



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

ESTUDIO EXPERIMENTAL SOBRE MÉTODOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO EN MEZCLAS DE PAVIMENTOS RECICLADOS CON ASFALTO ESPUMADO

RUBÉN FERNANDO PANIAGUA RODRÍGUEZ

Tesis para optar al grado de
Magíster en Ciencias de la Ingeniería

Profesor Supervisor:
GUILLERMO THENOUX ZEBALLOS.

Santiago de Chile, Diciembre de 2013

© 2013, Rubén Fernando Paniagua Rodríguez



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

ESTUDIO EXPERIMENTAL SOBRE MÉTODOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO EN MEZCLAS DE PAVIMENTOS RECICLADOS CON ASFALTO ESPUMADO.

RUBÉN FERNANDO PANIAGUA RODRÍGUEZ

Tesis presentada a la Comisión integrada por los profesores:

GUILLERMO THENOUX ZEBALLOS.

JAVIER EDUARDO CASTRO SEPÚLVEDA.

ÁLVARO GONZÁLEZ VACCAREZZA.

SERGIO ENRIQUE GUTIÉRREZ CID.

Para completar las exigencias del grado de
Magíster en Ciencias de la Ingeniería

Santiago de Chile, Diciembre de 2013

A Dios y la Virgen, a mi familia de cuna, Papá Rubén y Mamá Lulú, a mis hermanos y amigos, a mi nueva familia, esposa y futuro hijo Lucas.

AGRADECIMIENTOS

A todas aquellas personas, que de alguna manera participaron y estuvieron vinculadas durante todo el transcurso de esta investigación y estadía en Chile, especialmente:

Profesor Guillermo Thenoux, por el incentivo y la motivación en buscar la mejor ingeniería desde la academia y la investigación, priorizando la ética y la excelencia.

Álvaro González, por abrirme las puertas a este proyecto de investigación, además de su acompañamiento como supervisor y su gran aporte como persona e investigador.

Al personal encargado del Laboratorio de Materiales, especialmente a Patricio Pinilla por la predisposición al trabajo arduo de mezclar y ensayar, además de su amistad.

A los compañeros y funcionarios del Departamento de Ingeniería y Gestión en la Construcción de la PUC, por el tiempo, esfuerzo y cariño compartido.

Al Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico mediante el proyecto de iniciación de investigación FONDECYT N° 11110139.

A mi esposa Guadalupe por el acompañamiento constante desde lejos, así como cerca, con tanto cariño.

ARRB Group Australia, Laboratorio Nacional de Vialidad, Empresas Quilín y Asfaltos Chilenos.

INDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
INDICE DE TABLAS	vii
INDICE DE FIGURAS.....	viii
RESUMEN.....	xii
ABSTRACT.....	xiii
1. INTRODUCCION	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. La rehabilitación de pavimentos	2
1.2.1. Alternativas de Rehabilitación aplicados en Chile	3
1.3. Reciclado en Frio con Asfalto Espumado (AE).....	5
1.4. Necesidad de Investigación.....	7
1.5. Hipótesis.....	9
1.6. Objetivos	9
1.6.1. Objetivo principal	9
1.6.2. Objetivos específicos	9
1.7. Estructura de la Tesis	10
2. REVISIÓN DE LA LITERATURA Y TEORIA	12
2.1. Técnica de Reciclado en frio de pavimentos asfálticos con AE	12
2.2. Mediciones de laboratorio.....	13
2.3. Diseño de Mezclas	14
2.3.1. Propósito del diseño de mezclas	16
2.3.2. Clasificación de los materiales.....	16

2.4.	Pruebas Mecánicas en Laboratorio	25
2.4.1.	Ensayos Tradicionales	25
2.4.2.	Ensayos Complementarios	29
2.4.3.	Pruebas a escala real y acelerada	36
2.5.	Resumen de los efectos del contenido AE en ensayos mecánicos	37
2.6.	Características generales de los materiales reciclados con AE	38
2.7.	Análisis de Tensiones de Pavimento	42
2.8.	Modelo Teórico	43
3.	MATERIALES Y METODOS DE LABORATORIO	48
3.1.	Introducción	48
3.2.	Diseño Experimental	49
3.2.1.	Factorial de Diseño en Laboratorio	50
3.3.	Obtención y selección de materiales	51
3.3.1.	Agregados	51
3.3.2.	Cemento asfáltico y capacidad de espumación	55
3.3.3.	Filler activo (Cemento)	58
3.3.4.	Materiales del Norte de Chile	58
3.4.	Preparación de Probetas	59
3.4.1.	Proceso de mezclado	59
3.4.2.	Proceso de Compactación	60
3.4.3.	Proceso de Curado	61
3.5.	Ensayos para la determinación de propiedades mecánicas	61
3.5.1.	Ensayos Tradicionales	61
3.5.2.	Ensayos Complementarios	64
4.	ANALISIS DE RESULTADOS	74
4.1.	Ensayos Mecánicos	74
4.1.1.	Ensayos Tradicionales (ITS-UCS)	74
4.1.2.	Ensayos Complementarios (MR-CD-ITFS- ITMS)	88
4.1.3.	Análisis estadístico de los resultados en ensayos mecánicos	99

5.	DISCUSION	101
5.1.	Discusión sobre resultados de laboratorio.....	101
5.1.1.	Ensayos Tradicionales	101
5.1.2.	Ensayos Complementarios.....	107
5.1.3.	Análisis según tendencias y variabilidad dado por el asfalto.....	112
5.1.4.	Análisis del aporte de los ensayos mecánicos realizados	114
5.2.	Discusión sobre el estado del arte y la práctica.....	116
5.3.	Discusión sobre interpretación de ensayos	121
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	123
	BIBLIOGRAFIA	128
	A N E X O S	131
	ANEXO A: Discusión sobre la contextualización laboratorio-solicitaciones en terreno	132
	ANEXO B Visita a Terreno	135
	ANEXO C: Resultados ensayo de tracción indirecta (ITS)	142
	ANEXO D: Resultados ensayo de compresión simple no confinada (UCS).....	144
	ANEXO E: Resultados ensayo de módulo resiliente triaxial (MrTx).....	145
	ANEXO F: Resultados ensayo de corte directo (CD).....	148
	ANEXO G: Resultados ensayo de rigidez o módulo elástico por tracción indirecta (ITMS)	151
	ANEXO H: Resumen y tendencias de resultados	152
	ANEXO I: Propuesta de diseño de mezclas.....	154

INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2-1: Valores mínimos recomendados (Wirtgen, 2012).....	21
Tabla 2-2: Resumen de los efectos del incremento del contenido de AE con un porcentaje de filler activo constante.....	38
Tabla 3-1 Matriz factorial de estudio en laboratorio.....	50
Tabla 3-2: Granulometría obtenida (RAP) y adoptada para Laboratorio	52
Tabla 3-3: Densidades máximas secas y humedades optimas s/granulometrías.....	55
Tabla 3-4: Datos del cemento asfáltico	55
Tabla 3-5: Caracterización de la espumabilidad del asfalto utilizado.....	56
Tabla 3-6: Valores obtenidos en la caracterización del cemento asfáltico y recomendaciones	57
Tabla 3-7: Detalle de probetas según el tipo de ensayo	60
Tabla 4-1: Resultados de ensayos ITS según Granulometría y %AE	76
Tabla 4-2: Resultados de ensayos ITS en mezclas “solo AE” según Granulometría y %AE	81
Tabla 4-3: Resultados ITS/Diseño de mezclas con materiales del Norte Chile.....	82
Tabla 4-4: Resultados de ensayos UCS s/Granulometría y %AE.....	87
Tabla 4-5: Resultados de ensayos CD s/Granulometría y %AE.....	93
Tabla 4-6: Resultados de ensayos CD s/Granulometría y %AE.....	95
Tabla 4-7: Resultados de Ensayos ITFS. Granulometría B, secas.....	96
Tabla 4-8: Resultados de ensayos ITMS en mezclas con Granulometría B	98
Tabla 4-9: Resultados promedio del análisis de varianza de los ensayos	100
Tabla 5-1: Resumen de ensayos ejecutados y recomendación respecto a la sensibilización según el contenido de AE, rango de valores y calificación según la variabilidad del ensayo.....	115
Tabla 5-2: Resumen s/propiedad mecánica evaluada en los ensayos de laboratorio	115
Tabla 5-3: Clasificación TG2-2002, según ensayos UCS e ITS.....	116

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1-1: Fotografía del tren de reciclado utilizado en el primer proyecto de rehabilitación en Chile. Thenoux et al, 2003	2
Figura 1-2: Representación del deterioro del pavimento. Chamorro et al, 2011	3
Figura 1-3: Técnicas de reciclado en pavimentos de Chile. Esquema del enfoque de la Investigación con AE.	5
Figura 1-4: Protocolo de ingeniería para el reciclado de pavimentos y cuestionamiento al método de diseño de mezclas en Chile.	5
Figura 1-5: (a) Recicladora de pavimento asfáltico (b) Ilustración de fresado/mezcla del material reciclado. (c) Puntas del tambor fresador. Adaptación Manual Wirtgen 2004....	6
Figura 1-6: Ensayo ITS (a) Esquema del ensayo (b) Gráficos típicos de resultados	8
Figura 2-1: Tren de reciclado. Elaboración Propia	12
Figura 2-2: Flujo del proceso de diseño de mezclas. Asphalt Academy, 2009	15
Figura 2-3: Banda granulométrica recomendada para mezclas con AE. Asphalt Academy, 2009	17
Figura 2-4: Distribuciones de puntos de AE en caras de probetas fracturas en diferentes tipos de mezclas: (a) satisfactoria, (b) problemas alta humedad, (c) problemas alto contenido de filler, (d) deficiente contenido de filler. Fu et al, 2009.....	18
Figura 2-5: Ensayos ITS, ensayados en estado fresco (24hs). Halles et al, 2010	20
Figura 2-6: Proceso de generación del AE (a) Cámara de expansión o generación de AE (b) Burbuja o película delgada de asfalto.....	22
Figura 2-7: Representación del aumento de volumen producido por la espumación del Asfalto (Wirtgen, 2012)	23
Figura 2-8: Decaimiento asintótico del AE. Jenkins, 2000.....	24
Figura 2-9: Representación de ensayos ITS y UCS. Elaboración Propia	25
Figura 2-10: (a) Clasificación de materiales según categoría del material	26
Figura 2-11: (a) Representación de la distribución de tensiones en los ensayos ITS y ecuación para la obtención del valor	27

Figura 2-12: Resultados ITS, con y sin filler activo. Halles et al, 2010	28
Figura 2-13: Representación de la prueba triaxial y variantes en el tipo de carga axial aplicada	30
Figura 2-14: Representación del “número de flujo”.	31
Figura 2-15: M_R medidos en ensayo con diferentes contenidos de AE y cemento. Long y Ventura, 2004.....	33
Figura 2-16: Representación de la microestructura de material reciclado con AE.	35
Figura 2-17: Esquema de representación del ensayo y resultado en las pruebas con mezclas MLTx	35
Figura 2-18: (a) Resultados preliminares en ensayos de deformación permanente (b) Deformación dada en tramos de prueba a escala real	37
Figura 2-19: Matriz de conceptualización, uso del AE en relación a otros materiales para pavimentos. Theyse et al, 2004.....	39
Figura 2-20: Esquema Conceptual de microestructura. Halles et. al, 2012	41
Figura 2-21: Influencia del AE en las propiedades mecánicas. Jenkins et al, 2007	42
Figura 2-22: Representación de tensiones y pulso de carga por el paso del tránsito en un punto. Garnica et al, 2002	43
Figura 2-23: Modelo teórico de esfuerzos relacionados entre ensayos de laboratorio y solicitaciones en la estructura del pavimento.....	45
Figura 2-24: Calculo de la cohesión por el ensayo monotónico triaxial.....	47
Figura 2-25: (a) Esquema de la prueba de corte directo (b) Zona a investigar y obtención del valor de cohesión.....	47
Figura 3-1: Representación del reciclado profundo de un pavimento asfáltico adoptado, con espesores y densidades respectivas. CIIV, 2010; Wirtgen, 2004.....	49
Figura 3-2: (a) Pavimento Asfáltico deteriorado (b) Acopio del RAP fresado.....	51
Figura 3-3: Granulometrías de Referencia: faja TG2 recomendada, curva RAP y 3 curvas a fabricar	53
Figura 3-4: Acopio de RAP y áridos, separados por tamaños	54
Figura 3-5: Generación de Asfalto Espumado en laboratorio.....	57

Figura 3-6: Curva granulométrica para el diseño de mezclas del Norte de Chile.....	58
Figura 3-7: Generación de Mezclas con AE	59
Figura 3-8: Representación de tensiones en el ensayo ITS y modo real de falla.....	62
Figura 3-9: Esquema de aplicación de carga en el ensayo UCS y modo de falla	63
Figura 3-10: Representación ensayo M_R y cámara triaxial de ensayo	65
Figura 3-11: Ecuación representativa para obtención del M_R y concepto gráfico del módulo de resiliencia	65
Figura 3-12: Grafico típico de resultados M_R y rango considerado para la obtención de un valor M_R promediado.....	67
Figura 3-13: Representación del ensayo de corte directo con el plano de falla y dispositivo o caja de corte con probeta ensayada.....	69
Figura 3-14: Material retenido y pasante en la malla 9.52 mm	69
Figura 3-15: Esquema y disposición real del ensayos ITFS	71
Figura 3-16: Ensayo ITSM (a) Identificación de partes del equipo de medición (b) Disposición del ensayo.....	73
Figura 4-1: Resultados (a) ITS secos (b) ITS saturados	75
Figura 4-2: Gráfico de Resultados ITS secos y saturados según cada granulometría	76
Figura 4-3: Valores de energía s/ Granulometría y %AE. (a) Secos y (b) Saturados	78
Figura 4-4: Densidades de probetas secas según granulometrías	79
Figura 4-6 ITS Mezcla A, B y C, “solo AE”	80
Figura 4-7: Gráfico de resultados ITS en mezclas “solo AE” secos y saturados según cada granulometría	81
Figura 4-8: Resumen resultados ITS diseño norte Chile	83
Figura 4-9: Diseño con materiales del norte Chile/energía disipada	83
Figura 4-10: Valores de densidades obtenidas en probetas ITS	84
Figura 4-11: Valores UCS s/ Granulometría y % AE. (a) Secos y (b) Saturados.....	85
Figura 4-12: Valores de Energía. (a) Secos y (b) Saturados	86
Figura 4-13: Gráfico de resultados UCS secos y saturados según cada granulometría ...	87
Figura 4-14: Promedio de valores M_R y θ . (a) Secas (b) Saturadas	88

