo de mezcla tibia desarrollado en Estados Unidos.

Por último, se trabajó con CA-24 + AMT1, AMT1 es un aditivo de mezcla tibia y es utilizado para ayudar al ligante a mezclarse con el agregado a menor temperatura y contiene un efecto lubricante que mejora la trabajabilidad y adherencia entre el ligante y el agregado.

El porcentaje de asfalto por diseño para todos los casos en consideración para el estudio se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 5: Tabla de contenidos de cemento asfáltico en el Diseño.

	Maule	Iquique
Porcentaje %	5,1	5,7

3.4.3 Mezcla

En las siguientes tablas, se muestran las características principales de las mezclas del Maule e Iquique respectivamente.

Tabla 6: Especificación Banda IV-A-12- Maule.

Tamiz de 25,0	mm	(1")	100	-	
" de 19,0	mm	(3/4")	100	100	- 100
" de 12,5	mm	(1/2")	91	80	- 95
" de 9,5	mm	(3/8")	80	70	- 85
" de 4,75	mm	(N°4)	43	43	- 58
" de 2,36	mm	(N°8)	30	28	- 42
" de 1,18	mm	(N°16)	22	-	
" de 0,6	mm	(N°30)	16	13	- 24
" de 0,3	mm	(N°50)	10	8	- 17
" de 0,15	mm	(N°100)	7	6	- 12
" de 0,075	mm	(N°200)	5	4	- 8

Fuente: Información proporcionada por Planta Maule, BITUMIX.

Tabla 7: Características de la mezcla-Maule.

Partículas chancadas	(2 caras)	(%)	96	mín.	90
Partículas lajeadas		(%)	0,3	máx.	10
Índice de Lajas		(%)	10		
Desgaste Los Ángeles		(%)	15	máx.	25
Índice de plasticidad		(%)	N.P.		N.P.
Sales solubles		(%)	no contiene	máx.	2
Adherencia Método Estático :		(%)	+95	mín.	95
Adherencia Método Dinámico :		(%)	+95	mín.	95
Adherencia Riedel - Weber		(%)	4-9	mín.	0-5
Equivalente de Arena		(%)	64	mín.	50
Desintegración en Sulfato de Sodio F. Gruesa		(%)	0,6	máx.	12
Desintegración en Sulfato de Sodio F. Fina		(%)	1,2	máx.	15
Densidad real seca ponderada		(Kg/m ³)	2668		
Densidad efectiva		(Kg/m ³)	2690		
Absorción de asfalto		(%)	0,32		

Fuente: Información proporcionada por Planta Maule, BITUMIX.

Tabla 8: Mezcla de Trabajo- Maule.

CA-24	(% ref. agregado)	5,1	+/- 0,3
Densidad Marshall	(Kg/m ³)	2364	

Fuente: Información proporcionada por Planta Maule, BITUMIX.

Tabla 9: Especificación Banda 3/4' Iquique.

Tamiz de 19,0	mm	(3/4")	100	100	-	100
" de 12,5	mm	(1/2")	89	79	-	99
" de 9,5	mm	(3/8")	76	68	-	88
" de 4,75	mm	(Nº4)	51	48	-	68
" de 2,36	mm	(Nº8)	34	33	-	53
" de 1,18	mm	(Nº16)	23	20	-	40
" de 0,6	mm	(Nº30)	17	14	-	30
" de 0,3	mm	(Nº50)	12	9	-	21
" de 0,15	mm	(Nº100)	8	6	-	16
" de 0,075	mm	(Nº200)	6	3	-	6

Fuente: Información proporcionada por Planta Iquique, BITUMIX.

Tabla 10: Características de la mezcla-Iquique.

Partículas chancadas (2 caras)	(%)	97	min.	70	(M.C. 8.202.6)
Partículas alargadas	(%)	0,8	máx.	8	(ASTM D4791)
Índice de Lajas	(%)	12			(M.C. 8.202.7)
Desgaste Los Angeles	(%)	15	máx.	40	(ASTM C131)
Índice de plasticidad	(%)	N.P.	máx.	6	(ASTM D4318)
Sales solubles	(%)	no contiene	máx.	2	(M.C. 8.202.14)
Adherencia Método Estático :	(%)	+95	min.	95	(M.C. 8.302.29)
Adherencia Método Dinámico :	(%)	+95	min.	95	(M.C. 8.302.31)
Adherencia Riedel - Weber	(%)	2-9	min.	0-5	(M.C. 8.302.30)
Equivalente de Arena	(%)	72	min.	35	(ASTM D2419)
Desintegración en Sulfato de Sodio	(%)	1,3	máx.	10	(ASTM C88)
Desintegración en Sulfato de Magnesio	(%)	1,2	máx.	13	(ASTM C88)
Densidad real seca ponderada	(Kg/m³)	2652			(ASTM C127 y C128)
Densidad Máxima Mezcla (DMM) para	(Kg/m³)	2459	[CA Dens=1.042]		(ASTM D2041/D2041M)
Densidad efectiva	(Kg/m³)	2658			(MS-2 7th Edition Cap. 5)
Absorción de asfalto	(%)	0,09			

Fuente: Información proporcionada por Planta Iquique, BITUMIX.

Tabla 11: Mezcla de trabajo- Iquique.

CA-24 MT	(% ref. agregado)	5,7	+/- 0,3
Densidad Marshall	(Kg/m³)	2366	

Fuente: Información proporcionada por Planta Iquique, BITUMIX.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

De los resultados del ensayo a tracción indirecta de las muestras, se generaron diversas comparaciones y análisis para conferir y observar el comportamiento de las mezclas en función de sus aditivos, condición (húmeda o seca) y asimismo, como influía la utilización de las diferentes Normas.

En primer lugar, se dividió el análisis por Planta de áridos (Maule e Iquique) y como subdivisión, por cada Norma (AASHTO, ASTM y UNE con modificaciones del LNV), generando un análisis comparativo entre Normas, y finalmente, entre Planta.

Para el estudio, se generaron gráficos explicativos, en dónde el primero de ellos se basa en observar el resultado promedio del ensayo a tracción indirecta de las probetas, tanto en condiciones de humedad como secas, en función de los diferentes aditivos (Blanco, AMA, AMT1). Por otro lado, es de carácter significativo tener un gráfico que muestre si los aditivos cumplen con las Normas pertinentes en cada caso. Además, se

hizo una evaluación cualitativa por medio del método AASHTO para conocer el daño visual por humedad que existe luego de realizado el ensayo TSR.

En el caso del análisis comparativo por Normas, los gráficos a mostrar son:

- Un gráfico para identificar el comportamiento por aditivo, en ambas condiciones.
- Un gráfico para identificar el comportamiento de todas las probetas promedio en función de su condición.
- Finalmente, un gráfico para la capacidad de cada Norm, y así demostrar la susceptibilidad del daño por humedad que sufren las mezclas asfálticas en caliente.

En segundo lugar, se muestran los resultados por medio del ensayo de rueda de Hamburgo, en donde muestra un gráfico de número de pasadas de la rueda y la deformación generada.

4.1 Resultados TSR Planta MAULE

4.1.1 AASHTO T 283

Resultados Ensayo TSR

Se realiza una comparación de los resultados del ensayo a tracción indirecta en [kPa] a través de un gráfico que muestra el promedio de las probetas con su respectivo aditivo. Además, las barras de color azul representan las probetas en condición húmeda, mientras que las barras de color naranja, las probetas en condición seca y así, poder notar la incidencia que tiene el daño por humedad en las mezclas asfálticas en caliente. El siguiente gráfico, presenta los 3 tipos de mezcla en estudio:

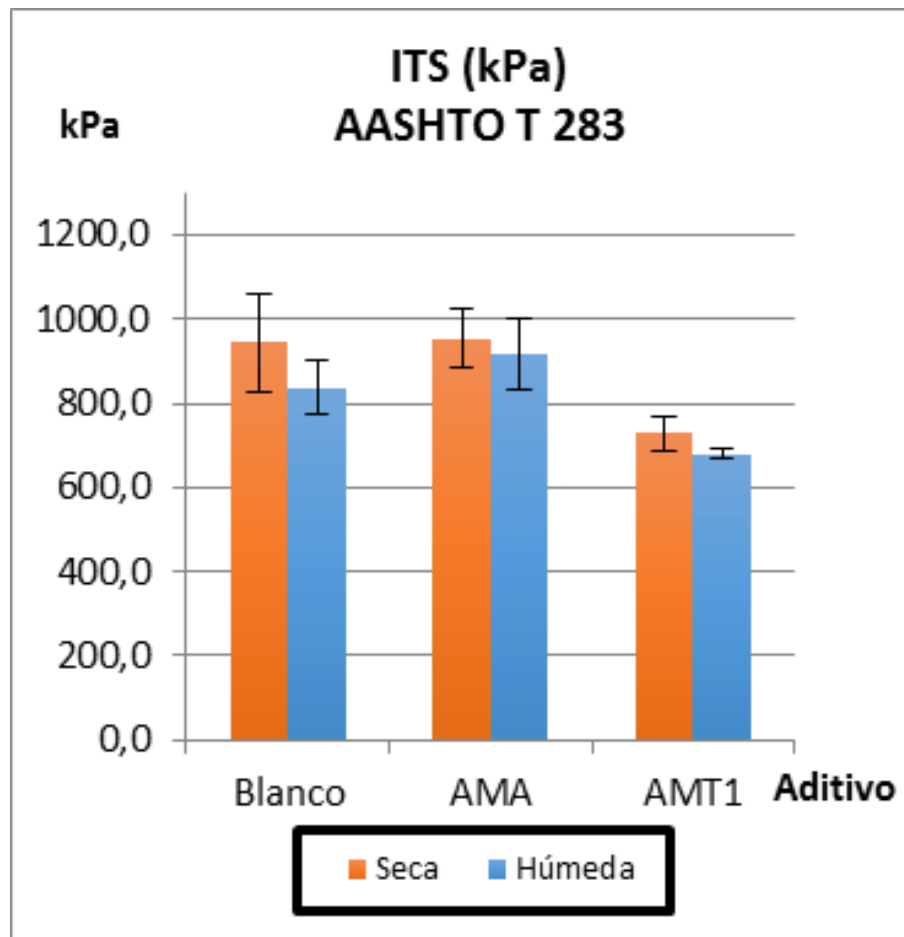


Figura 9: Gráfico ITS AASHTO T 283.

Como se puede observar de la Figura 9, las probetas que fueron ensayadas en

condiciones de humedad tienen menor resistencia a la tracción, por lo que se puede evidenciar la disminución de resistencia en la mezcla asfáltica.

Si se comparan las mezclas húmedas, se aprecia un aumento sustancial entre las probetas con el aditivo de mejoramiento de adherencia (AMA) y la mezcla sin aditivo (Blanco). Sin embargo, la mezcla con AMT1 disminuye considerablemente su resistencia, disminuyendo casi en un 20% en comparación de la mezcla sin aditivo. En la Tabla 12 se aprecia que este valor significativo puede deberse a que las mezclas con mejoramiento de trabajabilidad tenían un mayor porcentaje de vacíos en la mezcla, generando una menor resistencia a la tracción.

Tabla 12: Resumen resultados TSR - AASHTO T 283

ENSAYO TSR	Mezcla con CA-24						Mezcla con CA-24 + AMA						Mezcla con CA-24 + AMT1					
	Húmedas			Secas			Húmedas			Secas			Húmedas			Secas		
	$\bar{X}$	σ	I.C.	$\bar{X}$	σ	I.C.	$\bar{X}$	σ	I.C.	$\bar{X}$	σ	I.C.	$\bar{X}$	σ	I.C.	$\bar{X}$	σ	I.C.
Altura, cm	6,29	0,13		6,33	0,07		6,45	0,08		6,42	0,08		6,48	0,02		6,45	0,05	
Diámetro, cm	10,17	0,03		10,15	0,00		10,12	0,02		10,17	0,00		10,16	0,02		10,18	0,03	
Densidad, Kg/m3	2,333	0,020		2,332	0,014		2,311	0,015		2,313	0,011		2,306	0,014		2,304	0,002	
Vacíos, %	6,8	0,8		6,8	0,6		7,5	0,6		7,4	0,4		7,7	0,6		7,8	0,1	
Lec. Carga, KN	199,0	11,1		225,0	21,7		221,7	14,2		231,3	11,5		166,0	2,0		177,3	7,6	
Trac Ind, kPa	838,1	52,3	59,2	943,8	92,6	104,8	915,6	69,0	78,1	954,8	57,8	65,4	679,2	9,4	10,6	728,0	34,6	86,0
ITSR, (%)	88,8						95,9						93,3					

Otro factor relevante para entender el valor de resistencia obtenido por las mezclas con el aditivo AMT1, es la densidad que se tiene en las muestras con este aditivo, ya que es comparativamente menor a los otros, por lo tanto, es de esperar que las probetas con menores densidades tengan menor resistencia a la tracción.

Si bien el gráfico y tabla anteriores dejaron en evidencia el comportamiento de las mezclas, se debe conocer si las probetas cumplen con la exigencia especificada por la Norma AASHTO T283. El próximo gráfico muestra el valor determinado de la susceptibilidad al daño por humedad de las muestras por aditivo y el valor mínimo que permite la Norma:

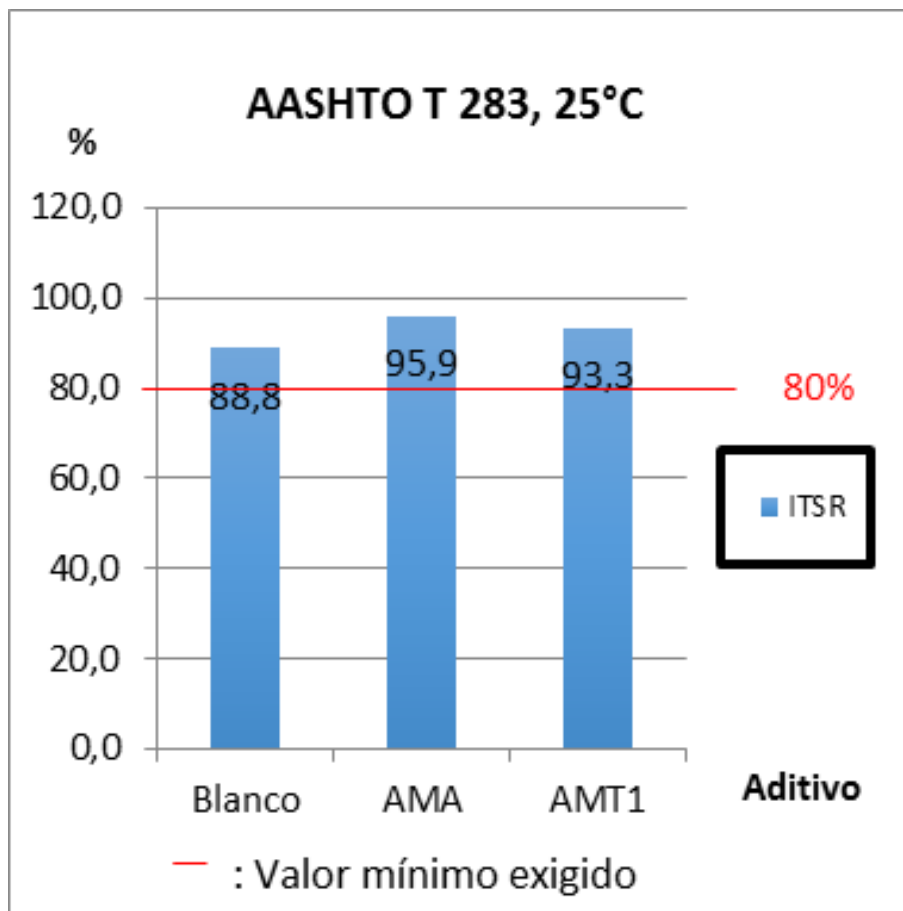


Figura 10: Gráfico Resultados Porcentaje ITSR AASHTO T 283

Finalmente, comparamos los resultados entregados de TSR con el mínimo del 80% que exige la norma AASHTO T 283, y como se puede observar en la Figura 10, todas las mezclas con y sin aditivo cumplen con esta exigencia, siendo la mezcla AMA la que presenta menor susceptibilidad a las condiciones de humedad a las que fue sometidas durante el ensayo. Pero, a pesar de que AMT1 baja la resistencia mejora la relación de humedad entre las probetas.

Sin embargo, todas superan con creces el límite de requerimiento, por lo tanto, no se requiere un aditivo en las mezclas de CA-24 para estar en condiciones aceptables en caso de humedad.

Análisis de daño

El análisis de daño es de forma cualitativa, en donde de forma visual se le asigna un valor al daño por humedad en función del total de la muestra. La norma AASHTO T 283 designa una escala del 0 al 5 para el análisis de daño de las muestras, donde 5 representa a una probeta totalmente dañada por humedad y 0 cuando no existe daño aparente. Para el caso de este estudio, se asignará un valor en escala porcentual para poder dimensionar de mejor forma el daño por humedad que presentan las muestras y así, identificar de manera más exacta el daño percibido. La escala propuesta en el estudio es un 0% cuando no existe daño en la probeta (0 análisis de daño cualitativo de la norma AAASHTO T283) y de un 100% cuando se encuentra totalmente dañada por humedad (valor 5 en escala AASHTO T283).

El porcentaje de daño se generó sumando el porcentaje de deterioro identificado por *pelado*, es decir, cuanto de los agregados no tiene o no cuenta con una capa de asfalto que entregue adherencia a las probetas, y, por otro lado, la fractura. La fractura se refiere a la cantidad de agregados que, debido a falta de resistencia, se quebraron, quedando cada fracción en las dos caras de la probeta rota.

La tabla a continuación muestra el porcentaje de daño por adherencia que se observaron en las probetas luego de ser ensayadas por Tracción Indirecta.

Tabla 13: Resumen del porcentaje de Daño AASHTO T 283

Tipo de Aditivo	Probetas en condición Seca (%)	Probetas en condición Húmeda (%)
Blanco	1	5
AMA	2	0
AMT1	1	0

Al hacer un análisis visual de las probetas posterior al ensaye, no se vieron grandes daños por adherencia, la única probeta malograda en un cierto porcentaje fue de la mezcla sin aditivo en condiciones de humedad, pero a pesar de ello, es casi despreciable. En las siguientes fotografías se aprecian las probetas en peores condiciones, que corresponde a una mezcla sin aditivo en condición seca y húmeda.



Figura 11: Fotografía de Probeta CA-24 en Condición Seca y húmeda respectivamente.

Se puede apreciar, en la primera fotografía, una fractura notoria del agregado, donde se ve reflejado en ambas caras de la probeta. Pese a ello, el porcentaje de daño es muy pequeño, ya que, en comparación del área total de la muestra es bajo el 1%, pero se considera que existe algo de daño.