Figura 4-15: Gráfico de resultados M_R vs. Theta θ ($3\sigma_0 + \sigma_d$) secos y saturados en las 3 Granulometrías	90
Figura 4-16: Promedio de valores CD: (a) Secas y (b) Saturadas.....	91
Figura 4-17: Gráfico de resultados CD secos y saturados según cada granulometría	93
Figura 4-18: Valores de CD en mezclas “solo AE”. Secos y Saturados.....	94
Figura 4-19: Gráfico de resultados CD secos y saturados según cada granulometría	95
Figura 4-20: Tendencias de valores ITFT. Granulometría B/Secos	97
Figura 4-21: Tendencia de resultados en el ensayo ITMS. Granulometría B.....	98
Figura 5-1: Resumen de resultados ITS y energía disipada. Granulometría B.....	102
Figura 5-2: Tendencias de resultados ITS para mezclas (a) con asfalto y cemento y (b) “solo Asfalto”	103
Figura 5-3: Datos en la prueba ITS, mezclas con: ambos estabilizadores combinados, “solo Cemento” y “solo AE”.	104
Figura 5-4: Resultados en la prueba ITS en mezclas con materiales del norte de Chile (a) Valores ITS, (b) Energía disipada.....	105
Figura 5-5: Resumen de resultados UCS, energía/UCS vs contenido de AE	106
Figura 5-6: Resumen de resultados Corte Directo para la Granulometría B: (a) mezclas solo Asfalto y (b) mezclas con Cemento y Asfalto.....	108
Figura 5-7: Resultados de Ensayos ITS (a) y CD (b), mezclas, “solo AE”	109
Figura 5-8: Material proyecto en el Norte de Chile. Representación de mastic	110
Figura 5-9: Módulo Resiliente promedio de los tres tipos de mezclas	111
Figura 5-10: Resultado de ensayo ITFS para la Granulometría B	112
Figura 5-11: Tendencias de resultados según “resistencia referencial” en cada ensayo mecánico para las tres granulometrías en condición seca	113
Figura 5-12: Matriz de resultados UCS-ITS que clasifica al material.	117
Figura 5-13: Representaciones de los puntos de análisis de tensiones según la fase del material reciclado con AE.....	118
Figura 5-14: Carga en la estructura del pavimento e interpretación de esfuerzos mediante ensayos mecánicos	122

RESUMEN

En Chile, el método de diseño de mezclas para materiales reciclados (pavimentos flexibles) con Asfalto Espumado (AE) se realiza mediante el ensayo mecánico de Tracción Indirecta (ITS). Se ha observado que en la práctica este método entrega tendencias poco claras, haciendo difícil definir el contenido óptimo de AE en estos materiales. Esta investigación de laboratorio buscó caracterizar mecánicamente las mezclas con AE bajo distintos modos de carga y deformación, con el objetivo de determinar bajo que condición mecánica el contenido de AE afecta de mayor manera al desempeño de estos materiales. Además de una revisión de la literatura, se trabajó en laboratorio llevándose a cabo ensayos tradicionales (ITS-Tracción Indirecta y UCS-Compresión Simple) y ensayos complementarios (MrTx-Módulo Resiliente, CD-Corte Directo, ITFS-Fatiga y ITMS-Rigidez), cuyos resultados fueron analizados y discutidos. Los resultados obtenidos en los ensayos tradicionales demostraron ser pocos precisos en la determinación de contenidos óptimos de AE. Sin embargo, se observó que estas pruebas sí son capaces de evaluar otras propiedades mecánicas que identifican mejor a los distintos contenidos de asfalto.

Los ensayos complementarios definieron mejores tendencias dado por una mejor sensibilización en sus resultados ante los distintos contenidos de AE, en comparación con los tradicionales, en especial aquellas pruebas que someten al material a cargas repetidas bajo deformación controlada (ITFS e ITMS). El ensayo de CD no estandarizado para este tipo de materiales, midió únicamente esfuerzos de cizalla (cohesión) en la matriz fina de estas mezclas. Se concluye que la actual metodología dosificación dado por los ensayos tradicionales debe redefinirse o complementarse.

Palabras Claves: Pavimento Reciclado, Asfalto Espumado, Diseño de Mezclas, Ensayos Tradicionales, Ensayos Complementarios.

ABSTRACT

Cold in place recycling (CIPR) of asphalt pavements using foamed bitumen is a construction technique that recycles existing distressed flexible pavement, simultaneously adding stabilizing agents to improve the properties of the reclaimed material. In Chile, The method for selecting the amount of asphalt for the foamed bitumen mix (FAM) uses, as a main criterion, the indirect tensile strength test results. The main purpose of this research was to do a mechanical characterization of the foamed bitumen mixes under different types of mechanical solicitations (loads and deformations), this with the objective to know which kind of solicitation was more sensible due to different bitumen contents. The different mechanical solicitations were characterized as traditional test methods (Unconfined Compressive Strength (UCS) and Indirect Tensile Strength (ITS) and non-traditional (Repeated Load Triaxial Test (MrTx), Direct Shear Strength Test (CD), Indirect Tensile Fatigue Test (ITFS) and Indirect Tensile Modulus (ITMS). The results, for the set of traditional test methods, showed not to be very sensible to the bitumen content, however, they were capable to asset the mechanical material characteristics.

In the other hand non-traditional tests, especially those that uses repeated loads and controlled deformations (ITFS and ITMS), were more sensible to the bitumen content and their trends were more defined, compared to the traditional tests. The CD is not standardized for this kind of materials and it measured shear stress in the fine matrix of the mix (cohesion). As a main conclusion, the mix design methodology based on the traditional tests must be either redefined or supplemented with another material property.

Keywords: Cold In Place Recycling, Foamed Bitumen, Design Methodology, Traditional Test Methods

1. INTRODUCCION

1.1. Antecedentes

El crecimiento económico y social en Latinoamérica hace necesario que la gestión y acción sobre la infraestructura acompañe este desarrollo en todas las disciplinas. En el rubro de la construcción este crecimiento también se hace evidente, considérese además que la filosofía de sustentabilidad va dejando de ser un concepto sólo teórico, incorporándose cada vez más en los proyectos de infraestructura. En el caso de los caminos, y debido mayormente al aumento acelerado del parque vehicular, la demanda en infraestructura vial se enfoca en tres necesidades principalmente:

- Mantenimiento, rehabilitación y reconstrucción de los caminos existentes
- Pavimentación de más kilómetros de caminos no pavimentados
- Mejoramiento en la capacidad y nivel de servicio de los caminos existentes.

Cualquiera sea el tipo de camino, siempre estos estarán expuestos a un deterioro. Esta investigación en particular se enfoca en el primer punto mencionado anteriormente, específicamente en el deterioro en pavimentos asfálticos, siendo varias las posibles intervenciones para rehabilitar o mejorar las condiciones de los mismos.

El reciclado in-situ en frío con asfalto espumado (AE) y filler activo (FA) es una alternativa como técnica de rehabilitación de pavimentos es aceptada en Chile y en otros países. Sin embargo, las propiedades mecánicas de los materiales reciclados aún siguen siendo motivo de discusión, especialmente a nivel laboratorio y la relación que pueda darse con su desempeño en terreno.

El primer proyecto de reciclado en frío con AE en Chile fue ejecutado en el año 2002 (Thenoux, et al. 2003) y actualmente se ejecutan del orden de 100 kilómetros de reciclado al año, principalmente en el Norte del país (Figura 1-1). La técnica fue calificada como una buena alternativa de rehabilitación ante la presencia de pavimentos

deteriorados y/o envejecidos bajo ciertas características de proyecto (Thenoux et al, 2003).

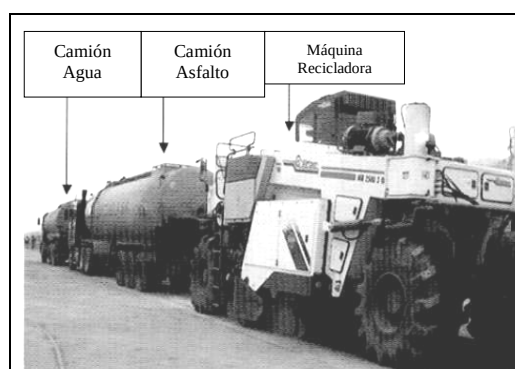


Figura 1-1: Fotografía del tren de reciclado utilizado en el primer proyecto de rehabilitación en Chile. Thenoux et al, 2003

Al igual que cualquier proyecto vial, las metodologías normalmente utilizadas para evaluar características en estos materiales se realizan a través de ensayos mecánicos de laboratorio. En Chile, para rehabilitaciones con AE típicamente se ejecuta la prueba mecánica de laboratorio de Tracción Indirecta (ITS: Indirect Tensile Strength), aplicando una carga de compresión a una probeta cilíndrica estandarizada hasta la rotura, sobre la cual se supone un comportamiento lineal elástico de cuyo cálculo se obtiene el valor ITS. Además de este ensayo tradicional, varios otros ensayos pueden caracterizar mecánicamente a estos materiales, como por ejemplo aquellos de compresión simple, cargas axiales y triaxiales, entre otros. Esta investigación desarrolla una serie de ensayos, algunos denominados tradicionales y otros complementarios o no tradicionales. Se comparan ambos grupos, verificando cuál de estos pueden optimizar de mejor forma el contenido del AE.

1.2. La rehabilitación de pavimentos

La rehabilitación se define según aquellos tratamientos que aplicados buscan mejorar la capacidad estructural del pavimento, sean de asfalto u hormigón. Típicamente el estado

de un pavimento se representa según su condición estructural o funcional en función de la aplicación de carga (tránsito) o edad (tiempo) del mismo (Figura 1-2). El deterioro del pavimento se expresa por el decaimiento de la curva y cuya condición original busca ser recuperada con acciones de rehabilitación.

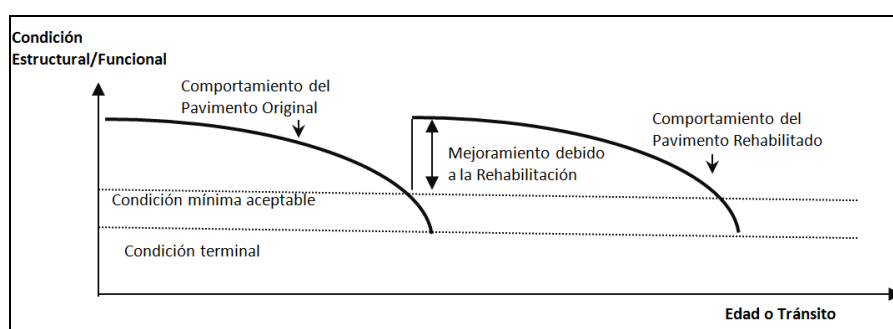


Figura 1-2: Representación del deterioro del pavimento. Chamorro et al, 2011

1.2.1. Alternativas de Rehabilitación aplicados en Chile

Las acciones de rehabilitación comúnmente desarrolladas en Chile, se detallan a continuación (Thenoux et al, 2007):

- a) **Recapado asfáltico:** consiste generalmente en aplicar una nueva capa de concreto asfáltico en la parte superior de la calzada existente. El nuevo material asfáltico proporciona una resistencia adicional a la sección estructural de la calzada y una superficie nueva de rodado. Antes que la capa nueva sea colocada, es necesario sellar las grietas, reparar baches y los defectos del pavimento. Si el pavimento presenta graves deformaciones o ahuellamientos, es necesario colocar una capa de nivelación para eliminarlas. En general, esta técnica eleva la cota de superficie y requiere nuevas construcciones laterales (bermas, drenajes, etc.).
- b) **Reconstrucción:** consiste en la sustitución del pavimento deteriorado existente, incluyendo capas granulares, por una nueva estructura de pavimento. El pavimento existente debe ser demolido, retirado y llevado a botaderos. Una vez que se completa la

demolición, cada capa del pavimento se reconstruye y en general se busca obtener una calidad de conducción excelente y la restauración o mejoramiento de la capacidad estructural del pavimento. Típicamente esta técnica no modifica la elevación del pavimento existente, sin embargo se deben llevar a cabo obras laterales.

c) Reciclado de pavimentos asfálticos en frío in-situ (con AE): se busca recuperar el 100% del material del pavimento existente, con el objetivo de formar una nueva capa de pavimento. Esto se consigue mediante la pulverización de las capas deterioradas (concreto asfáltico y capas granulares) y la adición de AE, filler activo (cemento y/o cal) con el equipo de reciclaje (CSIR, 2002). Una vez que el pavimento se recicla y compacta, se coloca una mezcla asfáltica en caliente (HMA) o capa asfáltica tipo tratamiento superficial sobre la capa reciclada. Si bien el reciclado puede realizarse en planta o in-situ, los trabajos en Chile normalmente se ejecutan in-situ.

d) Reciclado de pavimentos de hormigón mediante trituración – fracturación (Rubblizing): La técnica de Rubblizing se aplica en pavimentos de hormigón y se define por un efecto combinado de trituración y fracturación de la losa del pavimento de hormigón existente en todo su espesor, para convertir está en una base granular de excelente calidad (trozos angulares y entrelazados). La técnica aplica una carga dinámica concentrada, de baja amplitud y alta frecuencia que va triturando el pavimento de hormigón.