4.1.2 ASTM D 4867

Resultados Ensayo TSR

En el siguiente gráfico se muestra una comparación de los resultados del ensayo TSR, del promedio de las probetas en su condición húmeda y seca, respectivamente:

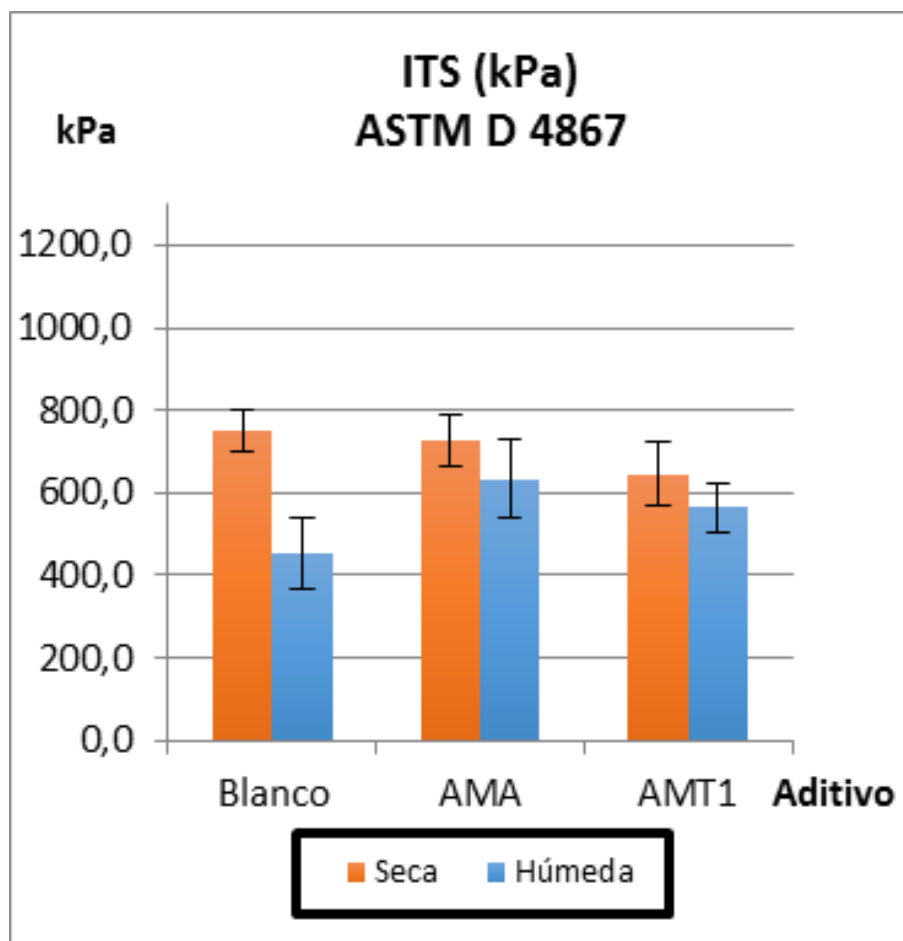


Figura 12: Gráfico ITS ASTM D 4867.

En términos por condición seca, todas las mezclas tienen una resistencia a la tracción indirecta muy similar. En condiciones de humedad, las probetas ensayadas tienen considerablemente menor tracción en todos los casos. Empero, se observa que las muestras sin aditivo (Blanco) son las que tienen la menor resistencia. En la siguiente Tabla, se aprecia el promedio de las muestras por condición y tipo de mezcla, en donde se evidencia, al igual que en el caso de la Norma AASHTO T283, que las probetas con mayor porcentaje de vacíos de aire tienden a tener menor valor de resistencia a la

tracción.

Tabla 14: Resumen resultados TSR – ASTM D4867

ENSAYO TSR	Mezcla con CA-24						Mezcla con CA-24 + AMA						Mezcla con CA-24 + AMT1					
	Húmedas			Secas			Húmedas			Secas			Húmedas			Secas		
	$\bar{X}$	σ	I.C.	$\bar{X}$	σ	I.C.	$\bar{X}$	σ	I.C.	$\bar{X}$	σ	I.C.	$\bar{X}$	σ	I.C.	$\bar{X}$	σ	I.C.
Altura, cm	6,37	0,03		6,37	0,10		6,38	0,07		6,36	0,06		6,45	0,02		6,53	0,04	
Diámetro, cm	10,16	0,01		10,17	0,03		10,19	0,04		10,18	0,01		10,18	0,03		10,18	0,01	
Densidad, Kg/m ³	2,310	0,012		2,313	0,029		2,316	0,013		2,316	0,014		2,295	0,004		2,295	0,021	
Vacios, %	7,6	0,5		7,5	1,2		7,2	0,5		6,9	3,8		8,0	0,2		8,0	0,8	
Lec. Carga, KN	109,0	16,1		180,7	7,6		152,3	18,0		174,7	11,0		137,3	12,5		159,3	14,5	
Trac Ind, kPa	454,6	69,9	79,0	752,3	41,2	46,6	632,1	76,8	86,9	727,6	51,1	57,8	563,5	49,3	55,8	646,1	62,3	154,7
ITSR, (%)	60,4						86,9						87,2					

Además, se aprecia que la mezcla convencional no cumple con las exigencias de la Norma ASTM, cuyo valor mínimo de aceptación a daño por humedad es de un 75%, por lo que se puede recalcar la necesidad de incorporar a la mezcla un aditivo mejorador.

Entre aditivos, se puede ver que las mezclas que contienen mejoramiento toleran resistencias muy parecidas para ambas condiciones, por lo que su diferencia en este ámbito es casi indiferente.

En el siguiente gráfico, se muestra el valor determinado de la susceptibilidad al daño por humedad de las muestras por aditivo y el valor mínimo que permite esta Norma, este valor es el que las muestras ensayadas deben cumplir para ser aceptadas para su utilización y con ello, asegurar un comportamiento adecuado frente a condiciones de humedad:

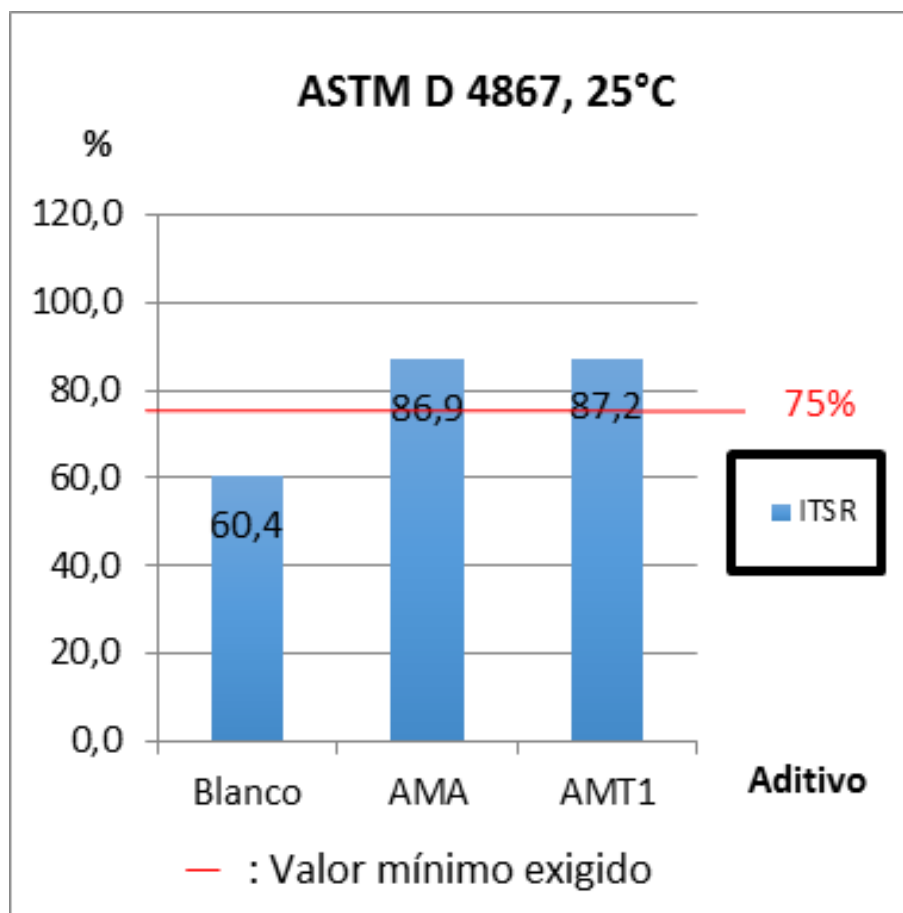


Figura 13: Gráfico Resultados porcentaje ITSR ASTM D 4867.

De los resultados observados, el porcentaje de daño en las muestras sin aditivo posee un valor muy bajo, reflejándose en una alta susceptibilidad de daño por humedad, llegando sólo un 60%. Esto quiere decir, que la mezcla reduce significativamente su resistencia al encontrarse en condiciones de humedad, además, representa que la mezcla no debiera ser aceptada, por lo que requiere un aditivo de mejoramiento ya que no cumple con los requisitos mínimos exigidos por ASTM D 4867.

Analizando las otras muestras con aditivo, ambas cumplen con lo especificado, teniendo una relación muy similar, del 87% aproximadamente, por lo que, en primera instancia, se debe considerar la utilización de algún aditivo en la mezcla.

Análisis de daño

Del mismo modo que en el análisis anterior, el análisis de daño es de forma cualitativa, determinando porcentajes de forma visual en relación al área visible de las muestras. La escala propuesta en el estudio es un 0% cuando no existe daño en la probeta (0 análisis de daño cualitativo de la norma AAASHTO T283) y de un 100% cuando se encuentra totalmente dañada por humedad (valor 5 en escala AASHTO T283).

La tabla a continuación muestra el porcentaje de daño por adherencia que se observaron en las probetas luego de ser ensayadas por Tracción Indirecta.

Tabla 15: Resumen del porcentaje de Daño ASTM D4867.

Tipo de Aditivo	Probetas en condición Seca (%)	Probetas en condición Húmeda (%)
Blanco	1	50
AMA	0	20
AMT1	0	15

De la Tabla 15 se ve una gran diferencia en el deterioro que tuvieron las diferentes muestras. En el caso de probetas secas, los valores de daño son prácticamente nulos, demostrando una buena adherencia y alta resistencia de los agregados ante las fracturas. Sin embargo, por otro lado, en condiciones húmedas se muestra que, las muestras sin aditivo llegan a estar dañadas en un 50%. Esto se refleja en grandes problemas de adherencia, ya que la mitad de las probetas tuvieron problemas de adherencia entre agregado/betún y se puede ver coherencia entre el análisis cualitativo de la muestra con el valor determinado por medio del análisis del TSR, el cual entregaba como resultado muy bajo de la relación entre las condiciones de humedad y secas. Las probetas con aditivos, a pesar de que demostraron superar el valor límite de la Norma, igual presentan cerca del 15-20% de daño.

4.1.3 LNV

Resultados Ensayo TSR

A continuación se muestra el gráfico que presenta la comparación entre las mezclas asfálticas.

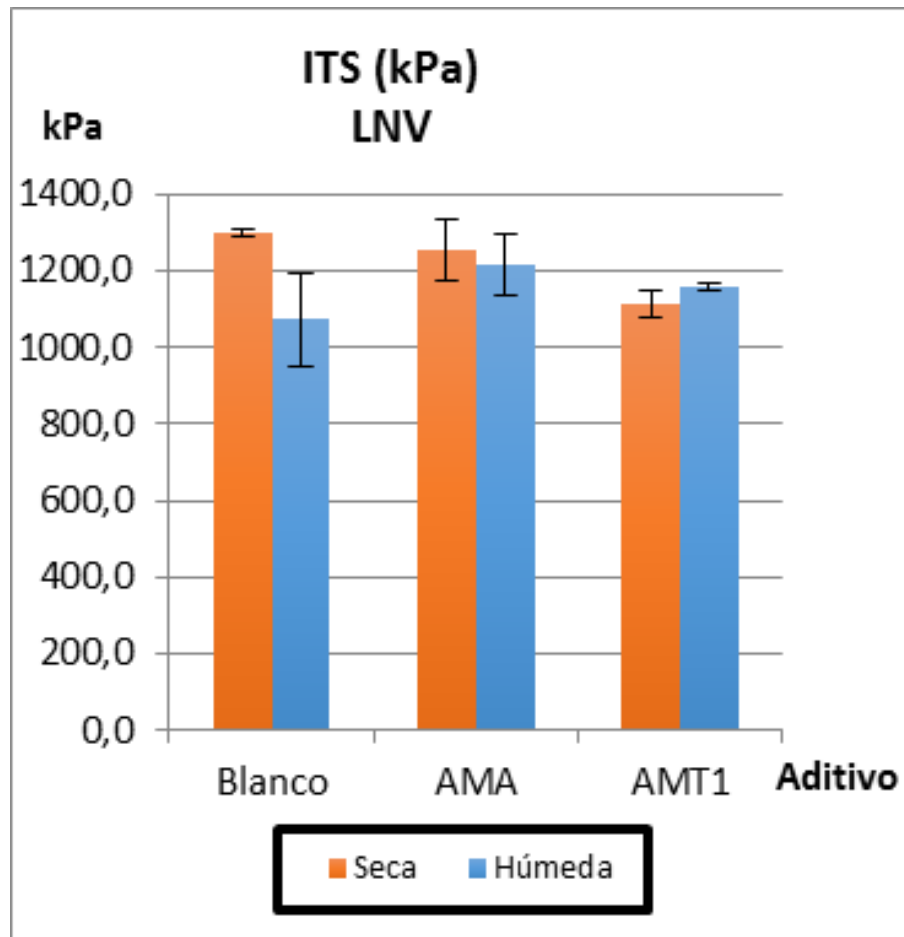


Figura 14: Gráfico ITS LNV.

Como observar del del gráfico y de la Tabla 16, las probetas que fueron ensayas en condiciones de humedad tienen menor resistencia a la tracción en el caso de mezclas sin aditivo. A continuación, se muestran los intervalos de confianza de tracción indirecta de las diferentes muestras, donde se puede señalar con un 95% de confiabilidad que en el caso de la mezcla convencional, existe una disminución de la resistencia en la la mezcla asfáltica y que para el caso de las mezclas con aditivo AMA y AMT1, no hay variaciones importantes en su resistencia.

Tabla 16: Resumen resultados TSR - LNV

ENSAYO TSR	Mezcla con CA-24						Mezcla con CA-24 + AMA						Mezcla con CA-24 + AMT1					
	Húmedas			Secas			Húmedas			Secas			Húmedas			Secas		
	$\bar{X}$	σ	I.C.	$\bar{X}$	σ	I.C.	$\bar{X}$	σ	I.C.	$\bar{X}$	σ	I.C.	$\bar{X}$	σ	I.C.	$\bar{X}$	σ	I.C.
Altura, cm	6,32	0,08		6,34	0,05		6,32	0,08		6,41	0,08		6,32	0,08		6,60	0,06	
Diámetro, cm	10,16	0,01		10,16	0,01		10,16	0,01		10,16	0,01		10,16	0,01		10,16	0,01	
Densidad, Kg/m3	2,307	0,006		2,308	0,023		2,304	0,009		2,306	0,018		2,288	0,009		2,288	0,011	
Vacios, %	7,5	0,2		7,5	0,9		7,7	0,4		7,6	0,7		8,3	0,3		8,3	0,4	
Lec. Carga, KN	256,33	25,1		311,33	2,5		290,67	19,7		304,00	11,8		276,67	2,1		277,33	9,3	
Trac Ind, kPa	1074,1	98,8	111,8	1300,0	8,9	10,1	1217,3	65,8	74,5	1256,8	64,0	72,4	1159,5	8,2	9,3	1113,9	28,9	71,7
ITSR	82,6						96,9						104,1					

Para el caso de las muestras sin aditivo, la diferencia entre la condición húmeda y seca si es considerable, por lo tanto, aplicar un aditivo para tratar de equilibrar este factor de daño en las mezclas es importante para prevenir los posibles daños.

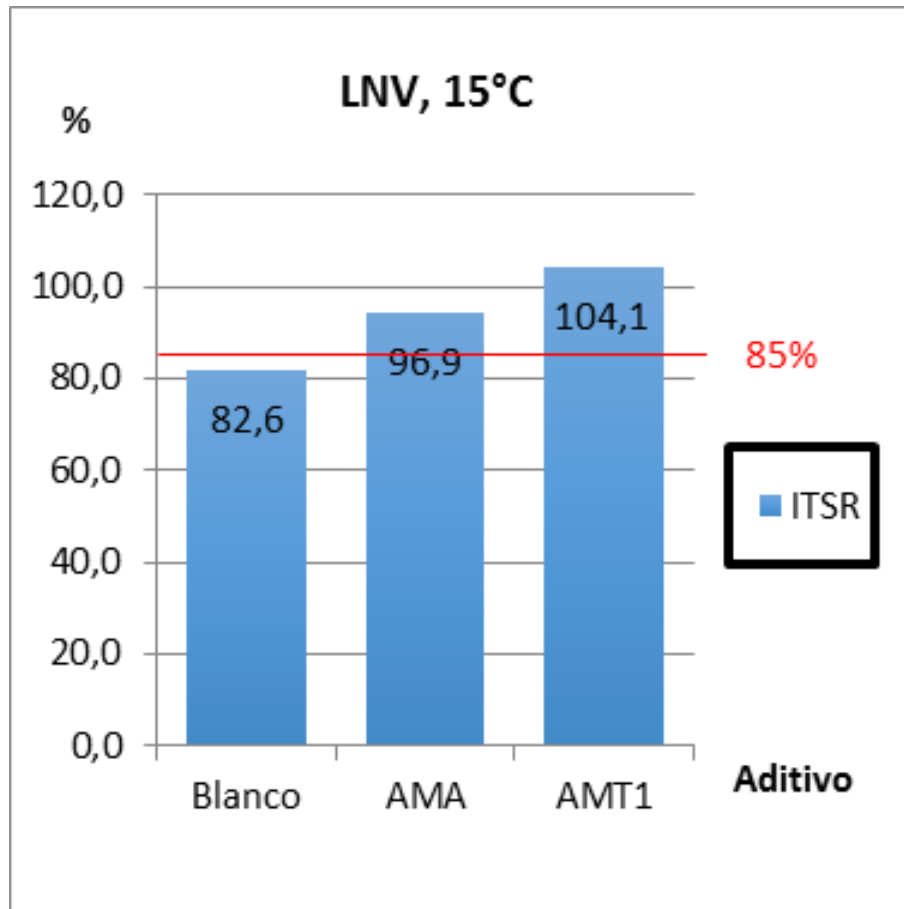


Figura 15: Gráfico Resultados porcentaje ITSR LNV.

Finalmente, se compara los resultados entregados por el ensayo a tracción indirecta con el mínimo que exige las especificaciones del LNV, y se puede ver, de forma clara, que utilizando la mezcla asfáltica sin aditivo no cumple con los límites exigidos, por lo que se debe utilizar un aditivo de mejoramiento. A priori, se puede decir que en función de la relación entre las condiciones secas y húmedas, es mejor utilizar un aditivo de mejoramiento de trabajabilidad ya que aumenta sustancialmente la resistencia de la mezcla, superando el límite permitido en creces.

Análisis de daño

La tabla 17 muestra el porcentaje de daño por adherencia que se observaron en las probetas luego de ser ensayadas por Tracción Indirecta. Cabe recordar, que la escala propuesta en el estudio es un 0% cuando no existe daño en la probeta (0 análisis de daño cualitativo de la norma AAASHTO T283) y de un 100% cuando se encuentra totalmente dañada por humedad (valor 5 en escala AASHTO T283).

Tabla 17: Resumen del porcentaje de Daño - LNV.

Tipo de Aditivo	Probetas en condición Seca (%)	Probetas en condición Húmeda (%)
Blanco	2	40
AMA	1	20
AMT1	2	5

Mediante la metodología del LNV, se ve una gran pérdida de adherencia en las probetas en condiciones húmedas. Logrando un deterioro de un 40% en el caso de la mezcla sin aditivo, esto demuestra altos problemas de adherencia entre el agregado y el ligante asfáltico, concordando con los resultados cuantitativos obtenidos mediante el ensayo TSR, donde las muestras sin aditivos no llegan al nivel de aceptación de la norma por su alta susceptibilidad al daño por humedad.

En las siguientes fotografías, se puede observar la gran diferencia entre una probeta sin aditivo en condiciones de humedad, junto a muestras en las mismas condiciones pero con aditivo de mejoramiento de adherencia (AMA), el cual demuestra cualitativa y cuantitativamente ser mejor y menos susceptible al daño por humedad.

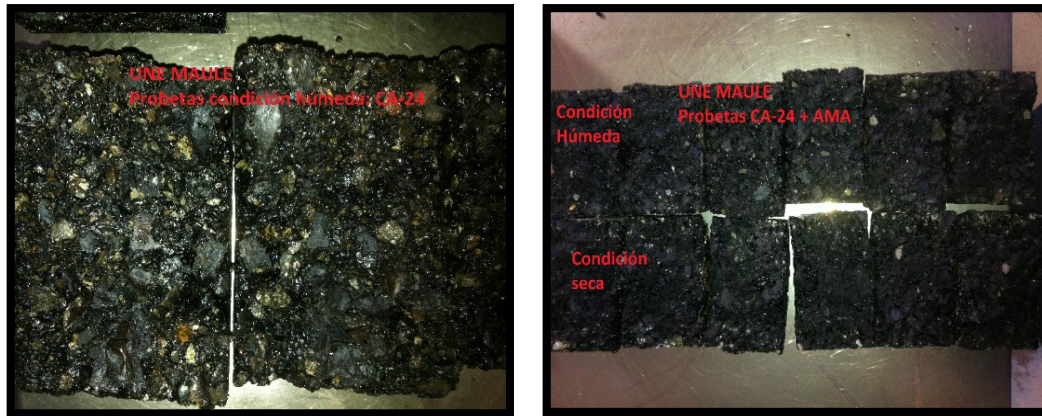


Figura 16: Fotografía de Probeta CA-24 en condición Húmeda y probetas CA-24+AMA en condición seca y húmeda respectivamente.

Como fue mencionado con anterioridad, las fotografías muestran una clara evidencia que las muestras de CA-24 tienen gran pérdida de adherencia siendo reflejadas en la imagen por medio de los agregados que no están cubiertos por una capa de ligante asfáltico, dejando al árido expuesto.

4.1.4 Comparación Normas

Se realizaron 3 gráficos para poder comprar las normas en estudio, AASHTO T 283, ASTM y UNE EN 12697** (con modificaciones del LNV). Los gráficos son en función del tipo de aditivo, junto con ello, se analizaron las probetas tanto secas como húmedas. A continuación, se presentan dichos resultados:

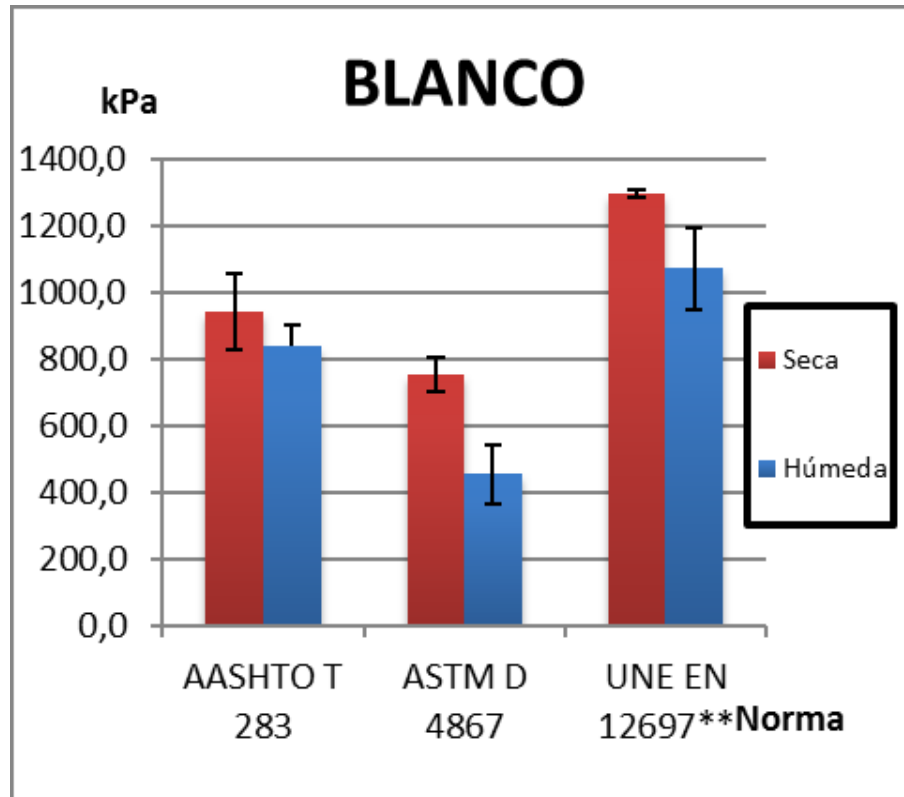


Figura 17: Resumen Normas Ensayo TSR-Blanco

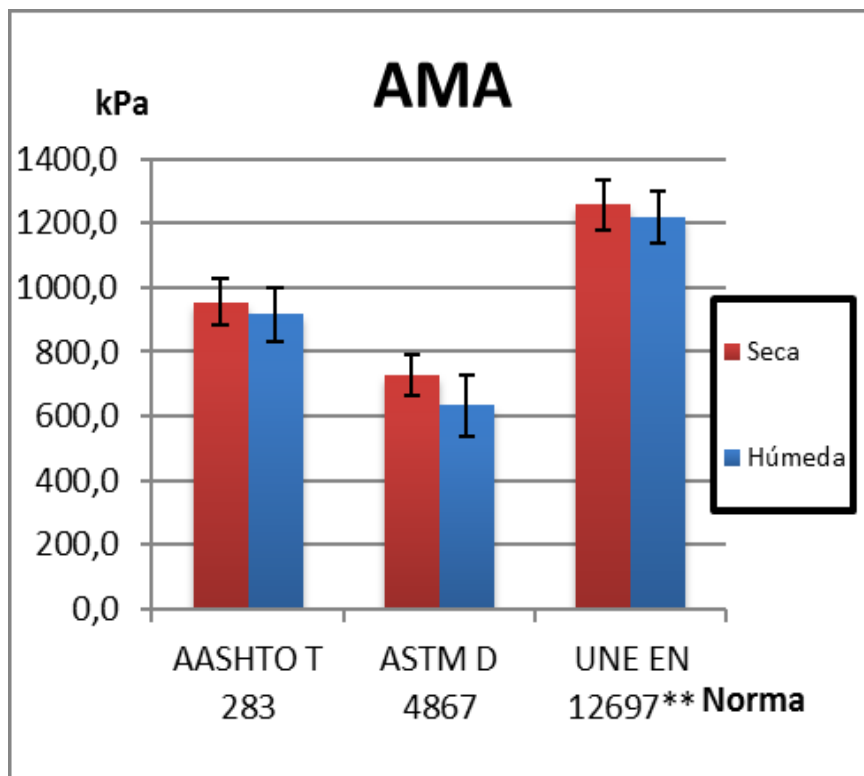


Figura 18: Resumen Normas Ensayo TSR [kPa]– AMA.

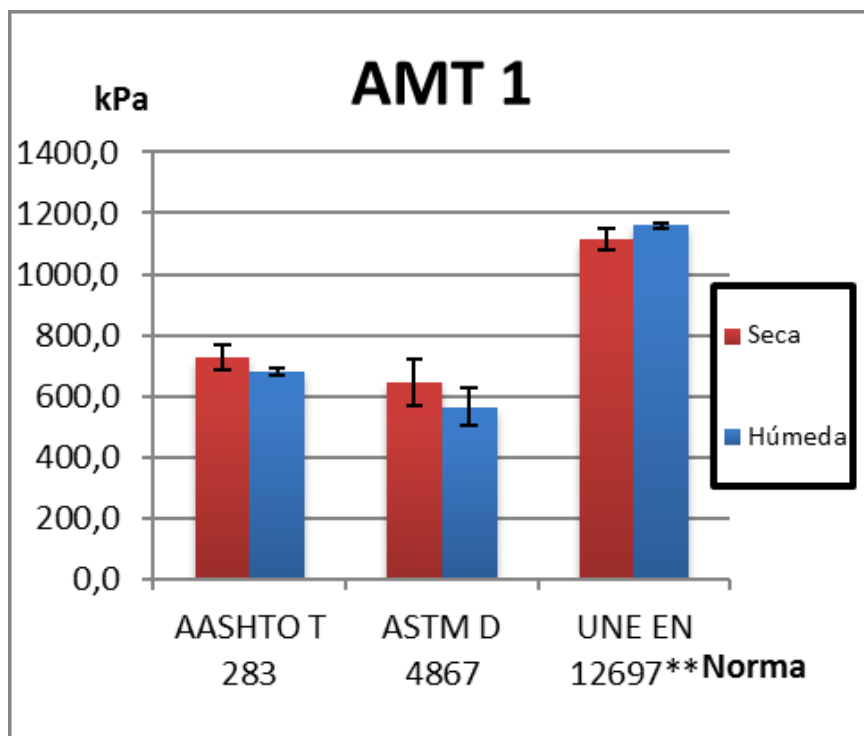


Figura 19: Resumen Normas Ensayo TSR [kPa]- AMT1.

Como se observa en todos los gráficos presentados, la norma UNE EN 12697 con modificaciones del laboratorio nacional (LNV) muestra mayores valores de resistencia a la tracción indirecta, es decir, que las probetas resisten de mejor forma la carga aplicada por tracción indirecta. Esto puede deberse a que la norma AASHTO T 283 y ASTM se ensayan a una temperatura de acondicionamiento de 25°C, en donde la mezcla asfáltica tiende a tener menor resistencia al aumentar la temperatura, en cambio, las probetas por LNV son ensayadas a una temperatura de 15°C, por lo tanto, tienden a tener resultados mayores.

Junto con ello, las normas ASTM y AASHTO, al ser ensayadas con las mismas condiciones de temperatura, se puede realizar un análisis más crítico sobre ellas. Cabe mencionar, que en las mezclas sin aditivo presentan grandes diferencias entre las normativas, no sólo en la capacidad de resistencia, también en la susceptibilidad al daño por humedad, por el método ASTM las mezclas presentaron ser más sensibles en presencia de agua que en la Norma AASHTO. Este resultado es revelador, ya que en teoría uno espera que el daño en AASHTO fuese mayor debido a los ciclos de hielo y deshielo, pero en la práctica las probetas mediante ASTM mostraron un daño aún mayor.

Siguiendo con el mismo análisis, en los casos de las muestras con aditivos AMA y AMT1, se comportan de forma muy similar, donde la resistencia es mayor con el aditivo mejorador de adherencia, pero la relación entre las condiciones húmeda/seca no difiere entre ellas. Además, en la mayoría de los casos, independiente del tipo de aditivo, las probetas en estado húmedo tienden a tener menor resistencia a la tracción que las muestras en condiciones secas.

Asimismo, se generan dos gráficos de la capacidad de resistencia a la tracción de las probetas en su condición seca y húmeda. Esto para poder identificar de mejor forma la reacción que tienen al cambio de condiciones que fueron expuestas al momento de hacer el ensayo de TSR.

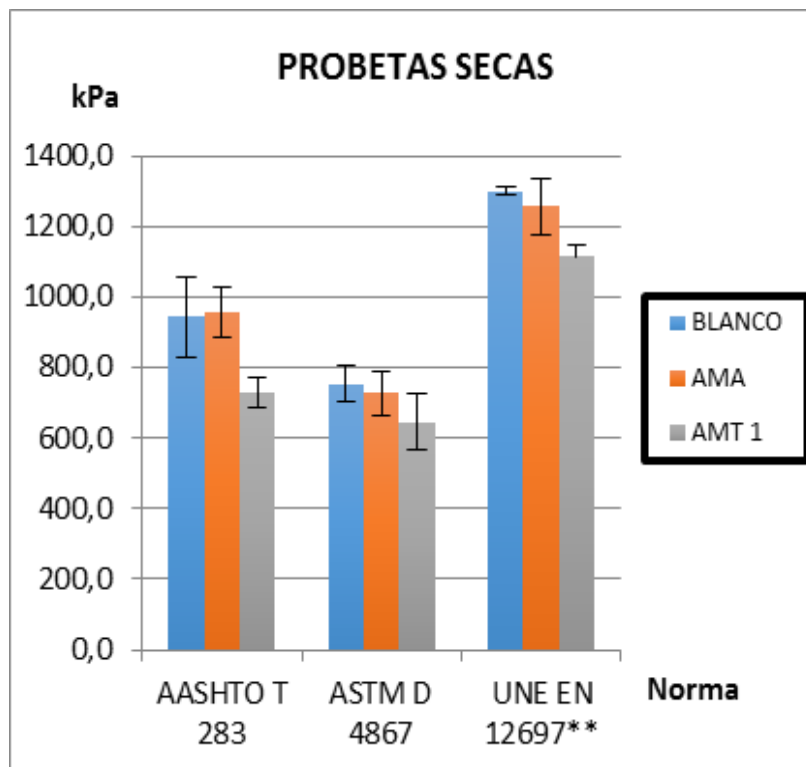


Figura 20: Gráfico ensayos TSR de Normas de probetas en condición Secas.

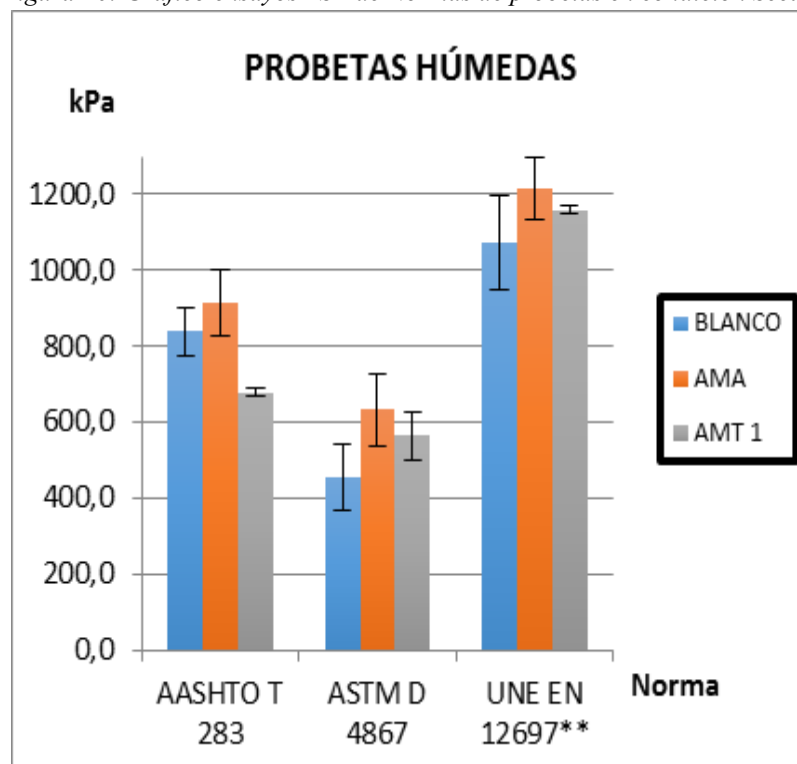


Figura 21: Gráfico ensayos TSR de Normas de probetas en condición Húmedas.

Como se puede observar de los gráficos las muestras con el aditivo AMA tienen mayor resistencia en la mayoría de los casos. Por lo mismo, para mayor seguridad, resistencia y menor susceptibilidad a la humedad, se recomienda utilizar dicho aditivo. En caso contrario, si la mezcla no tiene aditivos, hay que preocuparse de realizar los ensayos detenidamente y ver si cumple con las especificaciones mínimas, ya que solo en el caso por el método AASHTO T 283 cumplió con la normativa.

4.2 Resultados TSR Planta IQUIQUE

4.2.1 AASHTO T 283

Resultados Ensayo TSR

Del mismo modo que en el caso de la Planta del Maule, se realiza una comparación de los resultados del ensayo a tracción indirecta en [kPa], del promedio de las probetas en su condición húmeda y seca respectivamente, por lo tanto, el gráfico en función de las mezclas es el siguiente:

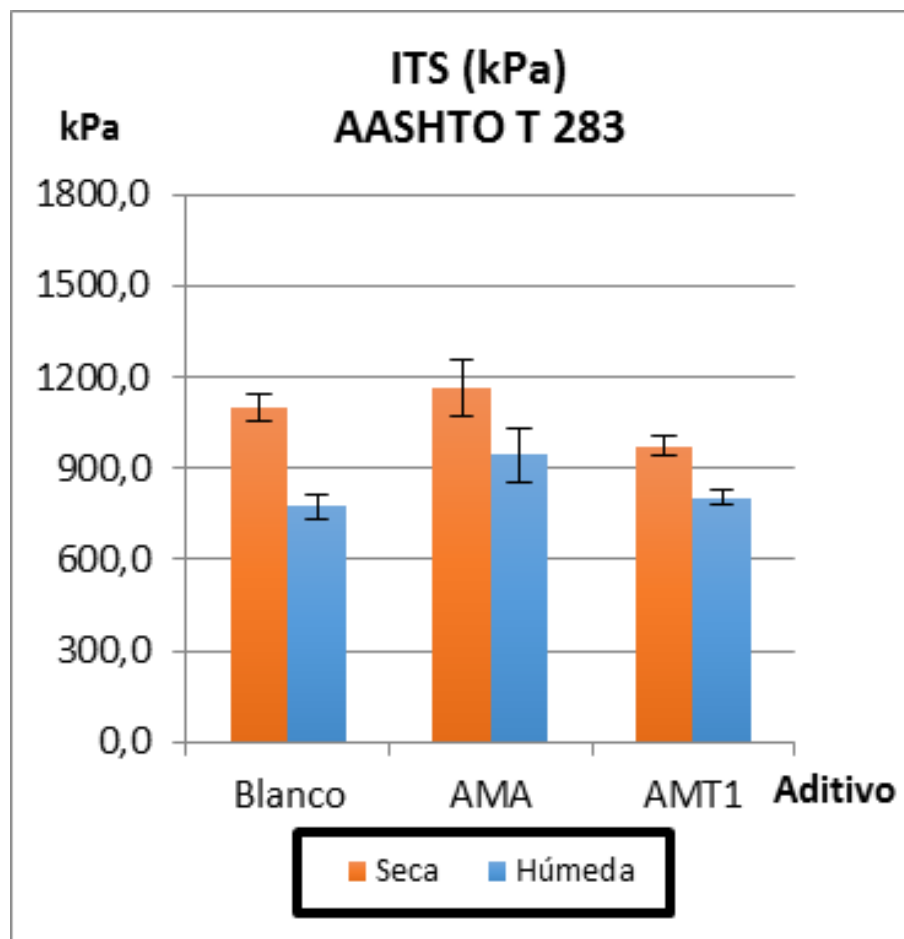


Figura 22: Gráfico ITS AASHTO T 283.

Al igual que en la mayoría de los casos ya vistos, las probetas ensayadas en condiciones de humedad tienen menor resistencia a la tracción, por lo que se puede evidenciar la disminución de resistencia en la mezcla asfáltica.

La siguiente tabla muestra con una confiabilidad del 95% los datos presentados en el gráfico. A partir de esto es posible apreciar una pérdida considerable de la resistencia a tracción de las muestras en condiciones de humedad.