La Figura 1-3 muestra las dos técnicas de rehabilitación aplicados en Chile que reciclan el material existente, y ubica la investigación. Normalmente el protocolo de ingeniería (Figura 1-4) está definido en 5 etapas (en general), donde la justificación sobre el uso de estos materiales según sus capacidades mecánicas empieza en el diseño de mezclas en laboratorio, cuyo objetivo es identificar contenidos óptimos de los estabilizadores y conocer sus propiedades mecánicas.

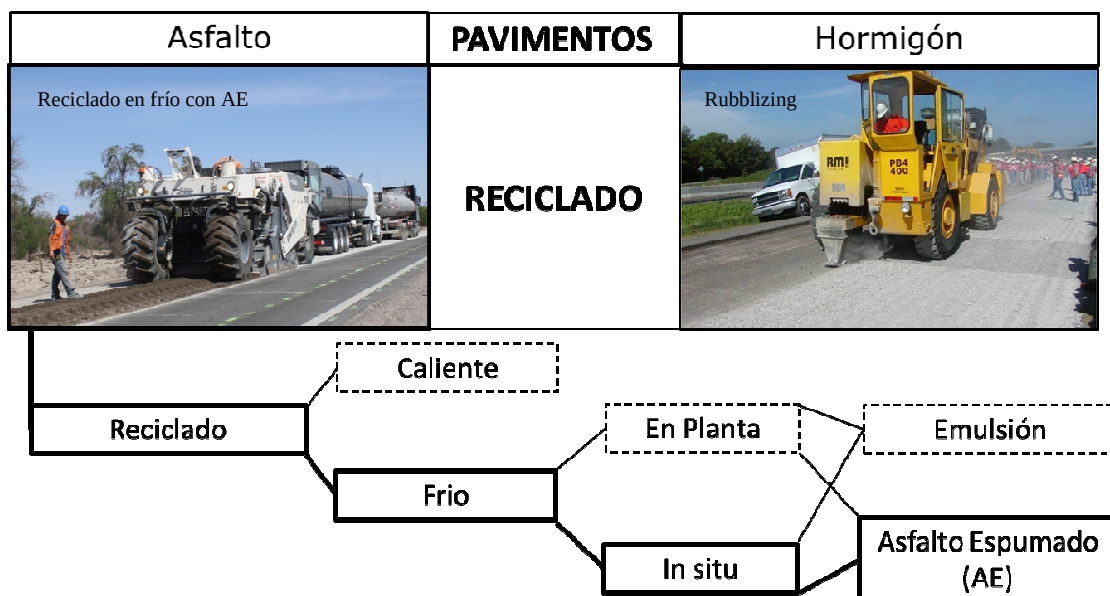


Figura 1-3: Técnicas de reciclado en pavimentos de Chile. Esquema del enfoque de la Investigación con AE.

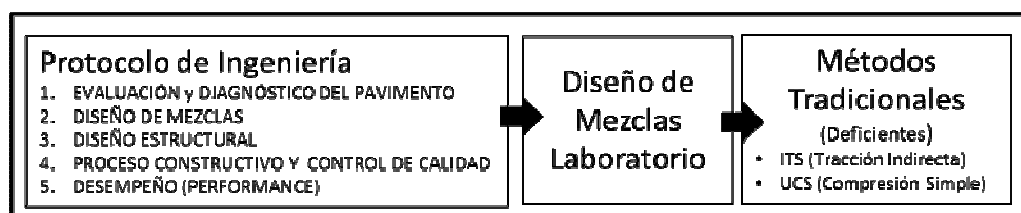


Figura 1-4: Protocolo de ingeniería para el reciclado de pavimentos y cuestionamiento al método de diseño de mezclas en Chile.

1.3. Reciclado en Frio con Asfalto Espumado (AE)

El reciclado en frio in-situ de pavimentos asfálticos con AE, es una técnica de construcción que reutiliza el material del pavimento flexible deteriorado, mediante la adición simultánea de agentes estabilizadores que mejoran las propiedades del material recuperado (Csanyi, 1957).

El reciclado con AE se lleva a cabo en terreno (o en planta), utilizando la máquina de reciclaje (Figura 1-5a) que se conecta a camiones que suministran agua (temperatura ambiente) y asfalto (temperatura de 160-180 °C). El AE y filler activo (ejemplo:

cemento o cal) se añaden para mejorar las propiedades mecánicas del material recuperado, además de agua que modifica el contenido de humedad y logra mayores densidades durante la compactación.

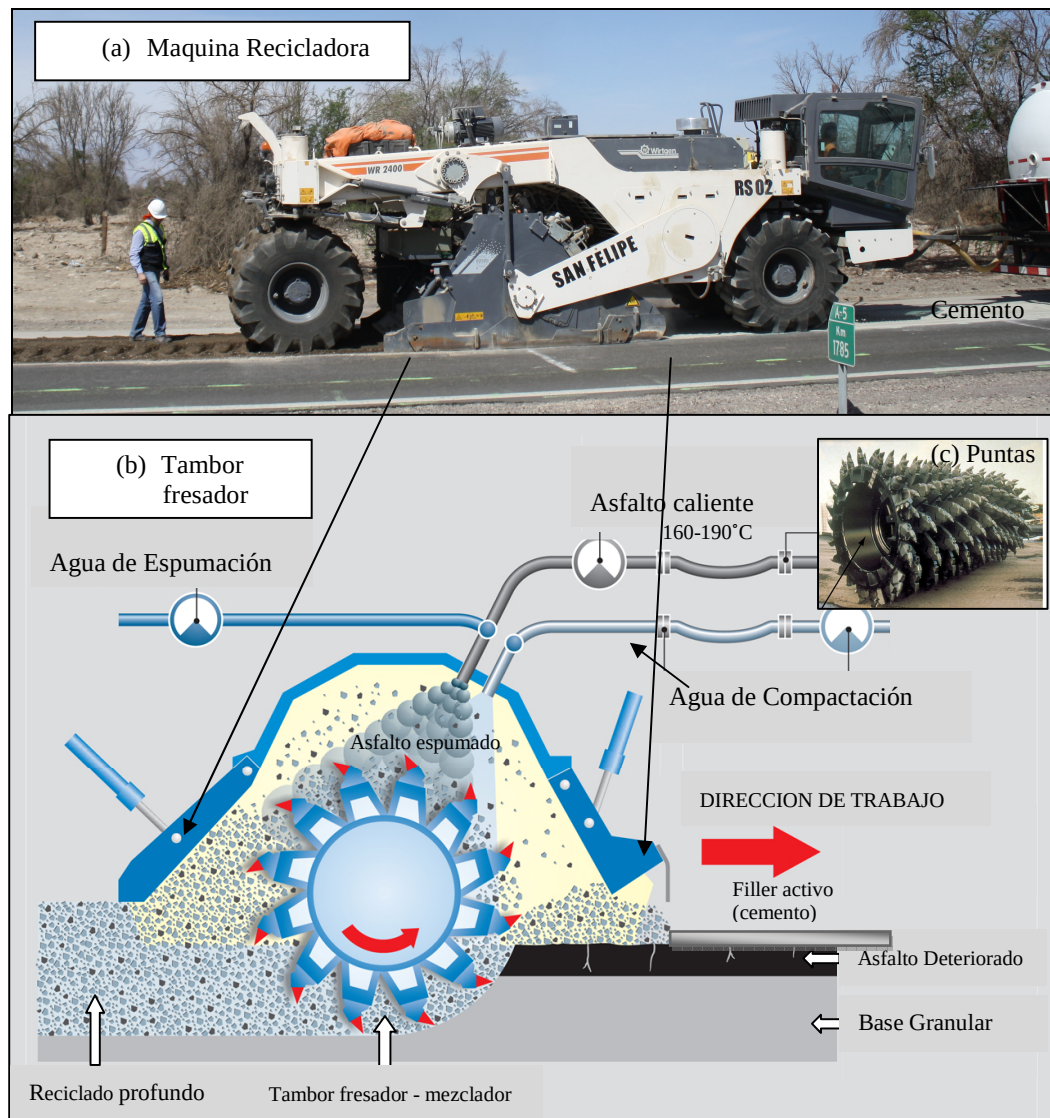


Figura 1-5: (a) Recicladora de pavimento asfáltico (b) Ilustración de fresado/mezcla del material reciclado. (c) Puntas del tambor fresador.
Adaptación Manual Wirtgen 2004

La técnica se llama en "frío" porque no calienta el material tratado antes de reciclar, consumiendo menos energía en comparación a otros métodos (Csanyi, 1957). Los

elementos o partes claves de la máquina de reciclaje son la cámara de mezclado (Figura 1-5b) que contiene el tambor fresador que pulveriza el pavimento flexible y el sistema de inyección que añade AE y agua. El filler activo es añadido manualmente en Chile. En la cámara, el material pulverizado se mezcla con el AE, agua y filler activo en una sola pasada del equipo, produciendo una capa reciclada que inmediatamente es conformada y compactada (Wirtgen, 2012).

El primer proyecto de reciclado en frío con AE en Chile fue ejecutado en el año 2002 y 2003. La técnica fue calificada como una buena alternativa de rehabilitación ante la presencia de pavimentos deteriorados y/o envejecidos (Thenoux et al, 2003). La principal metodología para el diseño de mezclas está definida en el Manual de Carreteras de Chile 2012 (MOP-Chile, 2012), la cual propone el ensayo de laboratorio ITS (Indirect Tensile Strength) para determinar la resistencia de las mezclas y determinar el contenido óptimo de asfalto.

1.4. Necesidad de Investigación

Siendo el ensayo de Tracción Indirecta (ITS: Indirect Tensile Strength) la prueba mecánica utilizada en el diseño de mezclas en Chile, este no entrega una tendencia clara o no muestra claramente el efecto o el beneficio de aplicar AE, por lo que su aplicación debe mejorarse o complementarse con otras pruebas. Ejemplo de esto se muestra en la Figura 1-6b, con resultados de ensayos ITS reales en un mismo material reciclado y con distintos contenidos de AE.

Es típico que en el diseño tradicional con ITS se obtenga tendencias con curvas planas o con valores cuya dispersión genera incertidumbre al diseñador, es decir, los resultados ITS obtenidos no demuestran tendencias claras o no aportan un grado de confiabilidad sobre “el óptimo contenido (dosificación) de AE”, pudiendo esto repercutir no solamente en costos de construcción (sobredimensionando o sub-dimensionando), sino además en el comportamiento del mismo pavimento a lo largo del ciclo de vida.

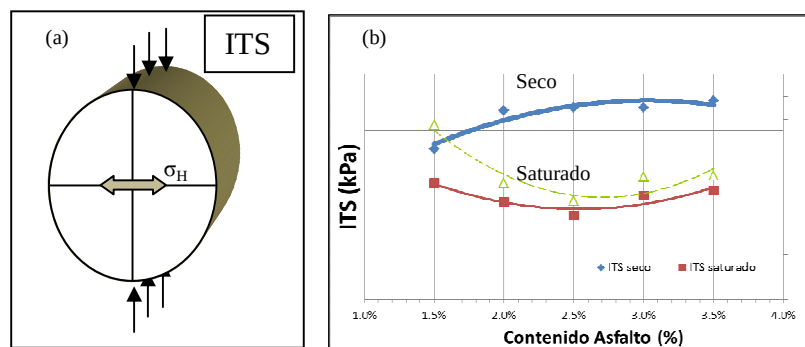


Figura 1-6: Ensayo ITS (a) Esquema del ensayo (b) Gráficos típicos de resultados

El ensayo ITS es simple de realizar, pero la distribución de tensiones interna es compleja. Esta observación se da en ambas condiciones de ensayos (secas y saturadas). La falta de sensibilización en los ensayos de laboratorio también es mencionada en otras investigaciones (Long et al, 2004; Jenkins et al, 2007; Fu et al, 2009). Similarmente al ensayo ITS, pero poco utilizado en Chile, el ensayo de Compresión Simple (UCS: Unconfined Compressive Strength) es también un ensayo que evalúa a las mezclas con AE. Recomendaciones sobre ambos ensayos mencionan que estos deben seguir ejecutándose, puesto que ayudan a detectar otros factores que pueden definir ciertas propiedades mecánicas en estos materiales, pero no necesariamente sensibilizan en los contenidos de AE en estas mezclas recicladas.

Es una necesidad complementar los ensayos tradicionales (ITS y UCS) o utilizarlos adecuadamente, especialmente ante la adición y combinación de los estabilizadores. Esta investigación desarrolla los ensayos tradicionales mencionados y otros ensayos que se denominan complementarios, buscando mejorar el diseño de mezclas actualmente utilizado, con resultados que puedan obtenerse de pruebas mecánicas más confiables o cuyos criterios de decisión se basen en identificar más eficientemente los contenidos de AE en las mezclas tratadas con materiales reciclados de pavimentos asfálticos.

1.5. Hipótesis

En base a los antecedentes expuestos en este documento se propuso la siguiente hipótesis:

Existen ensayos mecánicos que son más sensibles al contenido de AE que los utilizados tradicionalmente, por lo que se puede mejorar la confiabilidad del diseño de mezclas a través de complementar el método con alguno o todos de los siguientes ensayos: Módulo Resiliente, Corte Directo, Fatiga y Rigidez por Tracción Indirecta.

1.6. Objetivos

1.6.1. Objetivo principal

Incorporar nuevos ensayos que podrían ser utilizados en el diseño de mezclas espumadas que complementen los ensayos tradicionales y permitan determinar con mayor confiabilidad el contenido óptimo de asfalto.

1.6.2. Objetivos específicos

Considerando el objetivo principal, se definen los siguientes objetivos específicos:

- a) Medir el efecto (sensibilización) del contenido de asfalto en los ensayos de laboratorio tradicionales (ITS y UCS), utilizando muestras representativas del reciclado profundo de pavimentos asfálticos locales.
- b) Contrastar los ensayos tradicionales con la ejecución de ensayos complementarios (Módulo Resiliente- M_R , Corte Directo-CD, Rigidez-ITMS y Fatiga-ITFS por Tracción Indirecta).
- c) Basados en el trabajo de laboratorio, proponer mejoras al método de dosificación actual, que sensibilice ante distintos contenidos de los estabilizadores.

1.7. Estructura de la Tesis

El informe de tesis se estructura en 6 capítulos:

Este **Primer Capítulo** describe el contexto sobre la rehabilitación de caminos, incluyendo el reciclado con AE y el enfoque sobre la problemática actual de la metodología de diseño de mezclas en Chile para estos materiales. Se menciona la necesidad de investigar y mejorar el actual método, además se define la hipótesis y los objetivos.

El **Segundo Capítulo** presenta una revisión y discusión del estado del arte, recolectando antecedentes y conocimiento en estos materiales según investigaciones en laboratorio y terreno. Se concluye que los estudios en laboratorio actualmente no necesariamente reflejan el buen desempeño que estos materiales puedan tener en terreno, y se discute sobre la necesidad de seguir investigando según otros estudios. También se incorpora una sección denominada Modelación Teórica, que justifica la aplicación de los ensayos mecánicos no tradicionales a utilizar y su relación con solicitaciones del pavimento.

En el **Tercer Capítulo** se detalla el estudio experimental, incluyendo la descripción de los materiales utilizados y el detalle de los métodos de laboratorio utilizados, así como la caracterización del material recuperado y la capacidad de generar espuma del cemento asfáltico utilizado. Se menciona las normas y metodologías de los ensayos realizados, clasificados en tradicionales y complementarios.

El **Cuarto Capítulo** presenta los resultados obtenidos en los ensayos, con sus valores, análisis estadístico y gráficos de tendencias, además de tendencias dadas en aquellos ensayos que utilizan probetas con asfalto o con cemento de manera independiente, buscando entender mejor el comportamiento de los estabilizadores “solo AE” y “solo Cemento” en las mezclas. Se concluye que los ensayos tradicionales ayudan a definir ciertas propiedades mecánicas, pero no reconocen claramente los contenidos de AE que permitan optimizar su contenido según las propiedades mecánicas, sin embargo los

ensayos complementarios lo hacen de mejor manera, reflejando tendencias o máximos más consistentemente, pero sobre los cuales también se hacen observaciones en su uso. Se incluye un resumen de resultados de todos los ensayos según valores referenciales que marcan las respectivas tendencias.

El **Quinto Capítulo** se inicia con una interpretación de los ensayos que evalúan mecánicamente a los materiales de pavimentos, se discute los resultados obtenidos, comparándolos y contrastándolos según la condición de ensayo (seca-saturada), contenido de finos y de asfalto. También se compara resultados con antecedentes de otras investigaciones con los cuales se coincide en algunos casos y discrepa en otros, además se realiza algunas recomendaciones que pueden ser discutidas y validadas, concluyendo con los aportes que cada ensayo realiza al diseño.

El **Sexto Capítulo** presenta las conclusiones y recomendaciones finales de esta investigación, resaltando el cumplimiento de los objetivos básicos en casi todos los casos. Se menciona además la necesidad de una mayor profundización en la investigación sobre estos materiales, resaltando que, quizás las metodologías que finalmente determinen valores óptimos y sensibilicen ante los distintos contenidos de asfalto no necesariamente sean ensayos mecánicos. Se identificó más claramente el rol del asfalto mediante los ensayos complementarios, especialmente aquellos de carga repetida.

2. REVISIÓN DE LA LITERATURA Y TEORIA

La revisión del estado del arte y la práctica en investigaciones sobre pavimentos reciclados se enfocó especialmente en aquellos trabajos ejecutados en laboratorio y cuyo estudio lleva a una mejor comprensión de las propiedades mecánicas de estos materiales.

La técnica de reciclar pavimentos con AE (asfalto espumado) es cada vez más común en varios países, no solamente por sus ventajas técnicas y económicas, sino principalmente por las ambientales. El contexto local en el cual se encuentra la técnica se describe en el Anexo A: “Discusión sobre la contextualización Laboratorio-Solicitaciones en Terreno”.

2.1. Técnica de Reciclado en frio de pavimentos asfálticos con AE

La técnica de reciclado en frio (Figura 2-1) se ha masificado desde el cese de los derechos de la patente en la década de 1990, con varias máquinas de AE trabajando en muchos países. Los resultados de pistas tratadas con esta técnica y la experiencia han demostrado que las propiedades de los materiales obtenidos en laboratorio no son totalmente consistentes en relación a los resultados de campo como la industria desea (Collings, 2001).

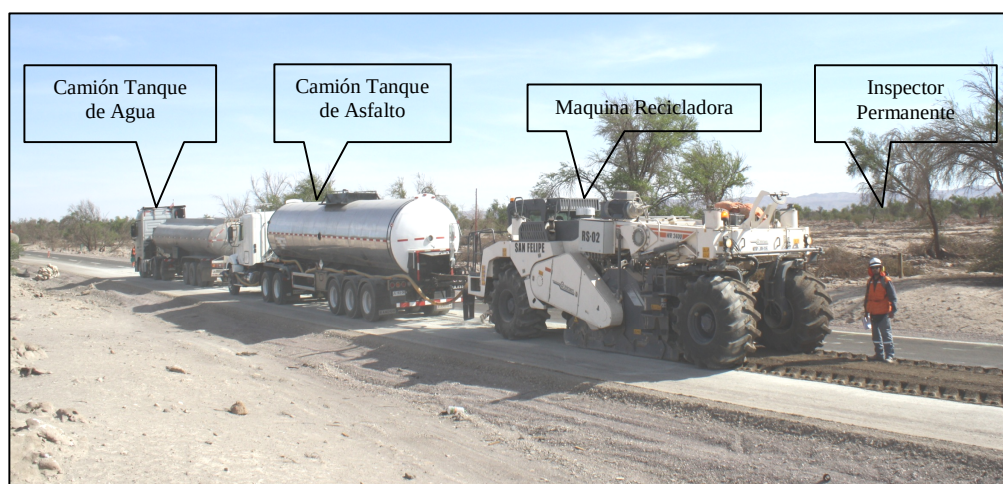


Figura 2-1: Tren de reciclado. Elaboración Propia

El proceso de reciclado está liderado por la máquina recicladora cuyo elemento más importante es el tambor fresador-mezclador equipado con un gran número de puntas especiales que trituran el material del pavimento existente. El AE se produce cuando el asfalto virgen es expandido temporalmente mediante un proceso físico de intercambio de calor. En dicho proceso se inyecta una pequeña cantidad de agua fría (1 a 3% del peso de asfalto) al asfalto caliente (entre los 150 °C – 180 °C) dentro de una cámara de expansión, generando instantáneamente una expansión de gas (vapor) en forma de burbuja de asfalto (Thenoux, 2011).

2.2. Mediciones de laboratorio

Al igual que cualquier otro tipo de material utilizado en la construcción de caminos, en las mezclas con AE se necesita de pruebas en laboratorio para conocer y garantizar el desempeño de los materiales. Las pruebas mecánicas realizadas comúnmente son los ensayos de resistencia:

- Tracción Indirecta (ITS: Indirect Tensile Strength) y
- Compresión Simple (UCS: Unconfined Compressive Strength).

Estas pruebas mecánicas tienen un costo relativamente bajo y además son sencillas de realizar. Otras pruebas son más avanzadas y utilizadas con menos frecuencia dado principalmente por la baja disponibilidad de equipos (alto costo), así como la complejidad técnica, y el tiempo que lleva realizarlas. Algunos ensayos son:

- Módulo Resiliente (M_{rTx} o M_R) o Carga Monotónica (ML_{Tx}), triaxiales
- Deformación Permanente Triaxial (Pd_{Tx})
- Viga de Flexión por módulo y fatiga
- Módulo Elástico o Dinámico por Tracción Indirecta (ITMS)
- Fatiga por Tracción Indirecta (ITFS)

Si bien no existe aún un único ensayo mecánico que se utilice como evaluador principal, la necesidad de entender y conocerlo más, ha llevado a desarrollar varios ensayos que en conjunto pueden mejorar el criterio del diseñador.

2.3. Diseño de Mezclas

Existen protocolos o guías para el diseño de mezclas con AE. Una de las más utilizadas es la Guía Sudafricana para Estabilizaciones de Materiales con Bitumen-TG2 2009 (Asphalt Academy, 2009), cuya propuesta de diseño de mezclas se muestra en el diagrama de flujo de la Figura 2-2, la cual está dividida en niveles según la importancia del proyecto.

La división en niveles se debe principalmente a la exigencia dada por la intensidad del tránsito que pueda tener el pavimento proyectado, medida en ejes equivalentes de carga de 80 kN (eje de carga estándar). A mayor tránsito, mayor será la categoría del camino, y por lo tanto se requiere de más ensayos y estudios para aumentar la confiabilidad del diseño. En todos los casos se busca obtener propiedades mecánicas de los materiales con asfalto. Es claro también reconocer que la caracterización hecha en laboratorio debe utilizarse como guía o recomendación, y esta debe ir acompañada del juicio (experiencia) del diseñador.

Específicamente se debe entender que el diseño de mezclas forma parte del protocolo de ingeniería y se debe conocer el proceso constructivo, considerar además que puede existir una variación en la granulometría y reconocer que el pavimento rara vez es consistente en todas sus características a lo largo de la traza del camino a tratar (Jooste et al, 2007).

Localmente, el diseño de mezclas se rige según el Manual de Carreteras de Chile 2012 (MOP-Chile, 2012), el cual adopta al ensayo ITS para determinar la resistencia mecánica y obtener el contenido óptimo de AE en la mezclas. El filler activo comúnmente utilizado es el Cemento Portland, con un contenido típico del 1%, mientras que el contenido de AE normalmente se encuentra entre 2% y 3%.

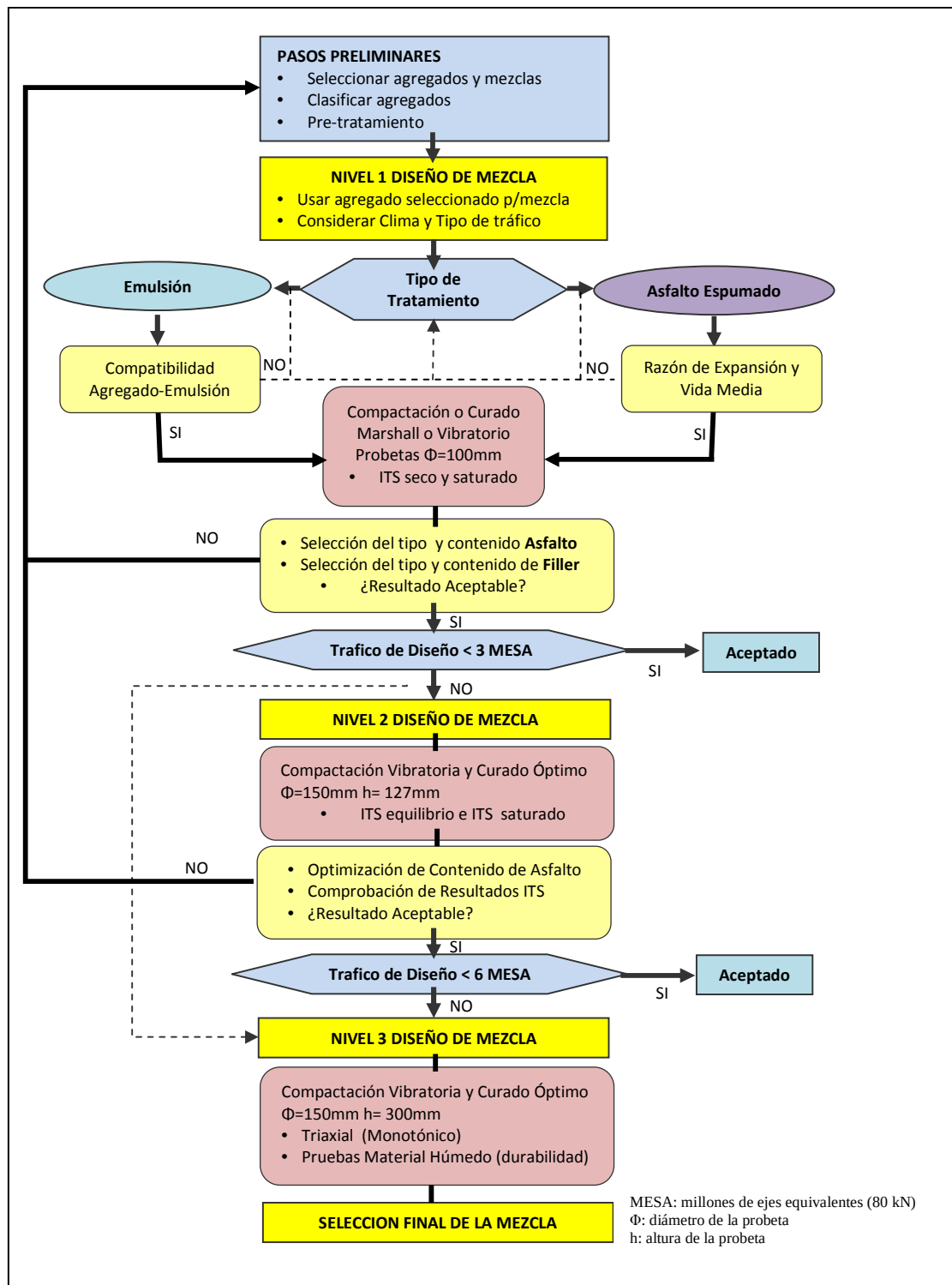


Figura 2-2: Flujo del proceso de diseño de mezclas. Asphalt Academy, 2009

2.3.1. Propósito del diseño de mezclas

Según la experiencia obtenida en trabajos de laboratorio, investigadores han identificado los propósitos principales del diseño de mezclas en mezclas con AE (Leek et al, 2011):

- Proveer indicadores del desempeño de los materiales reciclados que cumplan con los requerimientos mínimos y con el período de diseño
- Proporcionar parámetros de los materiales para el diseño estructural
- Minimizar costos y ahorrar recursos no renovables, optimizando el uso de materiales y aditivos.