Tabla 18: Resumen resultados TSR - AASHTO T283

ENSAYO TSR	Mezcla con CA-24						Mezcla con CA-24 + AMA						Mezcla con CA-24 + AMT1					
	Húmedas			Secas			Húmedas			Secas			Húmedas			Secas		
	$\bar{X}$	σ	I.C.	$\bar{X}$	σ	I.C.	$\bar{X}$	σ	I.C.	$\bar{X}$	σ	I.C.	$\bar{X}$	σ	I.C.	$\bar{X}$	σ	I.C.
Altura, cm	6,25	0,05		6,28	0,03		6,27	0,01		6,27	0,06		6,35	0,09		6,36	0,05	
Diámetro, cm	10,17	0,01		10,17	0,00		10,18	0,01		10,17	0,01		10,17	0,01		10,16	0,01	
Densidad, Kg/m3	2,320	0,010		2,320	0,006		2,325	0,015		2,321	0,006		2,302	0,011		2,302	0,006	
Vacios, %	6,9	0,4		6,9	0,3		6,6	0,6		6,7	0,2		7,5	0,5		7,5	0,2	
Lec. Carga, KN	182,7	7,6		261,0	7,0		223,7	16,9		276,0	15,5		192,7	6,4		233,7	8,0	
Trac Ind, kPa	774,1	33,5	37,9	1101,5	34,9	39,5	944,1	73,2	82,8	1165,2	77,0	87,1	803,4	18,7	21,2	973,1	26,8	30,3
ITSR, (%)	70,3						81,0						82,6					

Si bien los datos anteriores dieron indicio del comportamiento de las mezclas, se debe conocer si las probetas cumplen con la exigencia especificada por la Norma AASHTO T283. El siguiente gráfico muestra el valor determinado de la susceptibilidad al daño por humedad de las muestras por aditivo y el valor mínimo de 80% que permite la Norma:

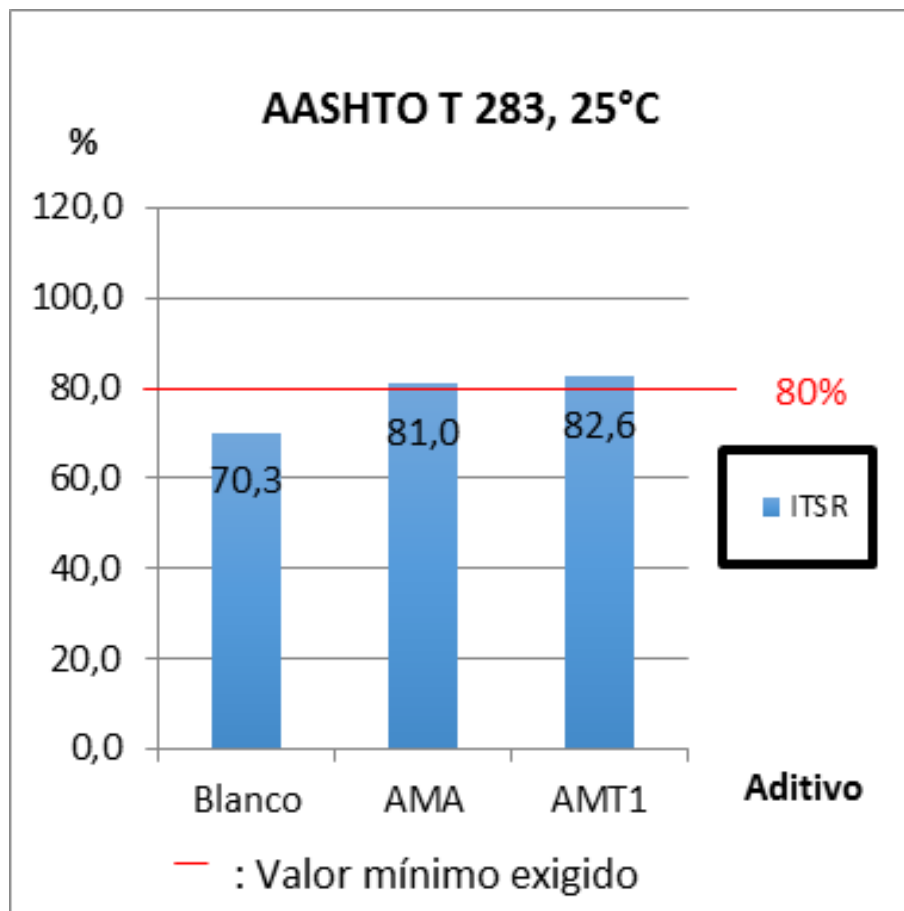


Figura 23: Gráfico Resultados porcentaje ITS R AASHTO T 283.

Finalmente, se comparan los resultados entregados por el ensayo a tracción indirecta con el mínimo que exige la norma AASHTO T 283, y como se observa en el gráfico, las mezclas sin aditivo no cumplen con las exigencias. Siguiendo las normativas, se debiesen utilizar aditivos para estar dentro del porcentaje aceptable, los aditivos utilizados en el estudio demuestran superar estas especificaciones, siendo la mezcla AMT1 la que tiene menor sensibilidad a condiciones de humedad.

Análisis de daño

Como se mencionó con anterioridad, este tipo de análisis de daño es de forma cualitativa, en donde de forma visual se le asigna un valor del total de la muestra. La escala propuesta en el estudio es un 0% cuando no existe daño en la probeta (0 análisis de daño cualitativo de la norma AASHTO T283) y de un 100% cuando se encuentra

totalmente dañada por humedad (valor 5 en escala AASHTO T283). La Tabla 19 de a continuación muestran en porcentaje de daño por adherencia que se observaron en las probetas luego de ser ensayadas por Tracción Indirecta.

Tabla 19: Resumen del porcentaje de Daño AASHTO T 283.

Tipo de Aditivo	Probetas en condición Seca (%)	Probetas en condición Húmeda (%)
Blanco	0	30
AMA	0	5
AMT1	0	10

Mediante AASHTO, se ve una gran pérdida de adherencia en las probetas en condiciones húmedas. A pesar de ello, la mezcla con el aditivo AMT1 fue la mezcla que tuvo menor daño por humedad.



Figura 24: Fotografía de Probeta CA-24 y CA-24+AMA en condición húmeda respectivamente.



Figura 25: Fotografía de Probeta AMT1 en condición Húmeda.

En el caso de la probeta CA-24, se determina que existe un daño relativamente alto, aproximadamente un 30%, el cual se ve reflejado en los resultados cualitativos y cuantitativos que sufrió pérdida de adherencia significativa, por lo tanto, no superan el valor del 80% límite. Por otro lado, las muestras con aditivos no revelan gran daño, pero sí, en el caso del aditivo AMT1 se observa un par de agregados fracturados. Esta fractura indica que el material fue menos resistente que la adherencia existente entre el ligante y los agregados.

4.2.2 ASTM

Resultados Ensayo TSR

En el siguiente gráfico, se muestra una comparación de los resultados del ensayo TSR, del promedio de las probetas en su condición húmeda y seca respectivamente:

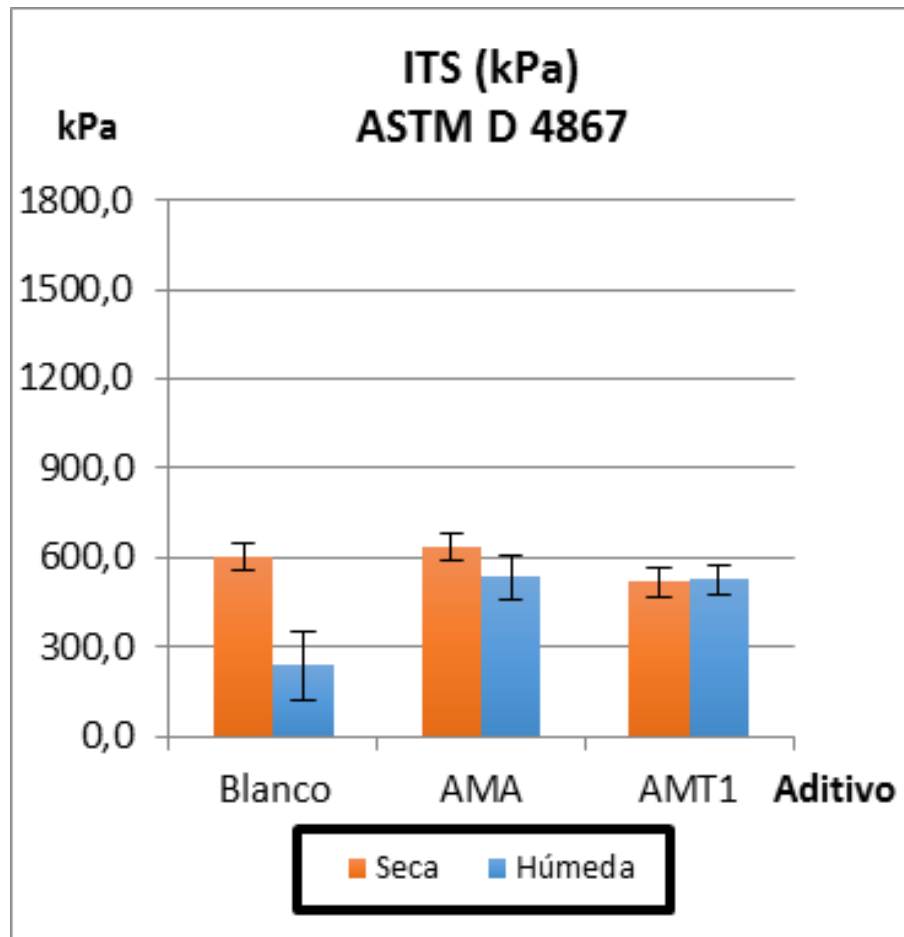


Figura 26: Gráfico ITS ASTM D 4867.

De la Figura 26, queda demostrado de forma clara que hay una fuerte disminución de resistencia en las muestras sin aditivo, junto con ello se puede apreciar a simple vista que la mezcla tiene gran susceptibilidad a la humedad. Sin embargo, al agregar un aditivo, sea AMA o AMT1, la diferencia disminuye considerablemente, al borde de tener prácticamente ni una diferencia entre las muestras en condiciones de humedad y las secas.

En la Tabla 20, se puede apreciar el promedio de las muestras por condición y tipo de mezcla, en donde se evidencia, que las mezclas convencionales tendrán, con un 95% de confiabilidad, una gran pérdida de resistencia entre condición húmeda y seca.

Tabla 20: Resumen resultados TSR - ASTM D4867

ENSAYO TSR	Mezcla con CA-24						Mezcla con CA-24 + AMA						Mezcla con CA-24 + AMT1					
	Húmedas			Secas			Húmedas			Secas			Húmedas			Secas		
	$\bar{X}$	σ	I.C.	$\bar{X}$	σ	I.C.	$\bar{X}$	σ	I.C.	$\bar{X}$	σ	I.C.	$\bar{X}$	σ	I.C.	$\bar{X}$	σ	I.C.
Altura, cm	6,34	0,01		6,36	0,02		6,40	0,11		6,39	0,04		6,46	0,01		6,52	0,02	
Diámetro, cm	10,17	0,01		10,17	0,03		10,19	0,04		10,18	0,01		10,17	0,01		10,16	0,01	
Densidad, Kg/m3	2,308	0,022		2,306	0,018		2,302	0,032		2,301	0,028		2,282	0,014		2,284	0,011	
Vacios, %	7,2	0,9		7,2	0,7		7,1	1,3		7,2	1,1		8,0	0,6		7,9	0,4	
Lec. Carga, KN	57,3	21,9		144,0	8,0		129,0	11,5		153,3	9,0		128,0	10,0		127,3	9,5	
Trac Ind, kPa	239,5	92,4	104,5	600,5	35,8	40,6	534,1	57,6	65,2	635,5	35,6	40,3	525,1	41,7	47,2	518,6	39,4	44,5
ITSR, (%)	39,9						84,1						101,3					

Como se observa de los resultados, el porcentaje de susceptibilidad al daño por humedad de las mezclas asfálticas es crítico en el caso de la mezcla sin aditivo. Ahora, el siguiente gráfico compara los resultados obtenidos con el índice de daño que hay con el mínimo exigido por la norma de un 75%.

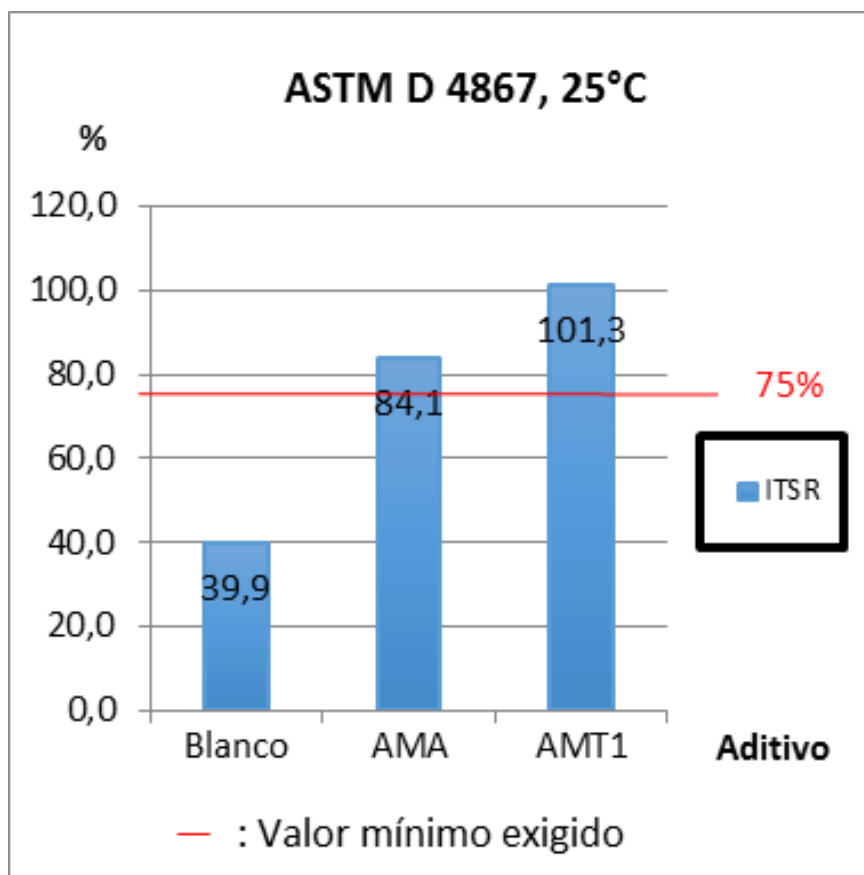


Figura 27: Gráfico Resultados porcentaje ITSR ASTM D 4867.

Se puede observar en el gráfico, que el porcentaje de daño en las muestras sin aditivo posee un valor muy bajo, reflejándose en una alta susceptibilidad de daño por humedad, llegando solo a un 40%. Esto quiere decir, que la mezcla reduce significativamente su resistencia al encontrarse en condiciones de humedad y que no es aceptada sin algún aditivo mejorador. De este modo, existe la necesidad de adicionar un mejorador de adherencia o trabajabilidad. Cabe destacar, que la mezcla AMT1 la que tiene mejor condición para enfrentar condiciones de humedad.

Análisis de daño

En la siguiente tabla se observa el daño por adherencia en las probetas luego del ensayo TSR:

Tabla 21: Resumen del porcentaje de Daño ASTM D4867.

Tipo de Aditivo	Probetas en condición Seca (%)	Probetas en condición Húmeda (%)
Blanco	5	50
AMA	0	5
AMT1	3	1

Lo más destacable de la Tabla 21, son los resultados de la muestra sin aditivo en condiciones de humedad, ya que en los otros casos, el daño visual es casi imperceptible. Ésta se encuentra muy dañada, lo que es esperable luego de los resultados determinados por el ensayo TSR, donde la muestra se encuentra por debajo de los límites permitidos por mucha diferencia. En estos casos, se tiene que utilizar aditivos de mejoramiento ya que la mezcla propiamente tal no cumple de forma excesiva con la normativa. Para poder visualizar de mejor forma los resultados, se presenta una fotografía de la probeta en peores condiciones luego de ser ensaya:



Figura 28: Fotografía de Probeta CA-24 en condición Húmeda.

De la fotografía, se puede destacar la gran pérdida de adherencia que se identifica a través de los agregados que se encuentran sin capa de cemento asfáltico, esto quiere decir que, durante su inmersión en agua, hubo una gran pérdida de unión entre estos dos materiales.

4.2.3 LNV

Resultados Ensayo TSR

A continuación, se muestra el gráfico que presenta la comparación entre las mezclas asfálticas.

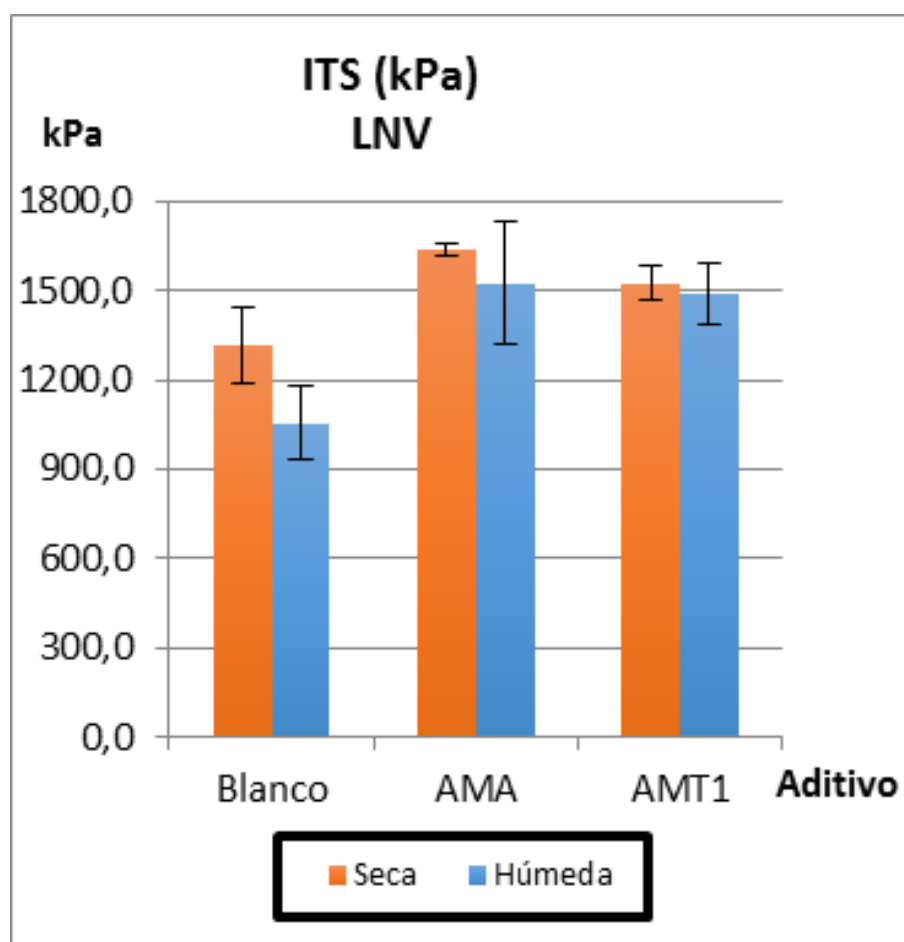


Figura 29: Gráfico ITS LNV.

De forma muy similar al caso anterior, se detecta una disminución relevante de resistencia en las muestras sin aditivo. Cabe mencionar, que la relación entre la condición seca y húmeda de las mezclas con aditivo varían muy poco. Pese a esto, se observa en general que las probetas que fueron ensayadas en condiciones de humedad tienen menor resistencia.

La siguiente Tabla muestra los resultados del ensayo de TSR mediante las

especificaciones de LNV, en donde se determinó el promedio de las probetas en condiciones de humedad y secas, además de su respectiva desviación estándar y por último, el intervalo de confianza de la resistencia a tracción indirecta.

Tabla 22: Resumen resultados TSR - LNV

ENSAYO TSR	Mezcla con CA-24						Mezcla con CA-24 + AMA						Mezcla con CA-24 + AMT1					
	Húmedas			Secas			Húmedas			Secas			Húmedas			Secas		
	$\bar{X}$	σ	I.C.	$\bar{X}$	σ	I.C.	$\bar{X}$	σ	I.C.	$\bar{X}$	σ	I.C.	$\bar{X}$	σ	I.C.	$\bar{X}$	σ	I.C.
Altura, cm	6,27	0,07		6,27	0,08		6,25	0,08		6,23	0,03		6,35	0,03		6,35	0,04	
Diámetro, cm	10,18	0,03		10,19	0,03		10,17	0,01		10,18	0,02		10,18	0,01		10,16	0,01	
Densidad, Kg/m ³	2,326	0,027		2,326	0,011		2,332	0,018		2,316	0,036		2,307	0,018		2,308	0,007	
Vacios, %	6,2	1,1		6,2	0,4		5,7	0,7		6,3	1,5		7,0	0,7		7,0	0,3	
Lec. Carga, KN	250,33	21,5		312,00	22,7		360,33	35,2		386,50	4,5		358,33	18,9		366,33	9,1	
Trac Ind, kPa	1056,0	100,7	114,0	1313,4	102,5	116,0	1526,2	166,5	188,4	1638,0	19,7	22,2	1491,0	83,1	94,0	1525,8	47,2	53,4
ITSR	80,4						93,2						97,7					

De lo anterior, se aprecia que la mezcla con aditivo AMT1 no tiene grandes variaciones en la resistencia a la tracción, por lo que se puede decir con un 95% de confiabilidad, que en este aspecto, es la mezcla más adecuada.

Si bien el gráfico y tabla anteriores evidenciaron el comportamiento de las mezclas, debemos conocer si las probetas cumplen con la exigencia especificada por LNV del 85% de TSR. El próximo gráfico muestra el valor determinado de la susceptibilidad al daño por humedad de las muestras por aditivo y el valor mínimo que permite la norma:

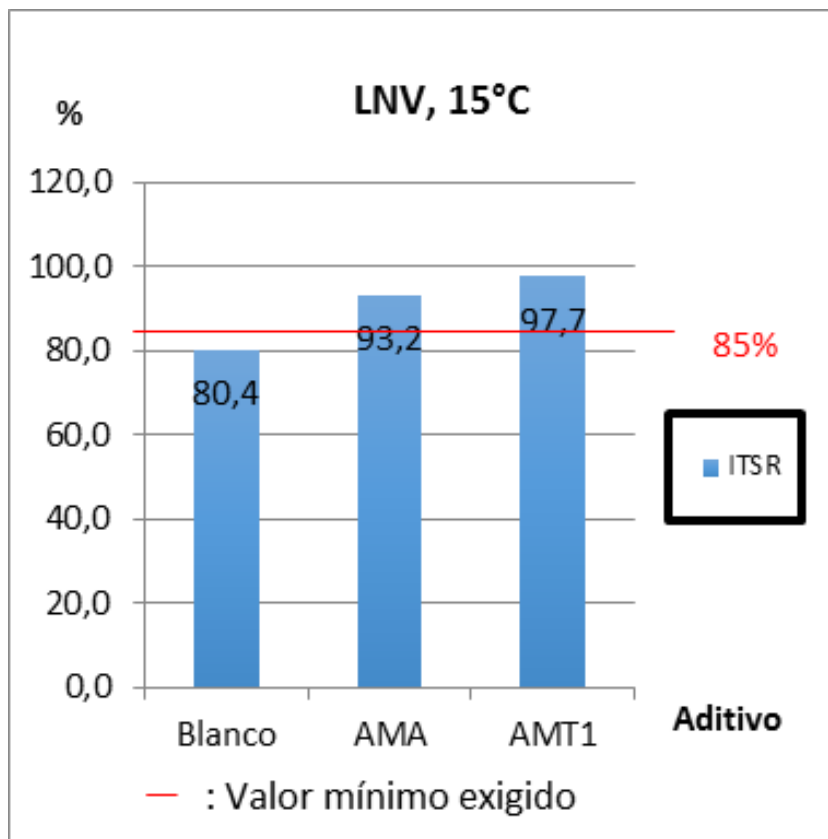


Figura 30: Gráfico Resultados porcentaje ITSR LNV.

De la Figura 30, se nota un claro aumento en la relación en función del tipo de mezcla, comenzando por las probetas sin aditivos, las cuales no cumplen con el 85% exigido por la norma, luego, mediante aditivos de mejoramiento de adherencia, incrementa a un 93% aproximadamente, cuyo valor es más que suficiente para estar dentro de lo aceptado y, finalmente, la muestra con mejoramiento de trabajabilidad, que logra un 97,7%. Esto último nos demuestra que a través de aditivos se puede modificar la mezcla asfáltica en caliente para que cumpla con las normas cuando es necesario.

Análisis de daño

La tabla de a continuación muestran en porcentaje de daño por adherencia que se observaron en las probetas luego de ser ensayadas por Tracción Indirecta, la escala propuesta en el estudio es un 0% cuando no existe daño en la probeta (0 análisis de daño cualitativo de la norma AAASHTO T283) y de un 100% cuando se encuentra

totalmente dañada por humedad (valor 5 en escala AASHTO T283).

Tabla 23: Resumen del porcentaje de Daño LNV.

Tipo de Aditivo	Probetas en condición Seca (%)	Probetas en condición Húmeda (%)
Blanco	3	30
AMA	2	5
AMT1	2	3

Se ve una gran pérdida de adherencia en las probetas sin aditivo en condiciones húmedas. Pero, no así en cuales tienen aditivo, por lo que cabe mencionar, que el aumento de daño visual es casi imperceptible, su gran diferencia radica en el tipo de daño. En el caso de muestras húmedas, el porcentaje se debe mayoritariamente a falta de adherencia, en cambio, en el otro caso, se debe por agregados fracturados. Esto se puede verificar a continuación en las siguientes fotografías:

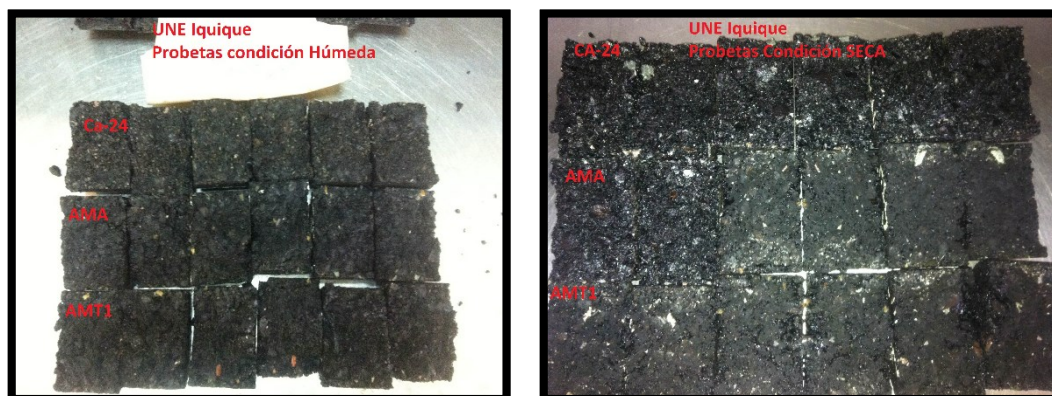


Figura 31: Fotografía de Probetas en condiciones húmedas y secas respectivamente.

De las fotografías se pueden identificar, en las muestras en condiciones secas, existen varios áridos que se encuentran fracturados, pese a esto, comparándolo con el área total de la probeta, son porcentajes pequeños, pero demuestra que la resistencia de adherencia es alta, por lo tanto, es el material el cual se ve dañado a tracción.

En las muestras en condiciones de humedad hay muchos agregados limpios, en general, las partículas de árido no alcanzan su resistencia máxima, por lo tanto, fallan

mayormente debido a falta de adherencia entre el agregado y ligante. Además, demuestra nuevamente que el análisis cualitativo está directamente ligado con los resultados determinados por medio del ensayo TSR.

4.2.4 Comparación Normas

Se comparan las diferentes normas por medio de los siguientes gráficos en función del tipo de aditivo utilizado:

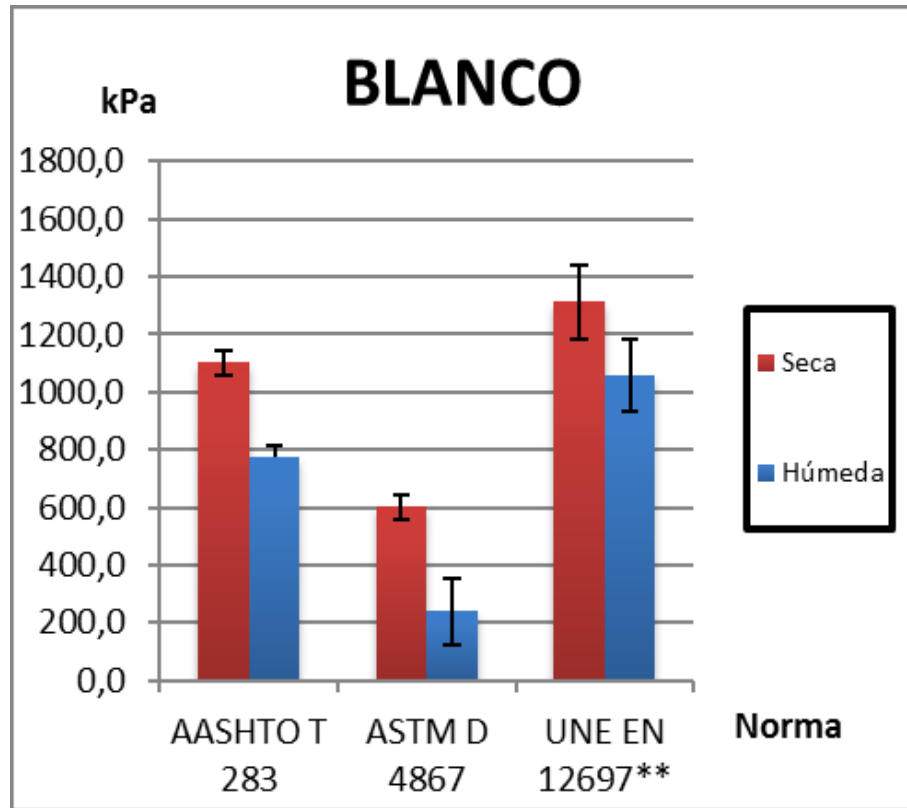


Figura 32: Resumen Normas Ensayo TSR [kPa] – Blanco.

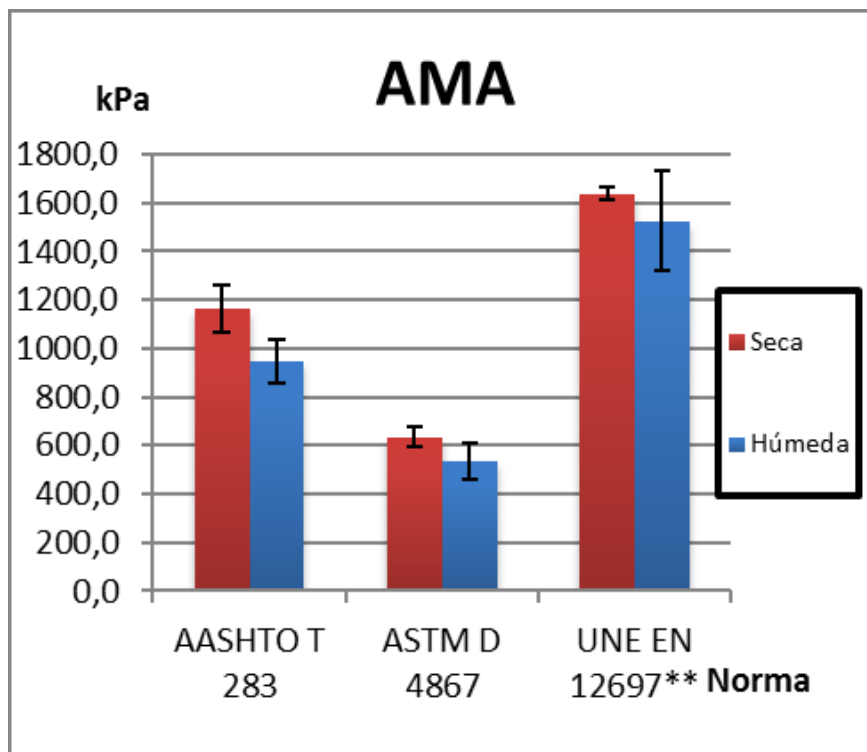


Figura 33: Resumen Normas Ensayo TSR [kPa] – AMA.

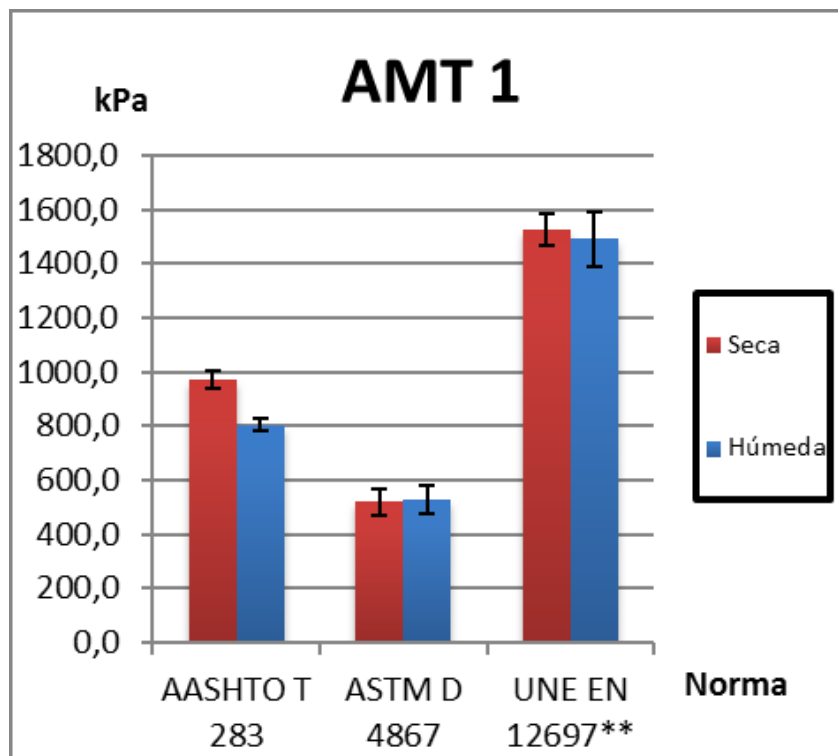


Figura 34: Resumen Normas Ensayo TSR [kPa] – AMT1.

De los resultados determinados por el ensayo de TSR, y haciendo una comparación en función de las tres normas de estudio, la metodología que muestra mayores valores de resistencia es la LNV. Por otra parte, esta norma, tiene la mejor relación entre las probetas secas y las húmedas, es decir, el daño por humedad de las muestras mediante LNV es menor en comparación de las otras (AASHTO y ASTM).

Que esta norma tenga valores superiores de resistencia se puede deber, como ya se había mencionado en Planta Maule, a la diferencia de temperatura que hay al momento de ensayar las muestras. Además, de todos los gráficos, donde siempre existe mayor susceptibilidad al daño por humedad, es en el primer gráfico, donde la mezcla se encuentra sin aditivo. En general, en el caso de Iquique, las mezclas sin aditivo no cumplen con ninguna de las normas ensayadas, por lo que se debe agregar un aditivo en todos los casos demostrados.

Analizando de manera más comparativas las normas que son ensayadas a la misma temperatura (25°C), ASTM y AASHTO, las mezclas sin aditivo presentan grandes diferencias, no solo en la capacidad de resistencia, si no que la susceptibilidad al daño por humedad de las mezclas realizadas por el método ASTM es mucho mayor que en la Norma AASHTO. Este resultado es determinante porque muestra de forma empírica que la norma que no pasa por un ciclo de hielo/deshielo tiene mayor daño. Cabe mencionar, que este resultado puede deberse principalmente al envejecimiento previo de las probetas, en donde el método AASHTO tiene un envejecimiento mucho mayor, lo cual permite que los agregados absorban el ligante, junto con ello, tener mejor adherencia.

Finalmente, se formulan dos gráficos viendo la capacidad de resistencia a la tracción de las probetas en su condición seca y húmeda que se presentan a continuación:

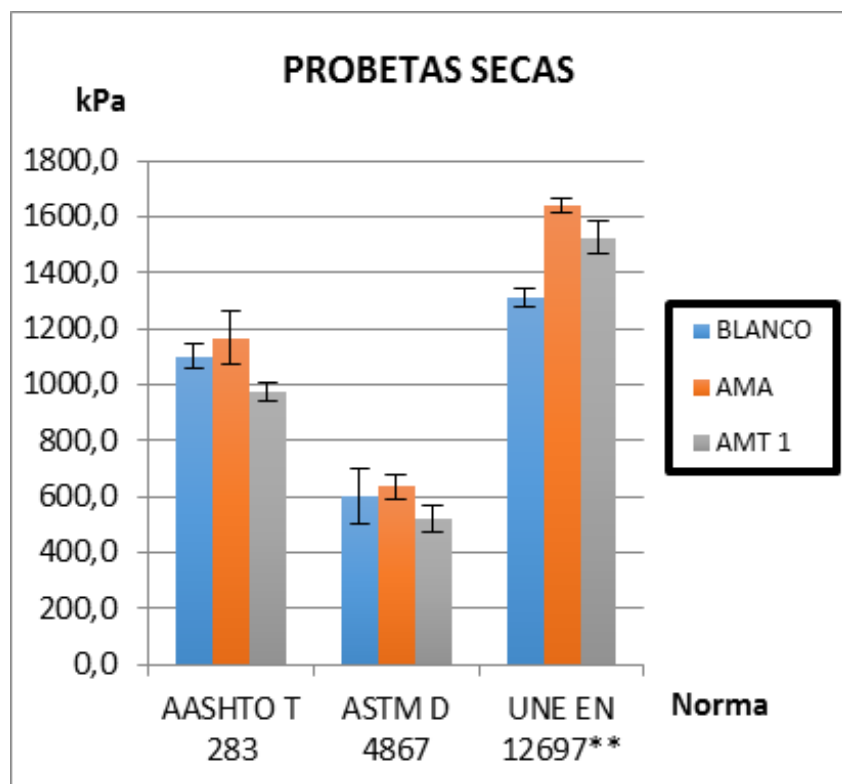


Figura 35: Gráfico ensayos TSR de Normas de probetas en condición Secas.