Además existe la necesidad de investigaciones sobre las propiedades fundamentales que refinan el método de diseño y cuyo conocimiento pueda ser transferido a la práctica.

2.3.2. Clasificación de los materiales

Previo a la ejecución del diseño de mezcla se deben clasificar los materiales a ser utilizados. A continuación se describen algunas características de los materiales de manera independiente y otras dadas por la combinación entre los estabilizadores.

a) Material Granular (RAP/Base granular)

El reciclado de pavimentos asfálticos se aplica en la estabilización de materiales granulares, tanto seleccionados, como marginales, vírgenes y/o con RAP (pavimento asfáltico reciclado) (Wirtgen, 2012). La Guía TG2 (2009) y el Manual Wirtgen (2012) recomiendan una banda de distribución de tamaños de las partículas del material reciclado (Figura 2-3).

El porcentaje mínimo de finos (Pasante Tamiz #200 = 0,075mm) requerido es del 5%. La calidad de la matriz fina o mastic resulta de la combinación entre el asfalto y los áridos finos, el cual actúa significativamente en estos materiales (Leek et al, 2011). Cuando el material fino de la mezcla es menor al 5% el AE no se dispersa en forma

apropiada y tiende a formarse lo que se denominan “filamentos” (aglomeraciones de asfalto), variando según la escasez de finos. Un bajo porcentaje de finos hará que estos filamentos sean largos, pudiendo actuar deficientemente generando un efecto de lubricación en la mezcla, y por ende podría disminuir la resistencia o estabilidad del material (Wirtgen, 2012).

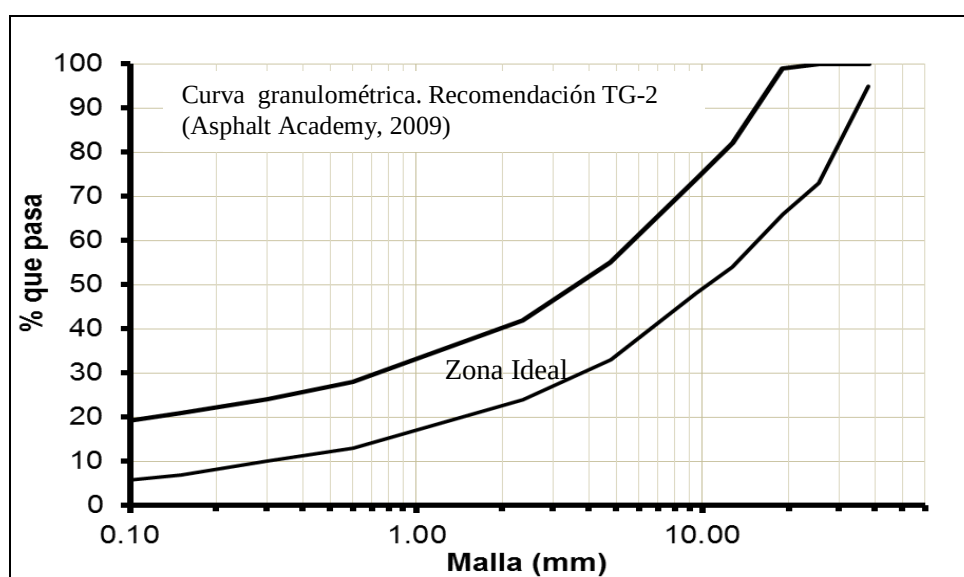


Figura 2-3: Banda granulométrica recomendada para mezclas con AE. Asphalt Academy, 2009

La literatura no menciona el exceso de finos, puesto que en las rehabilitaciones mediante el proceso de trituración, el factor crítico es la escasez de finos que la máquina ocasionalmente no es capaz de producir, tratándose normalmente de materiales granulares o sin plasticidad en el caso de Chile. Según Fu et al, (2008) el filler activo incorporado también ayuda a una mejor distribución del AE, y menciona además que las fisuras producto de las cargas del tránsito se producen a través de las fases que poseen menor resistencia, es decir, primeramente a través de las fases con finos no adheridos, y posteriormente a través de las fases con materiales ligados. En un estudio de imágenes de caras fracturadas (Fu et al, 2009), representado en la Figura 2-4, se muestra una distribución efectiva de los puntos de soldadura o puntos de asfalto, así como el caso de una distribución deficiente con sus respectivas causas.

Son dos las características principales que deben obtenerse en los materiales a estabilizar: la curva granulométrica y el índice de plasticidad (IP) (Wirtgen, 2012). La granulometría recomendada se representa en la Figura 2-3, además se exige un IP (índice de plasticidad) <10 . En el caso chileno generalmente se reciclan materiales de carpeta asfáltica y bases granulares, que normalmente no presentan plasticidad, es decir son NP (no plásticos).

Otras propiedades que se deben analizar en el agregado son las propiedades de durabilidad, origen geológico, angularidad, composición espacial y la resistencia al desgaste (Asphalt Academy, 2009; Austroads 2013).

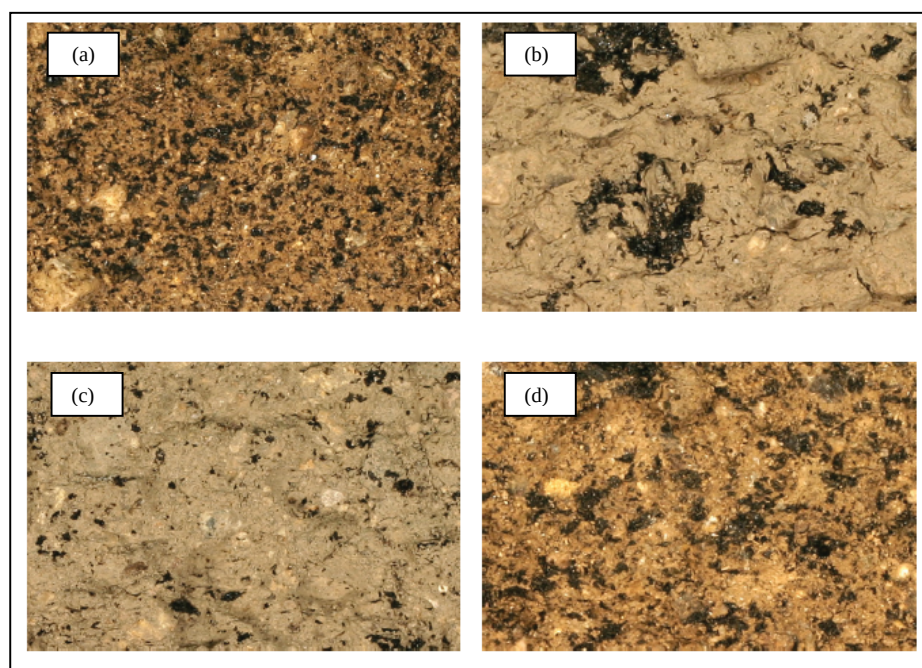


Figura 2-4: Distribuciones de puntos de AE en caras de probetas fracturas en diferentes tipos de mezclas: (a) satisfactoria, (b) problemas alta humedad, (c) problemas alto contenido de filler, (d) deficiente contenido de filler. Fu et al, 2009

Dado que el asfalto espumado se dispersa principalmente entre las partículas más finas de los agregados, los finos se encapsulan por las burbujas de asfalto y se inmovilizan, siendo esta la propiedad que disminuye la susceptibilidad a la humedad en la mezcla y aporta mayor durabilidad de los materiales tratados. Los finos al estar encapsulados

impiden el bombeo (pérdida de finos), bajo aplicaciones de cargas de tránsito con presencia de agua.

b) Filler Activo

Tradicionalmente las mezclas con AE utilizan algún tipo de filler activo, normalmente cemento Portland o cal. Jenkins (2012) define las principales funciones que aporta el filler activo:

- Mejora la dispersión del AE
- Reduce los daños por humedad
- Modifica y reduce la plasticidad en materiales plásticos
- Aumenta la rigidez y la resistencia
- Acelera el curado

Según Asphalt Academy (2009) el modo principal de falla de las mezclas con AE es la deformación permanente, sin embargo en Australia donde utilizan un contenido asfáltico mayor, se ha observado fallas por fatiga (Leek y Jameson, 2011). Frente a esto, el comportamiento y la rigidez varía significativamente dependiendo de los contenidos de asfalto y del filler activo utilizado. En particular, cuando se utiliza cemento en exceso, la mezcla se comporta más bien como un material tratado con cemento y el beneficio de adicionar asfalto puede no aprovecharse correctamente. Según la experiencia Sudafricana no se recomienda un contenido de cemento que exceda al 1%, y la relación entre el asfalto añadido, respecto a filler activo, siempre debe exceder a 1 (Asphalt Academy, 2009).

Halles y Thenoux (2010) muestran el efecto del filler activo mediante valores obtenidos en los ensayos ITS a temprana edad de curado (Figura 2-5), con dos tipos de filler (cal/cemento) y sin este. Las probetas fueron curadas a corto plazo (24 hs ambiente). El ITS fue mayor en mezclas con cemento que con cal. Nótese además que el aporte de resistencia ITS del AE en estado fresco es marginal.

Parte del estudio de Halles y Thenoux (2010) concluyó que el cemento y la cal cumplen papeles fundamentales de resistencia ITS a corto, mediano y largo plazo, además que la utilización de cemento mejora considerablemente la susceptibilidad de estos materiales frente al cambio de humedad.

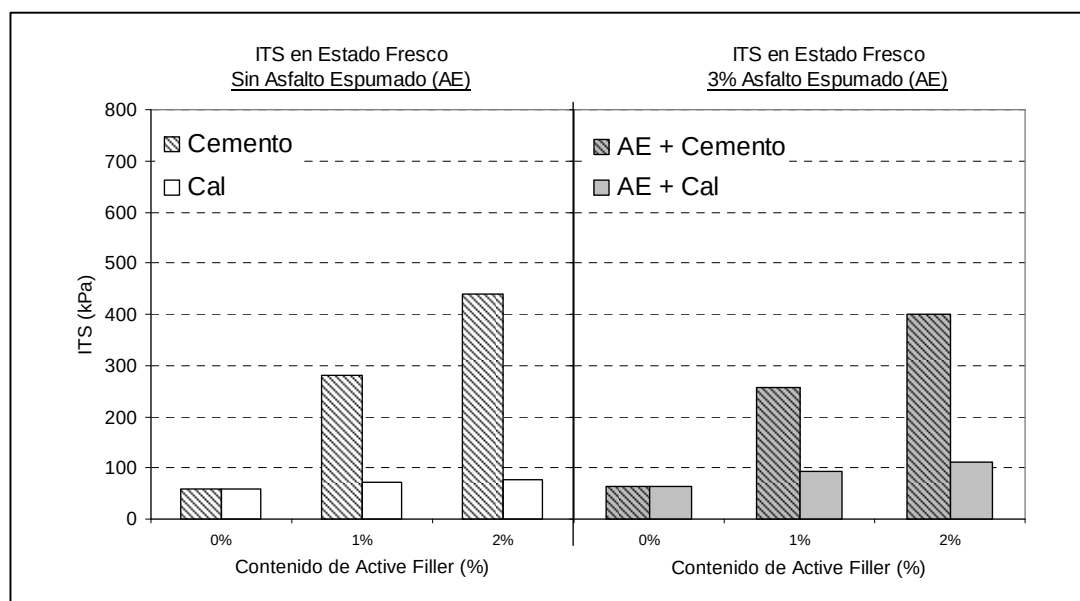


Figura 2-5: Ensayos ITS, ensayados en estado fresco (24hs). Halles et al, 2010

Fu (2008) menciona que, cuando el contenido de filler activo es demasiado bajo o alto se influye negativamente en la eficacia del asfalto, parte de esto se muestra en la distribución de puntos de asfalto en distintos tipos de mezclas (Figura 2-4). El contenido de filler activo (cemento) actúa como un catalizador en la dispersión de las partículas de asfalto.