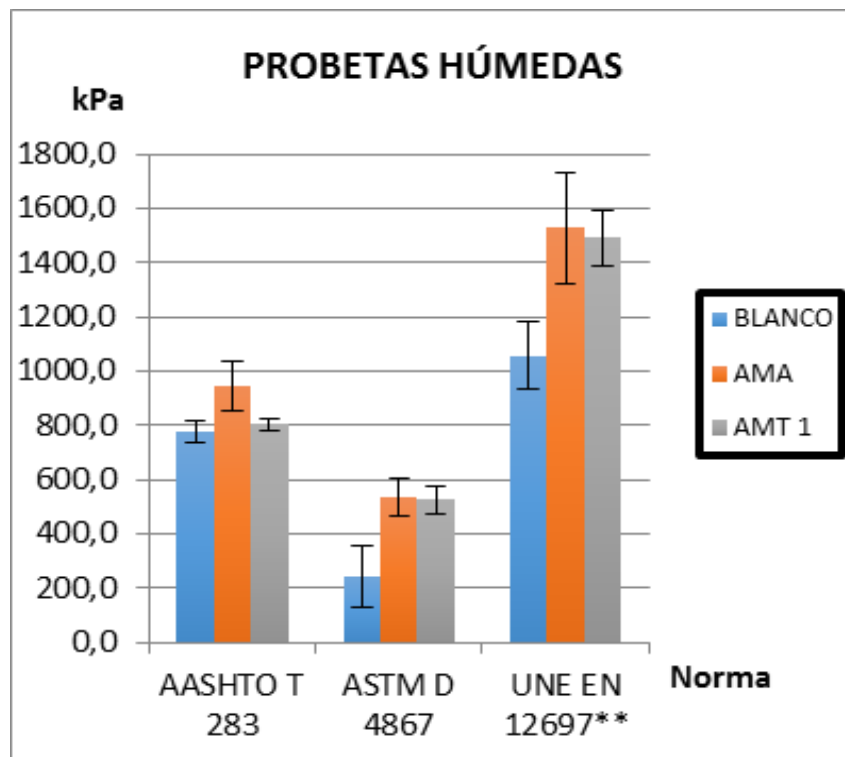


Figura 36: Gráfico ensayos TSR de Normas de probetas en condición Húmeda.

Del mismo modo que en el análisis de la Planta Maule, el aditivo AMA demuestra ser la mezcla más resistente, entregando valores de resistencia a la tracción indirecta mayor en todos los casos.

Por otra parte, la mejor relación observada a través del trabajo realizado es mayoritariamente a través del aditivo de mejoramiento de trabajabilidad (AMT1), teniendo menor susceptibilidad al daño por humedad, tanto de forma cuantitativa como cualitativa. Si a la mezcla no se le aplica un aditivo hay que tener cuidado con el cumplimiento del mínimo entregado por las normativas, dado que en la mayoría de los casos éste no cumplía con ellas.

4.3 Análisis TSR de daño por planta de árido

4.3.1 Norma AASHTO T283

En la Figura 37, se observa la relación entre la resistencia en condiciones de humedad y seca (ITS) mediante la Norma AASHTO T283. Se aprecia que toda la mezcla asfáltica acondicionada mediante el proceso de inmersión en agua existe una pérdida en su resistencia debido al daño causado por el agua, que afecta las propiedades de adhesión y cohesión en la unión entre el ligante y el árido.

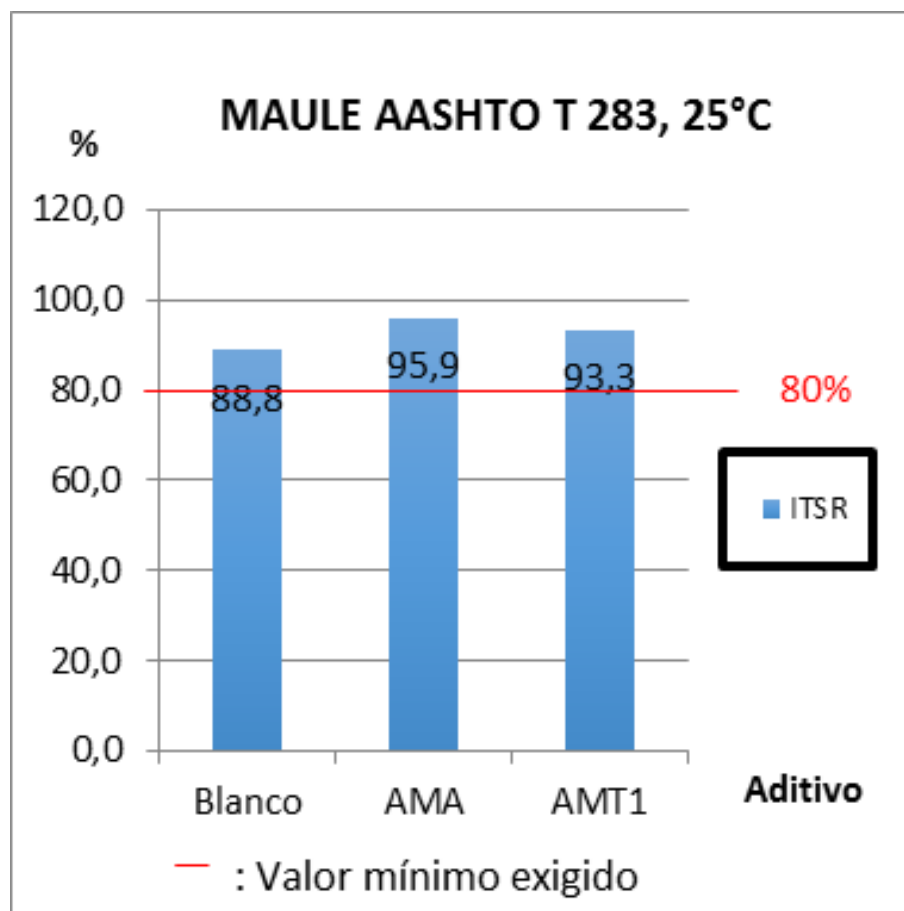


Figura 37: ITS para distintas mezclas asfálticas planta MAULE - Norma AASHTO T283.

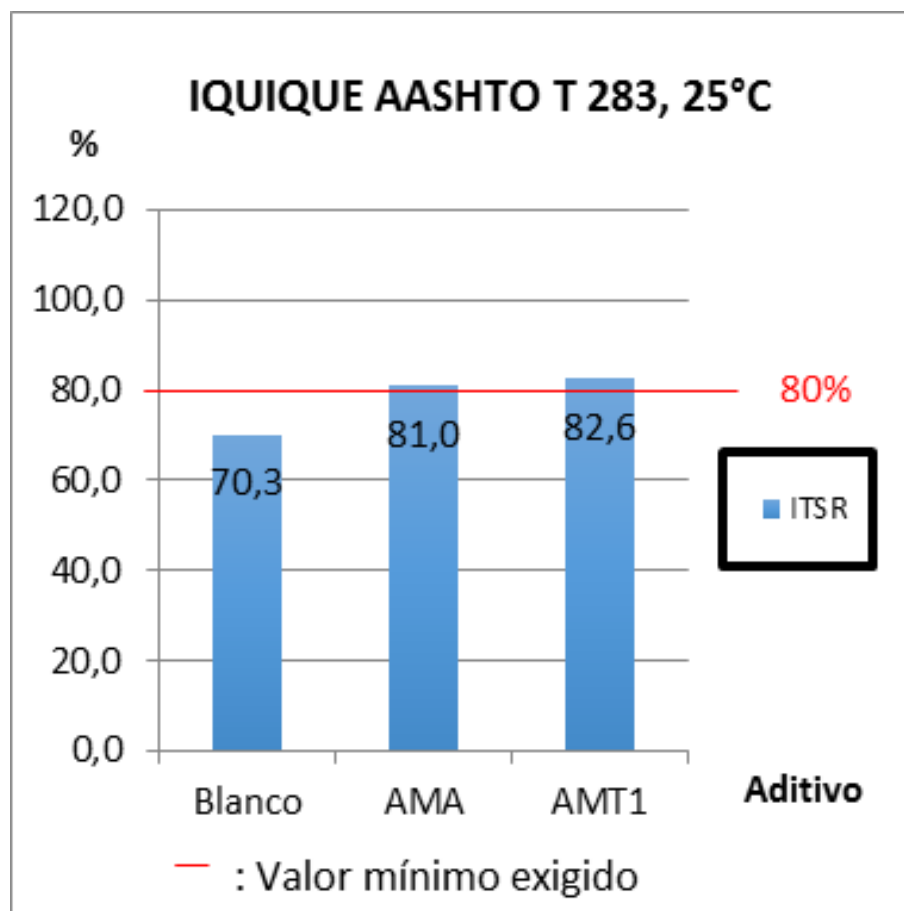


Figura 38: ITSR para distintas mezclas asfálticas planta IQUIQUE - Norma AASHTO T283.

Pese a la sensibilidad que tienen las probetas, la relación existente de los agregados provenientes de la planta en Iquique tiene mayor sensibilidad al agua, el diseño de este tiene más del 50% de la mezcla con polvo roca, lo que puede llegar a dificultar la adhesión entre la unión betún-agregado, además de ser un material poroso que se refleja en el alto porcentaje de cemento asfáltico con menor resistencia que en el caso del Maule. Sin embargo, ambos agregados son chancados, lo que otorga una buena trabazón del material dentro de la mezcla y, en la mayoría de los casos, cumplir con las exigencias de la Norma.

De los ligantes asfálticos, el que tiene mayor resistencia promedio al daño por humedad es el CA-24 más AMA, ya que este ligante se caracteriza por poseer una alta adherencia. Para el caso del cemento asfáltico convencional CA-24, se observa que presenta mayor susceptibilidad al daño por humedad, pero para el caso de los agregados

de origen fluvial (planta Maule), no existen inconvenientes ya que tienen baja sensibilidad al agua.

4.3.2 Norma ASTM D 4867

La normativa ASTM D 4867 exige un valor mínimo de ITSR del 75% con el fin de comprobar la adhesividad árido-ligante mediante la acción del agua. A continuación, se compara, al igual que en el caso anterior, la relación de resistencia en condiciones de humedad y seca (ITS).

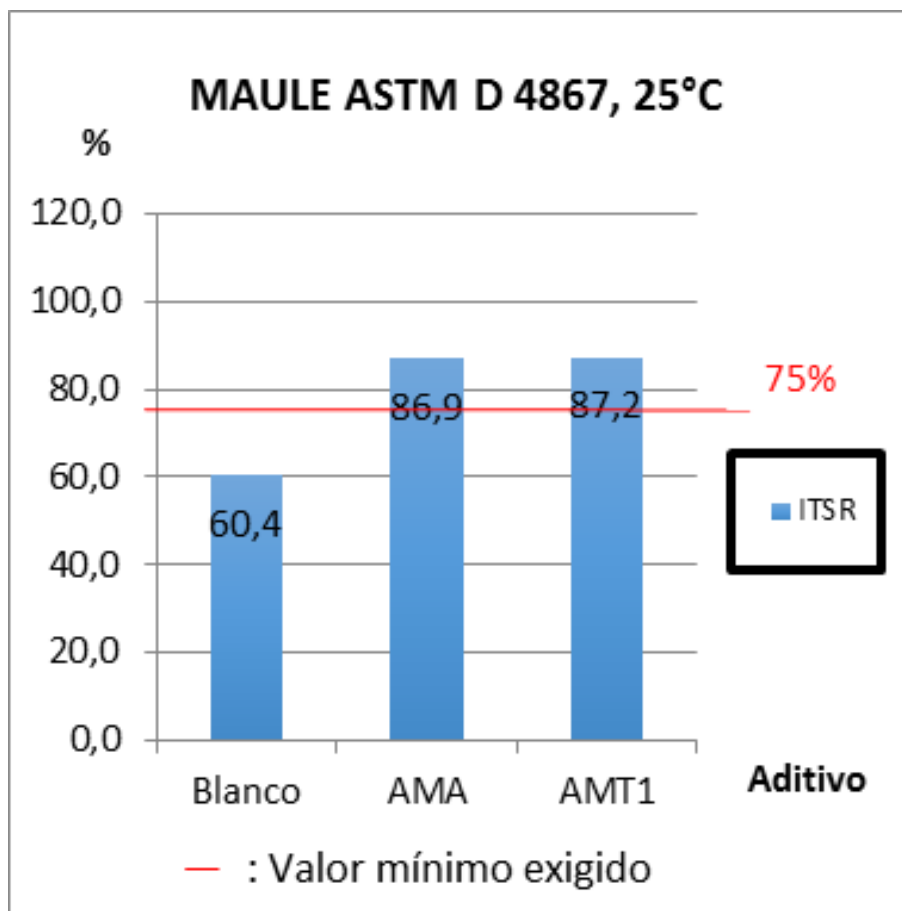


Figura 39: ITSR para distintas mezclas asfálticas planta MAULE - Norma ASTM D 4867.

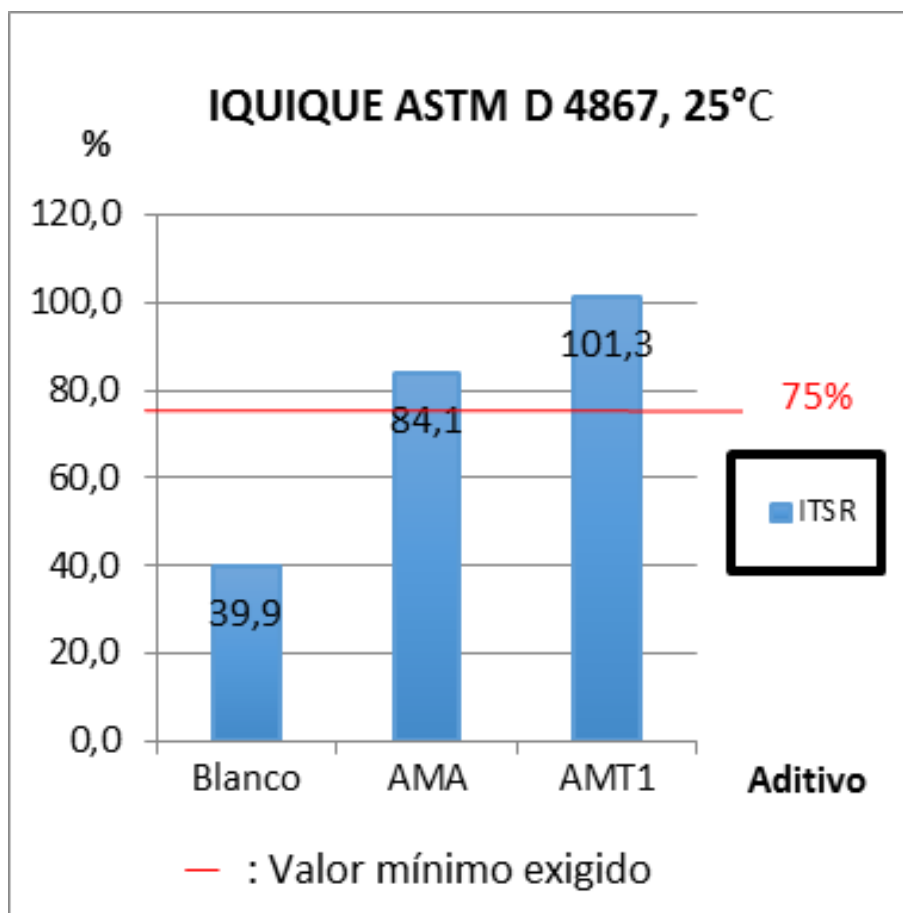


Figura 40: ITSR para distintas mezclas asfálticas planta IQUIQUE - Norma ASTM D 4867.

A partir de los ensayos realizados en laboratorio y a los resultados mostrados en las Figuras 39 y 40, las mezclas asfálticas sin aditivos no cumplen con los porcentajes exigidos por la Norma ASTM.

Se puede observar de forma clara la gran sensibilidad que tienen las mezclas convencionales en ambas plantas, lo que, implicaría que no es una mezcla aceptada y conveniente usar como capa de rodadura, ya que los porcentajes de ITSR son muy por debajo a los exigidos (60,4% y 39,9% respectivamente).

En esta ocasión las ventajas de los aditivos son cruciales para el desempeño de las probetas, disminuyendo la susceptibilidad al daño por humedad.

4.3.3 LNV

Del mismo modo que en el análisis de las otras normas, se muestra una breve comparación entre los resultados obtenidos de ambas plantas, el límite de aceptación de las muestras es de un 85%:

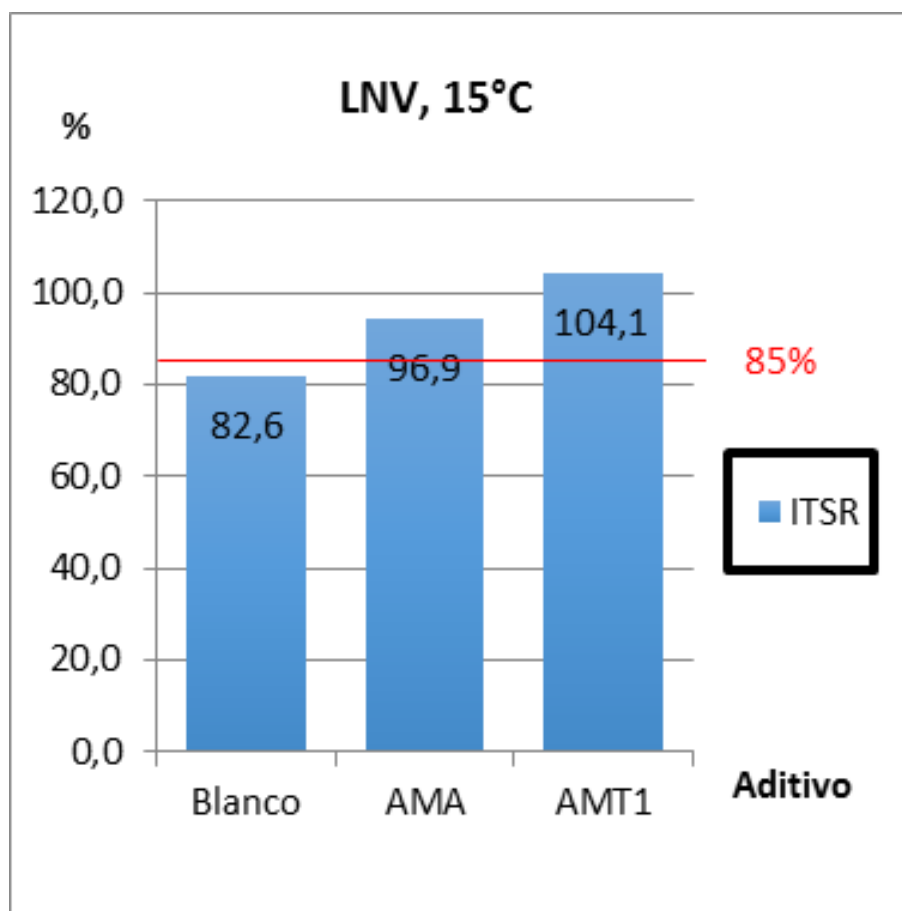


Figura 41: ITSR para distintas mezclas asfálticas planta MAULE - LNV.