Cualquier material tratado con cemento es propenso a agrietarse (Wirtgen, 2012; Collings, 2010), siendo la primera causa la contracción generada por la reacción química dada por la interacción cemento/agua. La segunda causa es por la repetición de cargas del tráfico durante un período de tiempo (Asphalt Academy, 2009). Estos son generalmente los motivos por el cual se limita la adición de cemento.

La dispersión o puntos de asfalto fue investigado por Fu (2009), concluyendo que el material fino y el filler activo ayudan a la mejorar la dispersión del AE en las mezclas (Figura 2-4). Esto fue investigado en estudios sobre imágenes de caras fracturadas en probetas ITS ensayadas.

Halles et al, (2012) investigó el efecto de los distintos tipos de curado, afirmando que las mezclas con AE no desarrollan resistencia hasta que el agua que contienen se pierda o evapore por completo, confirmando la importancia que tiene el cemento en esta etapa ya que permite garantizar una resistencia mínima en la mezcla durante los primeros días después de la construcción, como también en el caso en que la mezcla no pueda secarse y por lo tanto tampoco puede adquirir resistencia.

c) Cemento asfáltico y sus propiedades de espumación

En Chile se exige el empleo de un cemento asfáltico del Tipo CA 24 o CA 14, este debe ser capaz de generar una espuma con vida media superior a 5 segundos y una razón de expansión superior a 10 (MOP-Chile, 2012). Estas características se citan más adelante y básicamente definen las propiedades de espumación del asfalto. Algunas exigencias mínimas se muestran en la Tabla 2-1.

Tabla 2-1: Valores mínimos recomendados (Wirtgen, 2012)

Características del Asfalto Espumado (Limite mínimos)		
Temperatura del Agregado	10°C a 15 °C	Mayor a 15 °C
Razon de Expansión [veces]	10	8
Vida Media [segundos]	8	6

Varios estudios tratan de relacionar las propiedades del asfalto (penetración, viscosidad, etc.) con su capacidad de generar espuma. Jenkins (2000) describe otros estudios compilando información sobre la historia y antecedentes del AE, e identifica los ensayos respectivos que evalúan al asfalto. Entre sus antecedentes menciona:

“Los resultados que relacionan e indican únicamente a la viscosidad, no son suficientes para explicar la variación de la razón de expansión y vida media”

La temperatura y el contenido de humedad de las mezclas son relevantes y su relación con el asfalto de alguna manera es bien conocida, sin embargo las propiedades físicas en función de la reología o tiempo/temperatura no están del todo claro según el tipo de asfalto (Saleh, 2007).

El proceso de generación del asfalto espumado es un proceso físico, regido por leyes básicas de la termodinámica. Dicho proceso se esquematiza en la Figura 2-6.

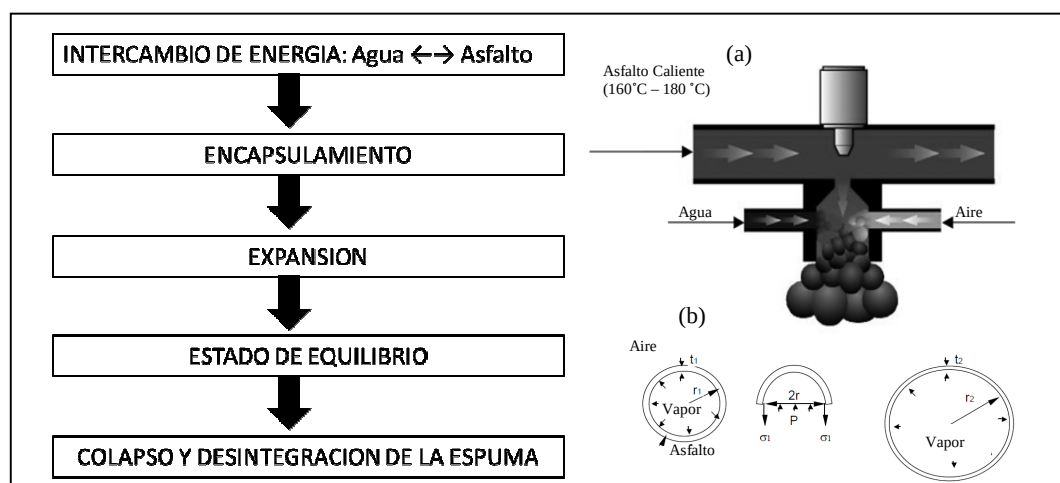


Figura 2-6: Proceso de generación del AE (a) Cámara de expansión o generación de AE (b) Burbuja o película delgada de asfalto

Se describe ordenadamente el proceso de generación del AE (CIIV, 2010):

- La energía calórica del asfalto es transferida al agua, donde el agua alcanza su punto de ebullición
- Se crea una burbuja de asfalto cuya película es delgada y está llena de vapor de agua (Figura 2-6b)
- El asfalto junto con el vapor de agua encapsulado es liberado desde la cámara a través de una válvula (dispositivo rociador, Figura 2-6a), el vapor encapsulado se

expande formando burbujas de asfalto contenidas por la tensión superficial de éste hasta alcanzar un estado de equilibrio

- Debido a la baja conductividad térmica del asfalto y del agua, las burbujas pueden mantener el equilibrio por pocos segundos (10-30 segundos)
- A medida que la espuma se enfría a temperatura ambiente, el vapor en las burbujas se condensa causando el colapso y la desintegración de la espuma
- La desintegración de la burbuja (o colapso de la espuma) produce miles de gotitas de asfalto, las cuales al unirse buscan recuperar su volumen y en dicho proceso no se alteran significativamente las propiedades reológicas y originales.

La valoración más importante que define la calidad del asfalto en su uso como asfalto espumado son principalmente dos características: la Razón de Expansión (ER) y Vida Media ($\tau_{1/2}$), definidas según el Manual Wirtgen (2012) como:

Razón de Expansión (Volumen de Expansión): es una medida de viscosidad de la espuma e influye en que tan bien se dispersaría el asfalto en la mezcla. Se calcula mediante la relación del máximo volumen de la espuma y su volumen original. Dicho proceso se representa en la Figura 2-7.

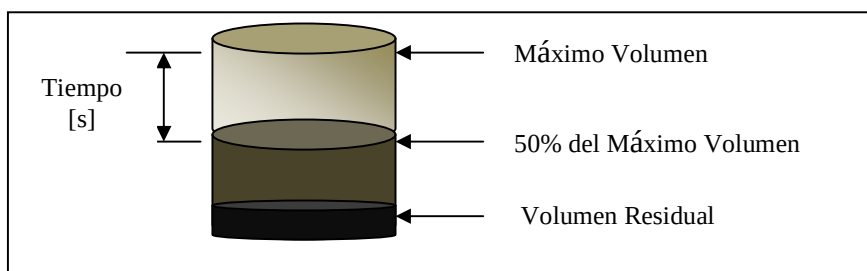


Figura 2-7: Representación del aumento de volumen producido por la espumación del Asfalto (Wirtgen, 2012)

Vida Media (Estabilidad de la Espuma): es una medida de estabilidad de la espuma y provee un indicador de la tasa de colapso. Se calcula en segundos desde el inicio del colapso de la espuma hasta la mitad del volumen máximo alcanzado. El Manual Wirtgen (2012) recomienda los valores expuestos en la Tabla 2-1.

El colapso del AE o decaimiento de la espuma fue estudiado por Jenkins (2000), desarrollando el concepto de Índice de Espumación o Espumabilidad. Esta es una herramienta para optimizar la razón de aplicación tanto del agua de espumación y aditivos, dado por el asfalto y el sistema de espumación. Es una medición de la curva de decaimiento del cambio de volumen en el tiempo (relación entre $ER - \tau^{1/2}$), el cual refleja el efecto combinado de la viscosidad (ER) y estabilidad ($\tau^{1/2}$). Se determina utilizando la ecuación (2.1) de decaimiento del asfalto espumado, donde la espuma tiene un decaimiento asintótico (Figura 2-8).

$$FI = A_1 + A_2$$

$$= \tau_{1/2} \times (1/\ln 2) \times (4 - ER - 4 \cdot \ln(4/ER)) + ((1 + c) / 2c) \cdot ER \cdot t_s \quad (2-1)$$

Siendo; t_s : tiempo de descarga (segundos); c : relación entre el ER medido y el real obtenido según el tiempo de descarga del equipo (Jenkins, 2000).

La Guía Técnica Sudafricana TG2-2009 (Asphalt Academy, 2009) en su nueva versión menciona que normalmente se requiere de un bajo porcentaje de AE (típicamente 1,7% a 2,5%). Jenkins, 2000 recomienda considerar un valor mínimo de FI (índice de espumación) de 257 en el AE, para que el material fino de mezclas pueda llegar a encapsularse o formar mastic de manera más eficiente.

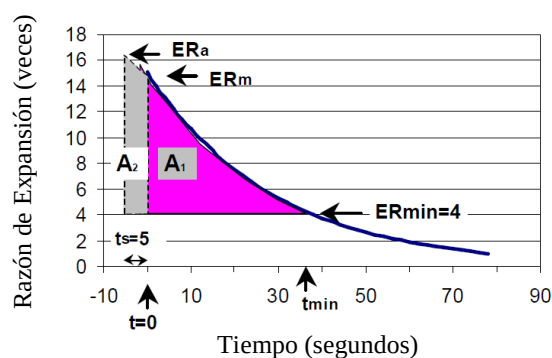


Figura 2-8: Decaimiento asintótico del AE. Jenkins, 2000

2.4. Pruebas Mecánicas en Laboratorio

En esta sección se ordenan varios tipos de ensayos mecánicos en laboratorio separados en dos grupos, aquellos comúnmente realizados, que son llamados en esta investigación “ensayos tradicionales” (ITS/UCS), y aquellos de menor ejecución, llamados en esta investigación “ensayos complementarios” (triaxiales, fatiga, módulo elástico, etc.).

2.4.1. Ensayos Tradicionales

Resistencia a la Tracción Indirecta (ITS) y Compresión No Confinada (UCS).

Los ensayos ITS y UCS (Figura 2-9) son pruebas estándar que aplican carga en la muestra hasta la tensión máxima o falla. Las dimensiones de las probetas ITS con asfalto espumado normalmente son de 100 o 150 mm de diámetro y 65 mm (± 5 mm) de altura, mientras que las probetas UCS son normalmente de 100 o 150 mm de diámetro y 125 mm (± 5 mm) de altura. Los especímenes ITS son cargados diametralmente de manera vertical, induciendo esfuerzos de tracción horizontal en el centro de la muestra que se calculan utilizando la teoría lineal elástica. Los especímenes UCS son cargados axialmente y el esfuerzo de compresión es calculado utilizando la relación entre la carga aplicada de falla y el área de contacto de la misma. Los valores de ITS y UCS se definen por la tensión máxima aplicada a los especímenes durante las pruebas. Se esquematizan estos ensayos y la lectura de datos de carga/deformación en la Figura 2-9.

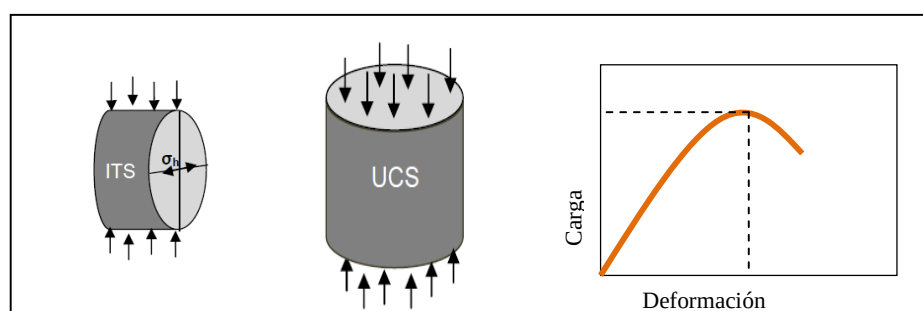


Figura 2-9: Representación de ensayos ITS y UCS. Elaboración Propia

Las pruebas ITS y UCS son considerados ensayos convencionales para estimar la resistencia mecánica en mezclas con diferentes porcentajes de AE.

Long y Ventura (2004) ejecutaron y relacionaron ensayos ITS y UCS en materiales con distintos porcentajes de AE, buscando mejorar el diseño propuesto por la Guía Sudafricana TG2-2002, que clasifica a los materiales estabilizados con AE en cuatro tipos, según sus valores ITS-UCS, de FB1 a FB4, de mayor a menor calidad. Dicha clasificación se muestra en la Figura 2-10a. Igualmente se muestran los resultados que obtuvieron Long y Ventura (2004) (Figura 2-10b).

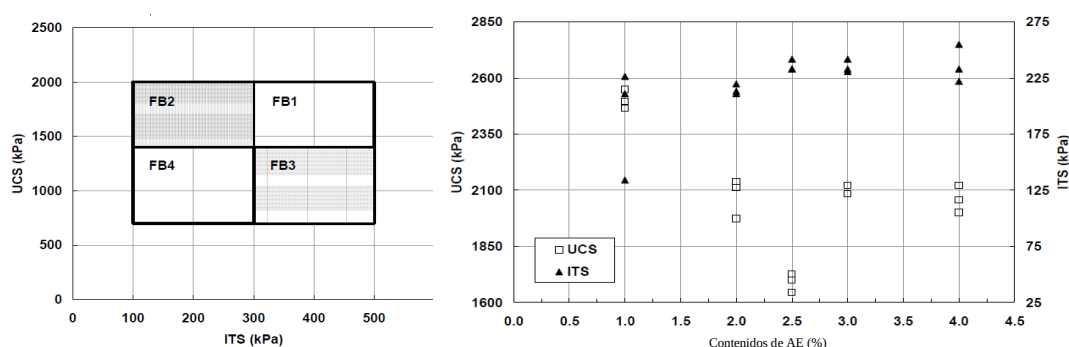


Figura 2-10: (a) Clasificación de materiales según categoría del material
(b) Resultados ITS y UCS. Long y Ventura, 2004

Los resultados ITS muestran que las mezclas con 2,5% o más contenido de AE tienen valores un poco mayores que las mezclas con 2,0% o menos, y claramente no hay un valor óptimo de AE visible. Las muestras UCS con un 2,5% de AE resultan con valores excesivamente bajos, lo cual probablemente es un error, siendo que el de menor contenido de AE resulta con mayor resistencia UCS, pero, ignorando al contenido 2,5% de los datos, la fuerza UCS es constante por encima del 2,0% de AE. Long y Theyse (2002b) a su vez estudiaron los efectos del contenido de AE en un tipo de material granular, con un contenido de cemento del 2%, y variaron el porcentaje de AE de 1,8% a 3,0%, resultando una disminución del 35% en los ensayos UCS (secas) y un aumento del 43% en los ensayos ITS (secas) con el respectivo aumento del contenido de AE.

También realizaron UCS (secas) y ITS (secas) en diferentes mezclas, con un contenido de cemento del 1% y variando el porcentaje de AE entre 0% y 2,25%, reportando un incremento en los UCS (secas) y ITS (secas) de solo 4,7% y 9,3% respectivamente.

Frobel y Hallett (2008) ensayaron probetas en condiciones secas y saturadas (24 hs) con pruebas ITS y UCS, en materiales de 4 proyectos de construcción ejecutados en Nueva Zelanda, reportando que el efecto dado por la adición de 2%, 3% y 4% de AE, tanto en la condición seca y saturada, resultó en valores no siempre claros o el cambio fue demasiado pequeño como para ser concluyente, pero para el caso UCS disminuyó con el aumento del contenido de AE. Fu et al, (2008) encontraron que el comportamiento de las mezclas con AE en condición saturada (agua) es crítica para el rendimiento del pavimento. Mencionan que bajo condiciones secas la cementación química es débil y que el consumo de agua residual dado por el filler activo puede dominar el comportamiento del material, y ocultar los efectos de AE.

La teoría lineal elástica aplicada a la ecuación de obtención del valor ITS (Ecuación 2-2) fue aplicada por González y Cubrinovski (2011), donde se deduce la relación entre las tensiones principales vertical y horizontal, demostrando que la tensión vertical equivale a 3 (veces) la tensión horizontal. En la Figura 2-11 se observa dicha relación mediante la distribución teórica de tensiones.

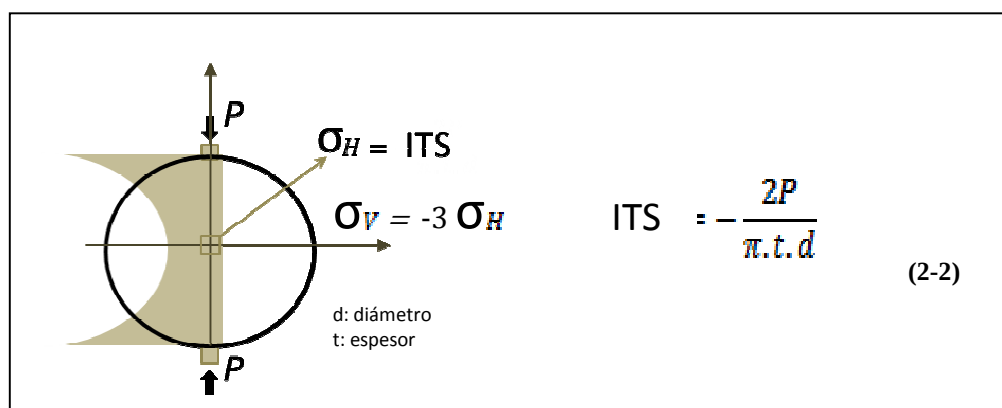


Figura 2-11: (a) Representación de la distribución de tensiones en los ensayos ITS y ecuación para la obtención del valor

Halles y Thenoux (2010) (Figura 2-12) llevaron a cabo pruebas ITS para identificar el rol y cuantificar el grado de influencia del filler activo en las mezclas recicladas con AE. Concluyen que el filler activo se debe utilizar en todos los proyectos AE y que el efecto del AE en el ITS es más evidente cuando las mezclas se curan y se saturan. A su vez mostraron que el contenido de filler activo tiene un gran efecto en la resistencia de probetas mezcladas con AE, por ejemplo añadiendo solo 1% de cemento, obtuvieron que resultados de resistencia ITS se duplican. Al comparar las mezclas con cemento como filler activo, frente a los medidos con y sin asfalto es posible apreciar que el aporte del asfalto es marginal, mencionan además que el cemento esconde el aporte en términos de resistencia ITS que pueda generar el asfalto.

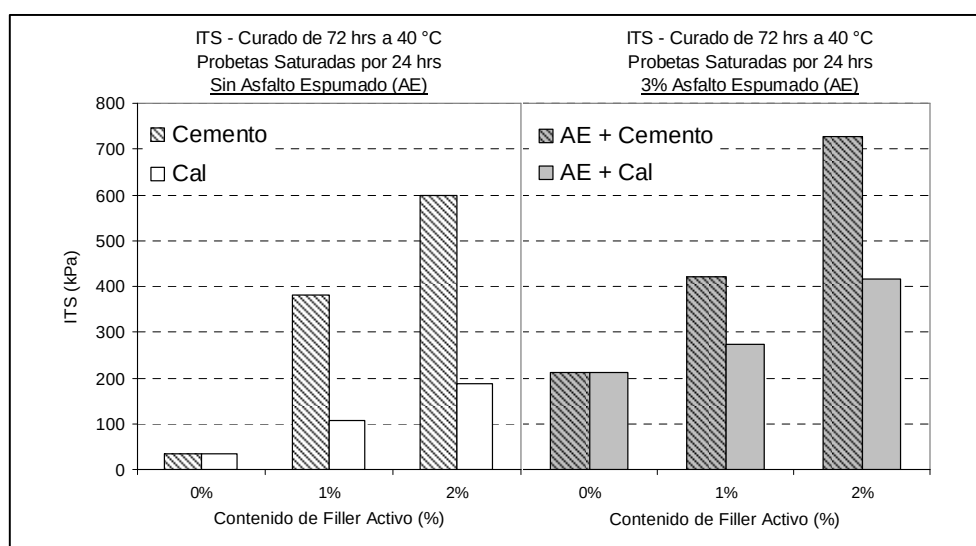


Figura 2-12: Resultados ITS, con y sin filler activo. Halles et al, 2010

Algunas recomendaciones sobre los ensayos UCS e ITS (Asphalt Academy, 2009), respecto al diseño de mezclas son:

- El ensayo UCS es similar al triaxial sin confinamiento y la relación diámetro/altura de 0,85 se considera demasiado baja para proporcionar valores de corte realistas.
- El ensayo ITS es una prueba simple, pero la interpretación de los resultados es compleja.

La hipótesis de que la tensión puede asumirse como plana no es correcta para un cilindro de dimensiones especificadas. A pesar de estos inconvenientes, los ensayos UCS e ITS se consideran adecuados para la primera etapa del diseño de las mezclas definidas en el proceso de la Figura 2-2 (Asphalt Academy, 2009). Estas pruebas pueden ayudar en la optimización de los siguientes factores (Jenkins, 2009):

- Granulometría de los agregados - UCS
- Proporciones de la mezcla de los materiales de pavimentos - UCS
- Uso de cemento o cal como filler activo - ITS
- Susceptibilidad a la humedad - ITS
- El tipo de estabilizador u aditivo - UCS e ITS
- El contenido del aditivo UCS e ITS.

2.4.2. Ensayos Complementarios

Como se mencionó anteriormente los ensayos complementarios son aquellos no utilizados comúnmente y buscan determinar propiedades en estas mezclas que muchas veces no pueden ser observadas en los ensayos tradicionales. Algunos de ellos son los ensayos triaxiales (módulo resiliente, deformación permanente, monotónica), de fatiga por tracción indirecta o por viga de flexión, entre otros. A continuación se describen algunos de ellos, con sus resultados respectivos.

Ensayos Triaxiales

Carga Repetida o Dinámica

Hay dos tipos de ensayos triaxiales dinámicos o de carga repetida: módulo resiliente y deformación permanente. Los ensayos triaxiales de carga repetida son pruebas de laboratorio más avanzadas, normalmente utilizados en investigación. Se esquematiza al ensayo triaxial en la Figura 2-13.

Deformación Permanente (PdTx)

En las pruebas de PdTx, en lugar de aplicar una carga hasta la rotura, tal como en los ensayos monotónicos, las muestras son sometidas a una carga cíclica, que en general se encuentra muy por debajo de la carga última o de falla.

Pruebas PdTx fueron realizadas por Long y Ventura (2004), quienes aplicaron 50.000 ciclos de carga con una frecuencia de 4 Hz con varias combinaciones de presiones de confinamiento y tensión desviatoria, en especímenes con AE preparados con diferentes densidades y condiciones de saturación. Se encontró una pequeña diferencia en la resistencia a la deformación permanente final en las mezclas preparadas con 1% de cemento y con distintos contenidos de asfalto, lo que indica que el contenido de AE tiene poco efecto sobre la resistencia a la deformación permanente.

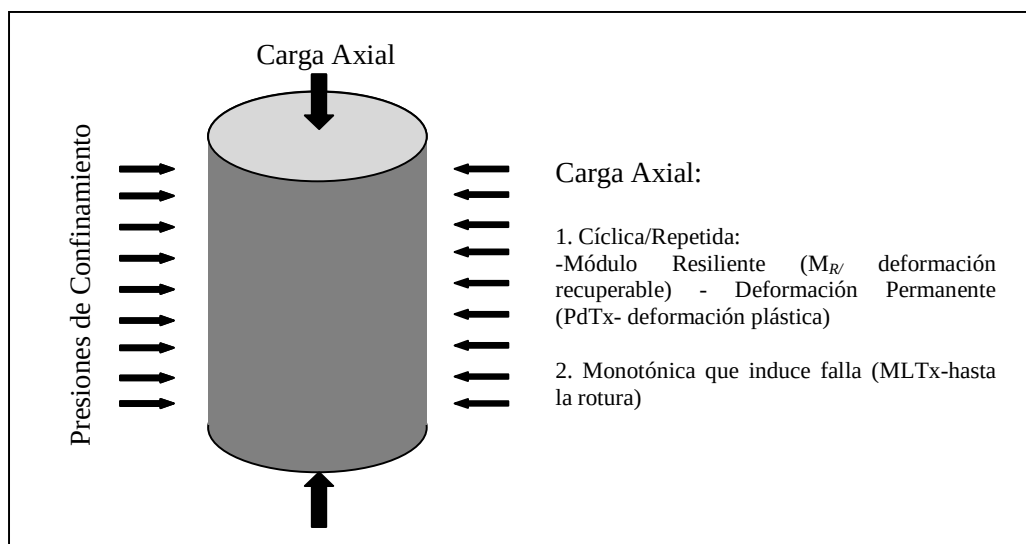


Figura 2-13: Representación de la prueba triaxial y variantes en el tipo de carga axial aplicada

González et al. (2012) también realizaron ensayos PdTx como parte de las pruebas de laboratorio que complementan investigaciones en pavimentos a escala real y carga acelerada en materiales estabilizados con AE. Se ensayaron muestras con 0%, 1.2%, 1.4% y 2.8% de AE, todos con 1% de cemento, aplicando seis etapas de tensiones de

50.000 ciclos de carga (4 Hz) cada una, con diferentes combinaciones de presiones de confinamiento y tensión desviatoria. Los autores reportaron un aumento en la deformación permanente en función del aumento del contenido AE.

Kim et al, (2008) también aplicaron cargas repetidas de manera triaxial en probetas obtenidas de materiales procedentes de 7 proyectos de construcción. Prepararon un total de seis probetas por cada fuente, utilizando contenidos de 1%, 2% y 3% de AE (2 muestras por contenido de asfalto), sin filler activo. La carga aplicaba 10.000 repeticiones de 138 kPa (tensión desviatoria), con pulsos de 0,1 segundos de duración, un período de descanso de 0,9 segundos y a una temperatura de 40 °C.

Kim et al, (2008) definieron un “número de flujo” como se representa en la Figura 2-14, estudiando el efecto del AE en estos valores. Se observó que a mayor contenido de AE, menor es el número de flujo. En otras palabras, las probetas tendían a fallar más por un aumento del contenido de AE de 1% a 3% . Estos investigadores confirmaron esta tendencia, donde la adición de AE en mezclas con 1% de cemento, aumenta la deformación permanente acumulada de las mezclas, generándose un material relativamente débil en comparación al que no contiene AE.