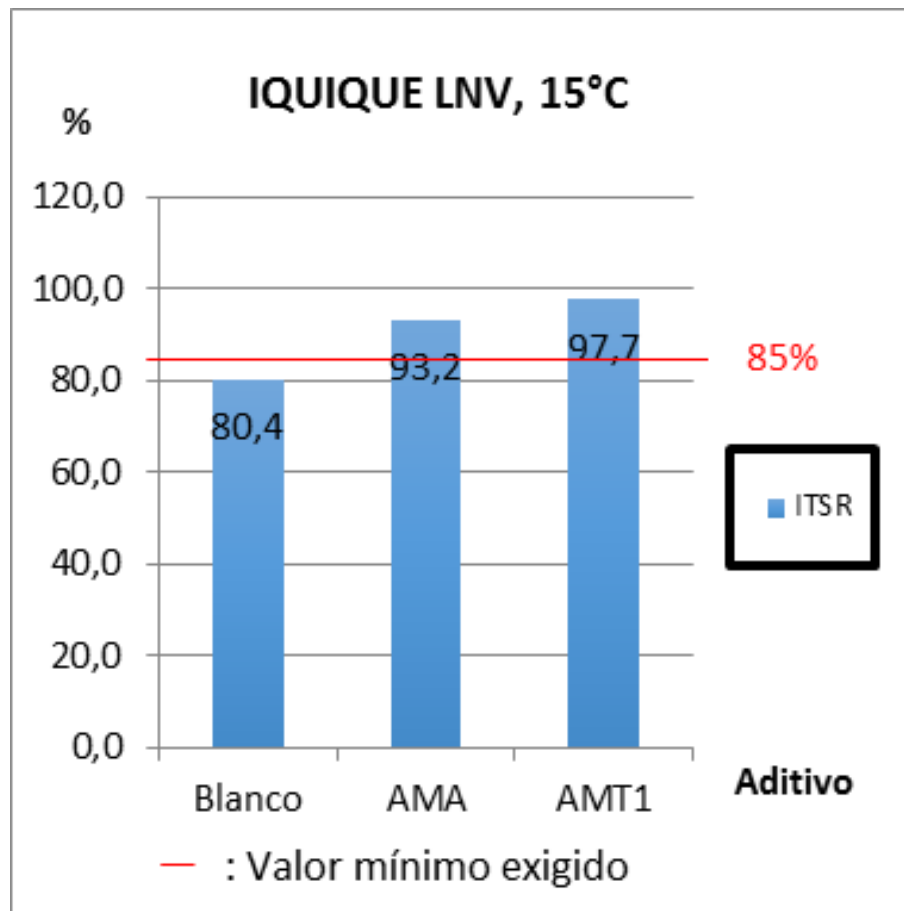


Figura 42: ITSR para distintas mezclas asfálticas planta IQUIQUE - LNV.

De los dos tipos de áridos evaluados, el que presentó menor susceptibilidad al daño por humedad es la Planta del Maule, pero aun así no se observan diferencias tan alejadas como en el caso de la Norma ASTM. Se ve una clara mejora con los aditivos, superando a creces el porcentaje de aprobación de la Norma.

4.4 Análisis Rueda de Hamburgo

El ensayo de Rueda de Hamburgo se realizó mediante el mismo diseño, materiales y cemento asfáltico convencional utilizado en los ensayos TSR, proveniente de la plata de Iquique. El ensayo fue realizado durante esta investigación para poder hacer un breve análisis entre diferentes ensayos y así, poder evidenciar la importancia de cada uno de ellos, o bien, las ventajas y desventajas existentes.

Los resultados obtenidos tras las pruebas de simulación de Hamburgo además de considerar fallas por humedad de las mezclas asfálticas también ayudan a predecir cuándo una mezcla es susceptible a las deformaciones permanentes. El gráfico de la Figura 43 resume los valores obtenidos de la planta de Iquique para mezclas convencionales:

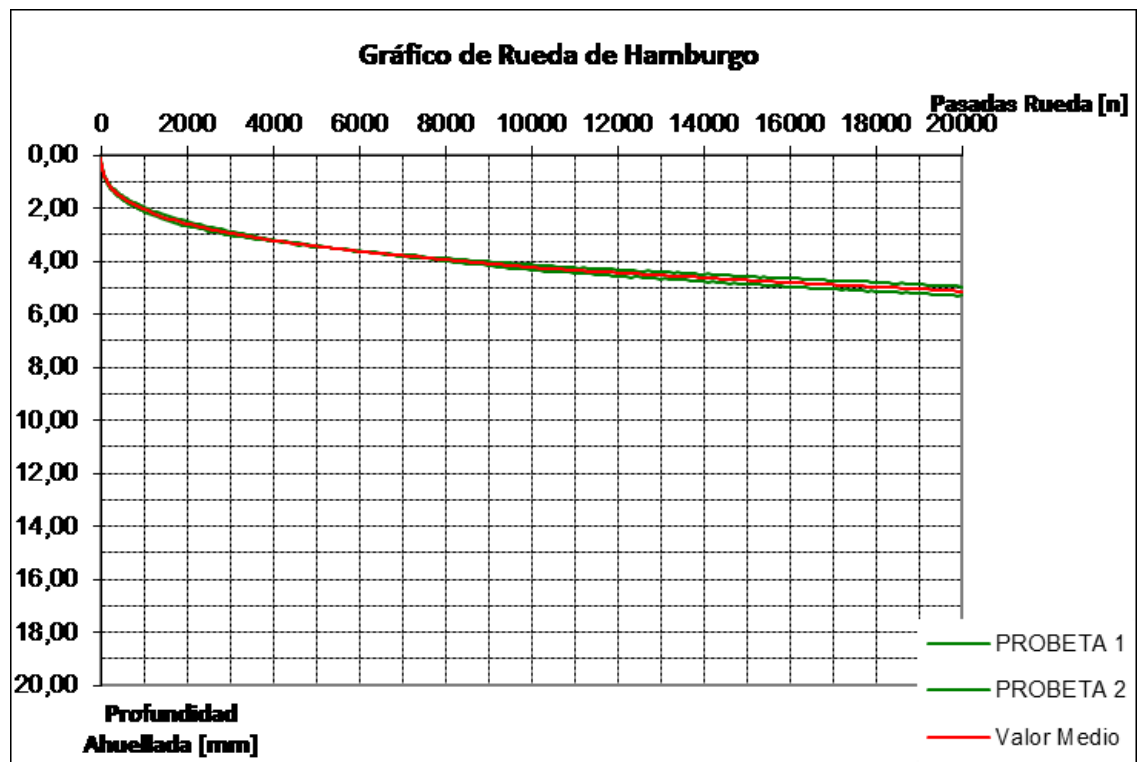


Figura 43: Gráfico resultado Rueda de Hamburgo.

Basado en resultados de Figura 43, no existe una evidencia clara de la pérdida de las características de la mezcla bituminosa debido a su susceptibilidad a la humedad.

Se obtuvo que la pendiente promedio que demuestra el stripping (*pelado*) de las muestras es muy baja, como se observa en los resultados del ensayo en la sección de anexos, de 0,17%. Esto quiere decir, que las mezclas convencionales de Iquique por medio del ensayo de rueda de Hamburgo no tienen gran susceptibilidad al daño por humedad ya que no se identificó un punto claro de inflexión que pudiese dar indicio al inicio del daño provocado por la presencia de agua.

Sin embargo, este análisis se debe complementar con un estudio visual de la probeta para ver cómo se comportó la relación directa entre el betún y agregado. En la siguiente fotografía se muestra la probeta luego de ser ensayada:



Figura 44: Fotografía de probeta luego de ser ensayada mediante rueda de Hamburgo.

De la Figura 44, no se puede apreciar a simple vista la pérdida de adherencia, pero si desprendimiento del material a comienzos de donde pasa la rueda, en donde se observan los agregados de forma dispersa en la máquina de ensaye.

4.5 Análisis ensayos de Adherencia mediante el métodos estático, dinamico y Riedel-Weber.

Los resultados entregados, con los ensayos exigidos hoy en día, como lo son los ensayos de adherencia mediante el ensayo estático, dinámico y de Riebel-Weber, se muestran en las siguientes tablas:

Tabla 24: Resumen caracterísicas de la mezcla proveniente del Maule.

Planta MAULE		
Ensayo	Característica Mezcla	Mínimo Exigido
Adherencia Método Estático	+95%	95%
Adherencia Método Dinámico	+95%	95%
Adherencia Riebel - Weber	4-9	0-5

Tabla 25: Resumen caracterísicas de la mezcla proveniente de Iquique.

Planta IQUIQUE		
Ensayo	Característica Mezcla	Mínimo Exigido
Adherencia Método Estático	+95%	95%
Adherencia Método Dinámico	+95%	95%
Adherencia Riebel - Weber	2-9	0-5

De lo anterior, se identifica que las mezclas asfálticas con cemento asfáltico CA-24 cumplen con los requisitos mínimos del Manual de Carreteras Volumen 8.

El ensayo por el método estático, es un método cualitativo, en donde se determinó que más del 95% del área del agregado no presenta desprendimiento de asfalto, que en teoría muestra que el diseño de la mezcla tiene una buena adherencia entre el agregado y el ligante. Sin embargo, esta metodología además de ser subjetiva, se hace con una muestra inmóvil, sin perturbaciones externas que faciliten el desprendimiento del ligante.

Por otro lado, el ensayo por el método dinámico, a diferencia del estático, es un ensayo principalmente para evaluar el agregado mineral, pero se utiliza también para juzgar la capacidad de adherencia de los materiales asfálticos. Se observa en los resultados, que se supera el 95% del área del agregado cubierta con una capa de ligante, lo que es considerado como “Adherencia buena”, y no existe la necesidad del uso de aditivos mejorados.

Finalmente, el método de Riedel Weber también acepta las muestras tanto de

la planta del Maule, como de Iquique. El grado de adherencia depende de la concentración de la solución que produce el despegue del agregado con el ligante; el valor 0 representa cuando el despegue de la capa de ligante sobre el agregado sea total con agua destilada y el valor 10 cuando no existe despegue total de la solución.

Si bien ambas muestras cumplen con las exigencias mínimas, la muestra proveniente de Iquique muestra una menor adherencia entre el agregado y el ligante. Esto se ve reflejado en el grado de adherencia entregado, donde la mezcla proveniente del Maule tiene un grado de adherencia de 4-9 e Iquique de 2-9, que significa que Iquique tuvo desprendimiento total con una menor concentración de solución de carbonato de sodio (Na_2CO_3). La ventaja que entrega el método de Riedel Weber es poder diferenciar grados de adherencia, lo que lo hace un ensayo más completo para análisis de datos.

DISCUSIONES

En este capítulo se discutirán diferentes factores que influyen en el ensayo TSR como lo son: agregado, aditivo, envejecimiento, temperatura de ensayo y normativas analizadas en el trabajo de investigación, en relación a su relevancia para el caso de Chile y mejorar el enfoque del ensayo. Del mismo modo, discutir la importancia de los ensayos realizados mediante tracción indirecta y rueda de Hamburgo y la relevancia del ensayo utilizado en este estudio con los exigidos hoy en día, como lo son los ensayos de adherencia mediante el método estático, dinámico y de Riedel Weber. A continuación, se detalla cada uno de los factores mencionados.

5.1 Agregado

Los agregados también cumplen un rol importante al momento de determinar la susceptibilidad al daño por humedad de las mezclas asfálticas; esta influencia se pudo verificar en los resultados obtenidos del ensayo TSR. La información determinada al analizar dos plantas de áridos de origen diferente nos dice que existe la necesidad de seleccionar cuidadosamente los materiales de pavimentación de tal forma que estos produzcan sistemas cemento asfáltico-agregado con alto grado de adhesión en estado seco y baja susceptibilidad al debilitamiento de la adherencia por acción del agua.

La complejidad que tiene la selección de los agregados es que dependen casi en su totalidad del sector en donde se esté emplazando el proyecto ya que no es económicamente rentable mover grandes cantidades de material por muchos kilómetros, por ende, siempre se trata de ubicar la planta de agregados más cercana al lugar de ejecución de la obra.

Si se cuenta con la posibilidad de elegir el agregado a utilizar, pese a la ubicación del proyecto, se deberían tomar en consideración las características de, la porosidad y la textura de la superficie del agregado. Debido a que se evidenció que las muestras provenientes de la planta de Iquique, las cuales tienen una mayor porosidad y mayor porcentaje de partículas lajeadas, entregaban mayor susceptibilidad al daño por humedad que las probetas realizadas con material de la planta del Maule, se constató la importancia de la selección de los agregados. En donde, los agregados de textura rugosa, de buena cubrición y baja porosidad dan mayor resistencia que los redondeados y de textura lisa.

5.2 Aditivo

De los resultados analizados en el capítulo anterior, se pudo comprobar la disminución de la susceptibilidad del daño por humedad de las mezclas asfálticas en caliente convencionales por medio de aditivos mejoradores. En caso de Iquique, se observó un mejoramiento de hasta el doble en donde probetas sin aditivo presentaban índices de susceptibilidad al daño de humedad en principio del 40% y logró alcanzar hasta un 84% aproximadamente por medio del aditivo AMA (por medio de la norma ASTM).

Se encuentra como tema de discusión si utilizar o no aditivos mejoradores como los estudiados en este trabajo y si son convenientes para el diseño de pavimentos. De lo determinado, se muestra de forma clara que los asfaltos convencionales pueden mejorar su resistencia y la sensibilidad al agua, modificando el ligante, lo que da origen a nuevas mezclas más estables. Sin embargo, los usos de aditivos llevan asociado un costo económico mayor, por ende, es necesario tener en consideración la envergadura del proyecto, su ubicación geográfica y finalmente considerar cuánto mejora la mezcla asfáltica.

Por ejemplo, en caso del Maule mediante AASHTO no es necesario un aditivo mejorador ya que la mezcla convencional cumple con las especificaciones de la norma, a diferencia del caso de Iquique por AASHTO, que pese a que la mezcla convencional no cumple con la normativa del 80% (siendo de un 70%).

Además, se tiene que tener cuidado con la relación entre el área superficial del agregado y el contenido óptimo de asfalto es más pronunciada cuando hay relleno mineral (también conocido como filler). El filler debe ser incorporado en una relación equilibrada, ya que los pequeños incrementos en la cantidad de relleno mineral, pueden absorber gran parte del contenido de asfalto resultando en una mezcla inestable y seca. En el caso de Iquique, el diseño tiene un alto contenido de filler, por lo que se esperaba que el resultado de esta planta diera una susceptibilidad al daño por humedad mayor.

5.3 Envejecimiento

Es uno de los factores más relevantes al momento de fabricar la muestra, la importancia principal se encuentra en el envejecimiento de la muestra en condición suelta, ya que se modificará la rigidez de la mezcla asfáltica debido a que maltenos modifican las propiedades de fluidez y ductilidad debido a la temperatura y horas de acondicionamiento, transformándose en asfaltenos, los cuales le dan más resistencia a la mezcla bituminosa. Esta modificación de la rigidez en el corto plazo se puede considerar favorable en las mezclas asfálticas ya que permite tener una mayor resistencia, pero a largo plazo el pavimento se vuelve propenso a tener fallas por falta de elasticidad y comienzas a aparecer grietas debido a la disminución de la resistencia a la oxidación. Es un proceso significativo no solo por la razón ya mencionada, sino también porque representa una muestra no totalmente nueva, si no que en condiciones más parecidas del terreno.

El envejecimiento de la norma AASHTO T-283 de 16 horas a 60°C aproximadamente fue el factor más importante para obtener los resultados vistos, ya que logró que el betún mejorara significativamente su adherencia con el agregado y así, tener las mejores relaciones entre las probetas en condiciones de humedad y en condiciones secas.

5.4 Temperatura ensayo

Se tienen dos temperaturas diferentes de ensayo, estas son de 25°C por medio de la norma AASHTO y ASTM, y de 15°C por LNV, en donde se pudo observar que los resultados muestran una diferencia pero que no se ve reflejada en la relación del daño por humedad de las mezclas asfálticas. La variación de la temperatura de ensayo se manifiesta en los valores de resistencia a la tracción indirecta, que a menor temperatura dan resultados más altos debido a que las propiedades de las mezclas asfálticas hacen que a bajas temperatura se comporte de forma más rígida. Es decir, que la temperatura de ensayo solo influye en los valores de resistencia y no así en la sensibilidad de las muestras al daño por humedad.

5.5 Normas

De las 3 normativas en estudio y del análisis realizado en el capítulo anterior, se puede ver una línea de tendencia, si bien no se obtuvieron exactamente los mismos resultados, si se encontraron resultados relativamente similares, en donde las mezclas convencionales no cumplían con las exigencias y el aditivo mejorador generaba grandes mejoras a la mezcla asfáltica.

Cabe destacar que la norma AASHTO T283 tuvo resultados que reflejaban una menor susceptibilidad al daño por humedad que las normas ASTM y LNV. La importancia de este resultado, es que aparentemente la metodología AASHTO es la norma más agresiva de las tres debido al ciclo de hielo/deshielo aplicado en el acondicionamiento de las probetas en condiciones de humedad. Sin embargo, debido a que en su procedimiento considera el envejecimiento de la mezcla previo a la compactación, el ligante adquiere mayor adherencia con el agregado, generando una menor susceptibilidad al daño por humedad en las probetas.

En el caso de las normas ASTM y LNV el ciclo de hielo/deshielo es opcional, pero generalmente no se realiza ya que se esperaría que las mezclas tuvieran valores aun mayores de daño por humedad, y eso afectaría a la aprobación de las exigencias mínimas de las normas en condiciones climáticas donde no hay ciclos frecuentes de hielo deshielo. La razón por la que el ciclo de hielo/deshielo es un factor decisivo es porque el agua, que se encuentra entre los vacíos de la probeta, al congelarse se expande, generando un efecto de tracción interna que debilita la muestra previa al ensayo de tracción indirecta.

A través de este estudio, y al tener pruebas tangibles de problemas con el diseño de las mezclas convencionales, se demuestra la necesidad de considerar aditivos mejoradores en algunos casos para así, poder mejorar el desempeño de los caminos y carreteras. Se recomienda especialmente el uso de aditivos en el sur de Chile, ya que son zonas de alta humedad ambiental y es más probable que se puedan evidenciar daños por humedad.

5.6 Ensayo TSR vs Rueda de Hamburgo

El ensayo de Rueda de Hamburgo aun no es un ensayo estandarizado en Chile. En Estados Unidos tienen especificaciones sobre ello, pero aun no se llega a un valor universal de aceptación para daño de humedad en la normativa. Se califica la falla por medio de su deformación final, donde el punto de inflexión de pérdida de adherencia es el punto en donde hay un cambio considerable en la inclinación de la curva, cuyo criterio de aceptación generalmente utilizado es que el punto de inflexión ocurra después de 10.000 ciclos.

De los resultados de ambos ensayos, se realiza la comparación entre las diferentes Normas en que se realizó el ensayo TSR y el ensayo de rueda de Hamburgo por medio de la norma UNE 12697-22 según lo entregado en el reporte de ensayo realizado por el laboratorio del centro de desarrollo e investigación de Bitumix.

Para el caso analizado del diseño de la planta de Iquique, los resultados mediante estos dos ensayos entregan resultados contrarios, en donde TSR mediante AASHTO T283 que da un 70% de susceptibilidad al daño por humedad, no cumpliendo con las especificaciones de aceptación de la norma, de un 80%, y en caso de la rueda de Hamburgo no se observa un daño debido a la humedad de forma considerable, además que cumple con las deformaciones máximas permitidas por lo tanto, la mezcla convencional utilizada sería aceptada por medio de este ensayo.

Si comparamos las muestras de los ensayos de TSR por LNV con los resultados de Rueda de Hamburgo, se tiene una relación similar al caso de AASHTO T83, en donde el TSR no cumple con las especificaciones de la Norma. Sin embargo, se encuentra solo a 5% de alcanzar el límite de aceptación, lo que hace que la Norma LNV se acerque

más a los resultados entregados por el ensayo de Rueda de Hamburgo.

Finalmente, la norma ASTM es la que tiene mayor diferencia con el ensayo rueda de Hamburgo, con resultados de un 40% de susceptibilidad al daño por humedad, quedando muy por debajo del límite permisible del 75%.

Todas estas variaciones se deben a diferentes procedimientos, como por ejemplo la temperatura de ensayo, en donde la rueda de Hamburgo se realizó a 50°C , mientras que los ensayos de TSR por medio de AASHTO y ASTM a 25°C y LNV a 15°C, el tamaño de las probetas, ya que las de TSR tienen un menor diámetro (110 mm) y la rueda de Hamburgo de 150 [mm] generando una diferencia entre los resultados que cambia la aceptación de la muestra, por lo que se debe tener en consideración las diferencias e importancias de estos ensayos. Además, mediante la norma AASHTO considera un ciclo de hielo/deshielo y un acondicionamiento de las probetas de 50°C por 24 [horas], que la rueda de Hamburgo no considera.

De ambos ensayos, se puede considerar que el ensayo de rueda de Hamburgo se relaciona de mejor forma al desempeño del pavimento en terreno con el ensayo realizado en laboratorio, ya que este simula el paso de una rueda de vehículo. Sin embargo, las ventajas que presenta el ensayo TSR, es que es un método más específico, ya que se centra solo en medir la susceptibilidad al daño por humedad de las mezclas asfálticas, y el ensayo de rueda de Hamburgo su principal foco es medir el ahuellamiento producto a los ciclos de pasadas de rueda que es un factor adicional que influye en las diferencias de los resultados.

Como el caso de este trabajo de investigación se centra en encontrar y evaluar solo la susceptibilidad al daño por humedad no se incorporó el ahuellamiento como factor adicional que se desvía el objetivo principal y se realizó el análisis de rueda de Hamburgo para poder evidenciar la diferencia entre ensayos.

5.7 Ensayo TSR vs Actualidad

Las características del diseño de mezclas asfáltica con CA-24 de las muestras de Iquique y del Maule, cumplen con las exigencias chilenas de diseño, dando cierto grado de confiabilidad en que los agregados con el ligante cumplen con requisitos mínimos de adherencia. Estos resultados son contrarios a los obtenidos por el ensayo

TSR, donde en la mayoría de los casos no cumplen con las normativas mínimas y se requeriría de un aditivo de mejoramiento.

De los resultados y análisis realizados, se tiene que los ensayos que hoy en día se requieren, como lo son el de adherencia mediante el método estático, dinámico y de Riedel Weber, para asegurar un cierto grado de adherencia entre el ligante y los agregados, no están siendo igual de efectivos en comparación de otros.

La gran desventaja de los métodos actuales, y la importancia de la investigación a través del ensayo de TSR, recae en la forma en que se realizan los ensayos, los métodos actuales consideran y ensayan las muestras en su estado suelto, es decir, las muestras no han sido compactadas, por lo que la relación que se puede formar entre los resultados en terreno con los de laboratorio son solo una aproximación, un poco lejana, a la realidad. Los ensayos mediante el método estático y de Riedel Weber no consideran el porcentaje real de cemento asfáltico del diseño, por lo tanto, el resultado determinado entrega un comportamiento que no es necesariamente el del diseño de mezcla.

Por otra parte, los métodos exigidos de adherencia no consideran la resistencia del diseño de la mezcla asfáltica, factor clave para poder asimilar las muestras de laboratorio con las características reales y así, poder llegar a resultados que entreguen información útil para poder asegurar cierta resistencia, durabilidad y desempeño en terreno. Se evidencia una falta de componentes en el método estático, dinámico y de Riedel Weber, que el ensayo de TSR si considera, como son, la compactación, porcentaje de vacíos, resistencia y presencia de humedad en muestras con características similares a las de terreno.

Finalmente, la ventaja del ensayo de TSR es que es un ensayo cuantitativo, en donde, pese a que se puede o no realizar en algunas normas la evaluación visual de las muestras, existen valores representativos que dan a conocer realmente el nivel de susceptibilidad al daño por humedad de las mezclas asfálticas, con condiciones similares a las encontradas en terreno y utilizando las proporciones del diseño.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los efectos de la humedad sobre el deterioro de los pavimentos asfálticos es un fenómeno complejo, en donde no solo involucra procesos físicos, si no también termodinámicos, químicos y mecánicos que favorecen a su deterioro. Este trabajo de investigación ha estudiado algunos de los principales mecanismos de falla asociados a la presencia de agua mediante dos ensayos utilizados hoy en día, la rueda de Hamburgo (HWTD) y el ensayo a tracción indirecta (TSR) en los áridos de dos plantas de Bitumix y tres ligantes asfálticos.

Mediante el estudio por medio del TSR, se evidencia la gran variabilidad que existe entre las distintas metodologías de ensaye, siendo un desafío el poder caracterizar y homogeneizar la determinación del daño por humedad en las mezclas asfálticas en caliente. En el caso de la norma AASHTO la susceptibilidad a la humedad en las muestras no es tan dañina como en el caso de las probetas ensayadas por medio de ASTM o LNV. Esto puede corresponder al envejecimiento de las muestras sueltas, de la norma AASHTO, previo a su compactación, en donde el agregado alcanza una mejor adherencia con el betún, que se ve reflejado en el valor elevado de resistencia a la tracción indirecta que se observaron. Existe un claro aumento en comparación de la norma ASTM que son ensayadas a la misma temperatura. Estas conclusiones se basaron en los resultados obtenidos del ensayo TSR, y se condicen con el estudio hecho por la “National Cooperative Highway Research Program” que determinan que uno de los factores más relevantes para el daño por humedad es el envejecimiento previo a la compactación (National Cooperative Highway Research Program, 2000).

La norma ASTM fue la que presentó mayor sensibilidad, con índices altos de susceptibilidad al daño por humedad en la mezcla convencional, además, gran cantidad de desprendimiento y pelado en los agregados obtenidos del análisis visual realizado. Si bien este análisis visual puede tener ciertos niveles de subjetividad, se pudo observar en las fotografías de las mezclas con CA-24, que existía una evidente diferencia con respecto a las otras Normas, donde el porcentaje estimado llegaba al 50% de daño, o 2,5 en escala AASHTO T283.

En la mezcla convencional, se observó alto daño, siendo una mezcla inestable para las condiciones de estudio, pudiendo tener problema en el desempeño de los pavimentos y disminuir su vida útil. Se comprobó que el uso de modificadores mediante aditivos mejoradores aumenta la estabilidad de las mezclas, entregando resultados aceptados por todas las normativas, disminuyendo la sensibilidad de las probetas a la humedad y junto con ello, aumenta la confiabilidad de la vida del pavimento.

Del mismo modo, en el análisis de las metodologías por planta de árido, se generó una diferencia debido a la calidad del material utilizado. Ya que, en el caso de la Planta de Iquique, al utilizar las mismas características, metodologías y ligante entrega valores más altos de sensibilidad de la mezcla al daño por humedad. Esto quiere decir, que su diseño es más propenso a tener problemas de desempeño si se ve expuesto a condiciones de humedad que en el caso del diseño en la planta del Maule.

Pese a que las muestras de Iquique tienen resultados más desfavorables, no son tan lejanos a los obtenidos por los agregados provenientes del Maule. Esto se debe, como se mostraba en las propiedades de la mezcla, que la mayoría de los áridos utilizados en ambas muestras tienen sobre el 97% de sus partículas chancadas, es decir, que otorgan una buena trabazón mecánica dentro de la mezcla.

Analizando la información obtenida a partir de los ensayos TSR y Rueda de Hamburgo de las muestras realizadas en el laboratorio, se puede concluir que el ensayo TSR es un buen acercamiento para comenzar a evaluar la susceptibilidad de daño por humedad en las mezclas asfálticas en caliente, siendo fundamental para el desarrollo de este aspecto en Chile. Pese a ello, tiene la desventaja de que no simula totalmente las condiciones encontradas en terreno, ya que este ensayo no cuenta con el factor del tráfico, que el ensayo de Rueda de Hamburgo simula de mejor forma. Por otro lado, la aplicación del ensayo TSR entrega la posibilidad de emplear esta metodología en control de fabricación de mezclas asfálticas, ya que sus resultados se traducen en características mecánicas del pavimento y un acercamiento respecto al comportamiento esperado. Además, es un ensayo sencillo de fácil aplicación que no necesita un equipo sofisticado donde en su ejecución se requiere del equipo Marshall, a diferencia de la rueda de Hamburgo, y se enfoca en solo medir el daño por humedad de las mezclas.

Sin embargo, queda aún trabajo de investigación para poder tener una visión más global de este fenómeno en Chile, como, por ejemplo, analizar el comportamiento de las muestras con aditivos mejoradores para el ensayo HWTD. Este estudio es parte de un trabajo en vías de desarrollo cuyo objetivo es poder entregar una evaluación del problema para poder, en el futuro, demostrar cuantitativamente el daño por humedad como factor a considerar para el diseño vial.

Existen varias formas para disminuir el daño por humedad en las mezclas asfálticas, y del mismo modo, en los pavimentos flexibles que son:

Selección del agregado: Como se demostró en el análisis de los resultados, la elección del árido es una variable que tiene un papel determinante en el comportamiento de la mezcla. Se tiene que tener en consideración la elección de un agregado con baja porosidad, con superficies limpias y tipo chancado. El material chancado ayuda a la trabazón de los agregados, mejorando la resistencia de la mezcla y a las propiedades de adherencia entre el betón y el árido.

Evitar la penetración de agua en el pavimento: Se debe reducir la permeabilidad de la parte estructural del pavimento, esta medida debe tenerse en consideración al momento del diseño, en donde se modifica el contenido de vacíos de aire, el espesor de las capas o la graduación que se requiere para el pavimento. Además, existe la posibilidad de utilizar tratamientos superficiales principalmente para evitar la permeabilidad en la superficie del pavimento, mediante lechada asfáltica o tratamientos superficiales de asfalto (BSTs: bituminous Surface treatments).

Aditivos mejoradores: A lo largo de la investigación se determinó la importancia que tienen los aditivos mejoradores en las características de la mezcla asfáltica, se demostró la capacidad de resistencia al daño por humedad por sobre las convencionales.

Finalmente, la importancia principal de esta investigación fue poder exponer y determinar con éxito la existencia de la susceptibilidad del daño por humedad de las mezclas asfálticas en caliente y junto con ello, demostrar el efecto del agua sobre el deterioro del pavimento, el cual es un problema que aún no está resuelto para el diseño en Chile, esto debido a la falta de entendimiento que se tiene. Una selección juiciosa de tipos de mezcla apropiados para el proyecto puede ayudar a minimizar el daño a la humedad en la estructura del pavimento. Asimismo, de una adecuada compactación y

drenaje del pavimento para asegurar que el agua que entra a las capas del pavimento sea capaz de ser expulsada antes de provocar daños en la estructura.

Recomendaciones

En los resultados están presentes dos efectos contrarios como son el daño por humedad, que debe deteriorar las condiciones de la mezcla, y el envejecimiento del betún, que, a corto plazo, mejora las propiedades mecánicas de la misma. Por este hecho, sería conveniente para futuras investigaciones aislar los efectos del envejecimiento estudiándolos separadamente en probetas densas de ligante, para así comprobar los efectos que el agua y la temperatura tienen sobre éste y poder sacar conclusiones precisas sobre lo que sucede en el conjunto de la mezcla bituminosa.

Por otro lado, se recomienda utilizar, como método de compactación de las probetas, el compactador giratorio, ya que se obtienen menores diferencias entre las muestras realizadas, y con ello, ensayos más precisos.

Otra recomendación se enfoca en el análisis visual realizado, existen programas que ayudan a hacer este análisis cualitativo un poco más exacto. Esto es por medio de un microscopio electrónico de barrido (SEM: Scanning Electron Microscope)), el cual utiliza un haz de electrones para formar la imagen. Las imágenes que produce son de gran aumento, por lo tanto, se pueden examinar las muestras con mayor precisión.

REFERENCIAS

- AASHTO T 167. (n.d.). *Compressive Strenght of Hot Mix Asphalt*.
- AASHTO T 182-84: *Standard Method of Test for Coating and Stripping of Bitumen-Aggregate Mixtures*. (n.d.).
- AASHTO T 209-12. (2015). *Standard Method of Test for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Hot Mix Asphalt*.
- AASHTO T 283-14. (2015). *Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage*.
- AASHTO T 324-4. (n.d.). *Standard Method of Test of Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted of Mix Asphalt*.
- Airey, G., Collop, A., Zoorob, S., & Elliot, R. (2007). *The influence of aggregate, filler and bitumen on asphalt mixture moisture damage. Construction and building materials. Volume 2. 2015-2014*.
- ASTM D 1074. (n.d.). *Test Method for Compressive Strength of Bituminous Mixtures*.
- ASTM D 4867-09. (2014). *Standard Test Method for Effect of Moisture on Asphalt Concrete Paving Mixtures*.
- Centro de Desarrollo e Investigación. (2006, Marzo). Retrieved from www.centro-cdi.cl
- Certificación, A. E. (2006). *Parte 12: Determinación de la sensibilidad al agua de las probetas de mezcla bituminosa*. Madrid: AENOR.
- Dirección de Vialidad. (2016). *Manual de Carreteras (Vol. 8)*.
- Gharaybeh, F. P. (1987). *Evaluation of Indirect Tensile Test for Assesing Stripping of Alabama Asphalt Concrete mixtures*. Transportation Research Board.
- Hicks, R. (1991). *NCHRP Synthesis of Highway Practice 175: Moisture Damage in Asphalt Concrete*. (N. R. Council, Ed.) Washington, DC: Transportation Research Board.
- Hveen, F. N. (1943). *Quality Tests For Asphalts- A Progress Report (Vol. 15)*. Association of Asphalt Paving Technologist.
- Instituto del Asfalto. (1992). *Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente*. Lexington.

- Interactive, P. (2011, Abril 22). Moisture Susceptibility. (P. Interactive, Producer) Retrieved from www.pavementinteractive.org.*
- Kennedy, T. (1982). Operational and Performance Characteristics of Drum Mix Plants. Federal Highway Administration, Report No. FHWA-TS-83-202.*
- Kiggundu, R. F. (1988). Stripping in HMA mixtures: state-of-the-art and critical review of the test methods. Auburn University. Alabama: National center of Asphalt Technology,.*
- National Cooperative Highway Research Program. (2000). Compatibility of a Test for Moisture-Induced Damage with Superpave Volumetric Mix Design. Reno, Nevada, United States of America.*
- Nicholson, V. (1932). Adhesion tension in asphalt pavements, its significance and methods applicable in its determination.*
- Nieto, J. (2010). Criterios de Valorización de capas asfálticas y resistencia al ahuellamiento. universidad Tecnológica Nacional, centro de investigación vial.*
- Root, D. T. (1984). Use of Antistripping Additives in Asphaltic Concrete Mixtures. Transportation Research Board, NCHRP Report 174.*
- Santucci, L. (n.d.). Moisture Sensitivity Of Asphalt Pavements. (P. R. Center, Ed.) Technology Transfer Program, 8.*
- Spinel, S. C. (2010, Febrero 25). Evaluación de la Susceptibilidad al daño por humedad de mezclas asfálticas empleando propiedades termodinámicas. 95-97.*
- Stuart, K. (1986). Evaluation of Procedures Used to Predict Moisture Damage in Asphalt Mixtures. Resport FHWA/RD -86/091.*
- Tesoriere, G. (1990). Thermic Effects for Rupture Tests at Indirect Tensile test on Asphalt Concrete. (pp. 320-328). Budapest: Proceedings of the Fourth International Symposium Held by RILEM.*
- UNE-EN12697-12. (2006). Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en Caliente. Parte 12: Determinación de la sensibilidad al agua de las probetas de mezcla bituminosa. Madrid, España: AENOR: Asociación Española de Normalización y Certificación.*
- UNE-EN12697-22. (2008). Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en Caliente. Parte 22: Ensayo de Rodadura. Madrid, España: AENOR: Asociación Española de Normalización y Certificación.*

UNE-EN12697-23. (2006). Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en Caliente. Parte 23: Determinación de la resistencia a la tracción indirecta de probetas bituminosas.

Vial, D. d. (2015). Red Vial: Dimensionamiento y características. Santiago, Chile: Ministerio de Obras Públicas.

Yildirim, Y., & Thomas Kennedy. (2001). Correlation of Field performance to Hamburg wheel tracking device results. Texas, USA: University of Texas at Austin.

ANEXOS

REPORTES ENSAYO RUEDA CARGADA EQUIPO HAMBURGO				
Descripción	Comparación con TSR AASHTO-			
Número de Ensayo	H 039			
Nombre Operador	Laboratorista	Pedro Quezada		
Fecha	16 de diciembre de 2016	Densidad Marshall ref. [g/cm ³]:	2366	
METODO DE ENSAYO				
Descripción / Norma	Adaptación de Probetas de Compactador Giratorio (PCG) y EN 12697-22			
Medio de Acondicionamiento	Agua			
Temperatura Aire [°C]	50,14	Temperatura Baño de agua [°C]	50,21	
Tiempo de Acondicionamiento [hrs]	2,5			
Rueda	☒	Acero Inoxidable (Ø 203,5 x 47)		
	☐	Acero Inoxidable con Superficie de Caucho (Ø 203,5 x 47 mm)		
Carga [N]	700			
Información Complementaria	Con CA-24 Batch 1757 -Envejecimiento 4 horas temperatura de compactacion			
PROBETA 1				
Descripción	PCG2017			
No. de Registro en Base de Datos	PCG2017			
Identificación	PCG2017			
Origen / Fabricación / Compactación	I+D/ CDI / GIRATORIA		Nº Giros	25
Ligante Asfáltico	CA-24			
Contenido Asfalto [%]	5,7			
Dimensiones L x Ø x H [mm]	240	150	63,5	
Densidad [g/cm ³]	2304,5			
Compactación ref. D. Marshall [%]	97			
Información Complementaria				
PROBETA 2				
Descripción	PCG2018			
No. de Registro en Base de Datos	PCG2018			
Identificación	PCG2018			
Origen / Fabricación / Compactación	I+D/ CDI / GIRATORIA		Nº Giros	25
Ligante Asfáltico	CA-24			
Contenido Asfalto [%]	5,7			
Dimensiones L x Ø x H [mm]	240	150	63,15	
Densidad [g/cm ³]	2294,5			
Compactación ref. D. Marshall [%]	97,0			
Información Complementaria				
RESULTADOS DEL ENSAYO	PROBETA	Ahuellamiento [mm]	Porcentaje Deformación [%]	
10.000 PASADAS	PCG2017	4,13 mm	6,50 [%] ref espesor	
	PCG2018	4,35 mm	6,89 [%] ref espesor	
	PROMEDIO	4,24 mm	6,70 [%] ref espesor	
	EXIGENCIA	mm	[%] ref espesor	
20.000 PASADAS	PCG2017	4,96 mm	7,81 [%] ref espesor	
	PCG2018	5,30 mm	8,39 [%] ref espesor	
	PROMEDIO	5,13 mm	8,10 [%] ref espesor	
	EXIGENCIA	mm	10,00 [%] ref espesor	
PENDIENTE DEFORMACIÓN	PCG2017	PCG2018	PROMEDIO	EXIGENCIA
WTS AGUA (d_{2.000} - d_{1.000})/1	0,58	0,69	0,64	[mm ³ /1.000 ciclos]
WTS AGUA ((d_{5.000} - d_{2.500})/2,5)	0,268	0,38	0,32	[mm ³ /1.000 ciclos]
WTS AGUA ((d_{10.000} - d_{5.000})/5)	0,166	0,17	0,17	1,50 [mm ³ /1.000 ciclos]