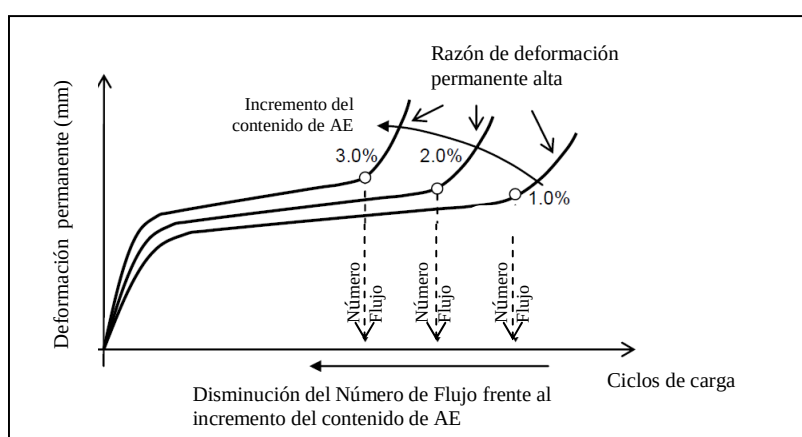


Figura 2-14: Representación del “número de flujo”. Kim et al, (2008)-González et al, 2011

Módulo Resiliente (M_R o M_{RTx})

Respecto a los ensayos M_R , Fu et al, (2008) recomendó no utilizar este ensayo para optimizar el contenido de AE, al igual que las pruebas ITS e UCS, definiendo otras bondades en estos ensayos.

Fu et al, (2009) desarrollaron varias pruebas, entre ellas las de M_R en muestras secas y saturadas, mencionando que el asfalto espumado transforma el comportamiento del material granular no tratado (típico) a materiales unidos parcialmente por el asfalto, sin aumentar significativamente los valores de los módulos elásticos. Destaca que el uso simple de resultados de pruebas M_R podría resultar en un diseño inseguro, debido a una posible reducción del M_R dado que los esfuerzos a tracción no se aplican en la prueba triaxial bajo comportamiento elastico o resiliente. Otra observación hecha por estos investigadores fue que muchos programas de investigación a menudo no consideran que el M_R real (terreno) en las mezclas con AE es altamente dependiente del estado de tensiones, y que los métodos disponibles en laboratorio no pueden simular plenamente estos estados de tensiones, por lo que se debe hacer hincapié en la importancia de asociar los estados de tensiones respecto a las diferentes condiciones en el ensayo, especialmente en condiciones saturadas. La dependencia de los materiales granulares ante los estados de tensión tambien puede darse en las mezclas con materiales tratados con AE. Varios modelos han sido utilizados, uno de los más utilizados sigue siendo el de Witzack y Uzan (1988):

$$M_R = k_1 \left[\frac{\theta}{P_a} \right]^{k_2} \left[\frac{\tau}{P_a} \right]^{k_3}$$

Donde:

P_a = presión atmosférica

θ : $3\sigma_0 + \sigma_d$

σ_0 = tensión de confinamiento; σ_d = esfuerzo desviador ;

τ : tensión octaédrica = $\sigma_d \cdot \sqrt{2/3}$

k_1, k_2 y k_3 : constantes de regresión o correlación

Definido el modelo típico de obtención del M_R , observaciones similares a las anteriores las realizó Jenkins (2000), describiendo un comportamiento del tipo granular en las mezclas con AE sin cemento (M_R es altamente dependiente de la tensión aplicada). Long y Ventura (2004) mediante ensayos de M_R (Figura 2-15), observaron que la inclusión de AE respecto a las mezclas sin estabilizadores redujo mínimamente al M_R , sin embargo, el tratamiento con cemento aumentó significativamente el M_R . En el gráfico se observa que la mezcla con 2% de cemento tiene un M_R superior a las mezclas con 1% de cemento.

Fu et al, (2009) hacen unas algunas aclaraciones respecto a la interpretación del M_R , desde el hecho de asumir que se trata de un material homogéneo e isotrópico hasta la conceptualización de supuesto comportamiento lineal elástico, siendo en realidad un material anisotrópico y que no es lineal. En caso de no asumir tales simplicidades harían una caracterización más realista e inevitablemente sería más complejo, para lo que se requerirán sofisticados modelos constitutivos conjuntamente con análisis mediante métodos de elementos finitos.

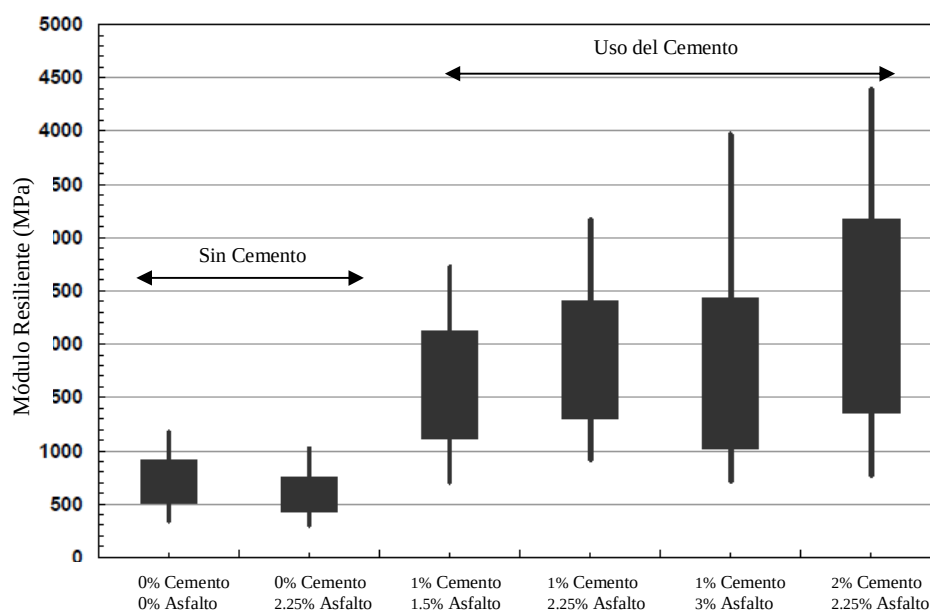


Figura 2-15: M_R medidos en ensayo con diferentes contenidos de AE y cemento. Long y Ventura, 2004

Según la microestructura (interna) del material con AE, se define tres mecanismos de resistencia a cargas, y una de ellas es parte de la fase mineral que sobre el cual el AE o filler activo no existe, ósea es un material débilmente unido que lo hace dependiente de la tensión a la que se encuentre sometida. En otros términos el comportamiento según las sollicitaciones del M_R y la dependencia de tensión a la que se encuentre sometida (Fu et al, 2009). Primeramente, el M_R puede ser muy variable según el sometimiento de tensión y la aplicación de compresión/cizallamiento, especialmente bajo condiciones saturadas. Las mezclas con AE resisten cargas de tracción y compresión/cizallamiento según los diferentes mecanismos mencionados a continuación (Figura 2-16):

- unión dada por el mastic (fase mineral-asfalto-filler),
- apoyo por el contacto entre ellas y
- fricción entre las mismas partículas

Todo esto contribuye en la resistencia a la deformación por compresión y cizallamiento en la condición seca, o condición no saturada. Cuando saturada, la unión del mastic (definida en la Sección 2.4) es perjudicada, generándose puntos débiles, donde el apoyo entre las partículas y la fricción pasan a ser los mecanismos dominantes ya que son menos sensibles a la humedad. Por otro lado, sólo hay dos mecanismos resistentes a la tracción, a saber, la unión de la fase mineral-filler, que es rígida, frágil y muy sensible a la humedad, y la unión de la fase mineral-asfalto, que es suave, dúctil y moderadamente sensible a los cambios de humedad.

Fu et al, (2008a) investigó el AE determinando que la mezcla en su fase mineral-asfalto perdió aproximadamente el 45% de su resistencia a la tracción después de la inmersión en agua, mientras que la fase mineral-filler perdió aproximadamente el 81%. Después de saturado, la fase mineral-asfalto domina la resistencia a tracción. En pruebas M_R , Fu et al, (2009) observó una disminución del 5% al 30% en condición saturada, y del 85% al 95% medidos en ensayos de vigas de flexión.

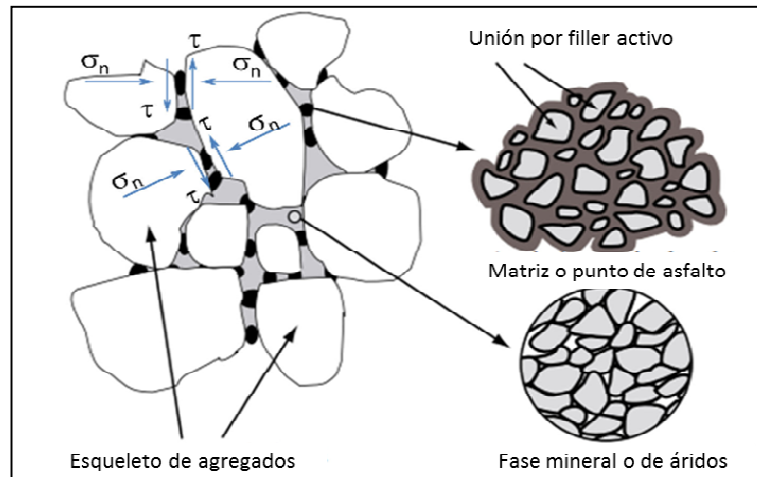


Figura 2-16: Representación de la microestructura de material reciclado con AE.
P. Fu, (2009)

Carga Monotónica (MLTx)

Las pruebas MLTx han sido utilizadas por investigadores para estimar la resistencia o el esfuerzo axial máximo en probetas mezcladas con AE, donde se somete a la probeta a diferentes tensiones de confinamiento bajo una carga axial hasta falla (González et al, 2011). Así también se puede obtener propiedades de resistencia al corte (ángulo de fricción interna y cohesión) de la probeta. En la Figura 2-17 se representa la prueba y curva de resultado del ensayo.

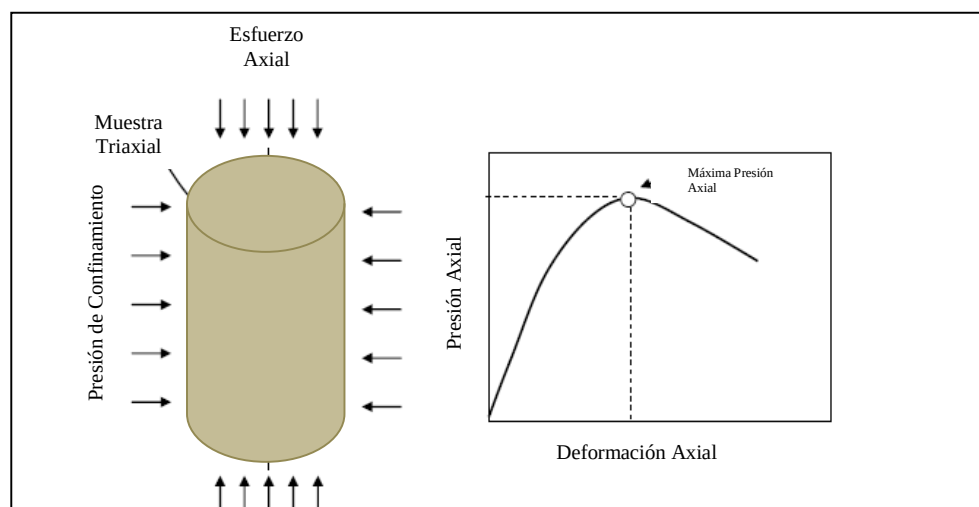


Figura 2-17: Esquema de representación del ensayo y resultado en las pruebas con mezclas MLTx

Long y Ventura (2004) realizaron un estudio exhaustivo de pruebas MLTx con AE en mezclas con un material granular específico con diferentes presiones de confinamiento, porcentajes de asfalto y densidades aparentes, cuyos resultados mostraron que la adición de AE en la mezcla con 1% de cemento reduce la presión axial máxima del material. Long y Theyse (2002a) similarmente reportan que el aumento del contenido de AE reduce la presión axial máxima en comparación a mezclas con 1% de cemento; con muestras curadas durante 28 días a temperatura ambiente (20 °C).

González y Cubrinovski (2011) mostraron que para las mezclas con 1% de cemento, la adición de AE reduce la presión máxima axial alcanzada en compresión triaxial. Además, se observó una reducción en el ángulo de fricción interna con el aumento del contenido de AE. Los efectos del contenido de AE en la cohesión aparente se encontraron que eran relativamente pequeñas para las mezclas investigadas.

2.4.3. Pruebas a escala real y acelerada

El desempeño de pavimentos estabilizados con AE también fue estudiado en pruebas con pavimentos a escala real y carga acelerada (González et al. 2012).

La fuente más realista y fiable sobre la respuesta del pavimento se obtiene en el campo, y hay dos fuentes de datos: las pruebas con firmes a escala real y carga acelerada (APT con siglas en Inglés) y monitoreos en los caminos en servicio. La ventaja de las instalaciones de APT sobre el otro, es la aplicación rápida de cargas y de recolección de datos, lo que permite evaluaciones y resultados en un periodo de tiempo corto. Un buen número de ensayos en APT se han realizado sobre pavimentos con AE, pero el enfoque ha sido principalmente el desarrollo de ecuaciones de transferencia (fatiga o modelos de ahuellamiento), para ser utilizado en el diseño de espesores de pavimentos con AE (Long y Theyse 2002a).

González et al. (2012) investigaron los efectos del contenido de AE en cuatro secciones de pavimento, con un porcentaje común de cemento de 1% en el Canterbury Accelerated Pavement Testing Indoor Facility (CAPTIF) en Nueva Zelanda. El experimento del CAPTIF con AE, mostró que cantidades pequeñas de asfalto aumentan la resistencia al ahuellamiento y reduce deformaciones del pavimento, parte de estos resultados se muestran en la Figura 2-18, además se confirmó que la adición de AE reduce la susceptibilidad a la humedad en los pavimentos.

Se midieron ahuellamientos y deflexiones empleando distintos contenidos de AE y filler, aplicando ejes estándares de 80 kN, de manera controlada en seis secciones de pavimentos (González et al, 2012). Los resultados mostraron que la estabilización con AE tiene un importante efecto positivo en el desempeño del pavimento.

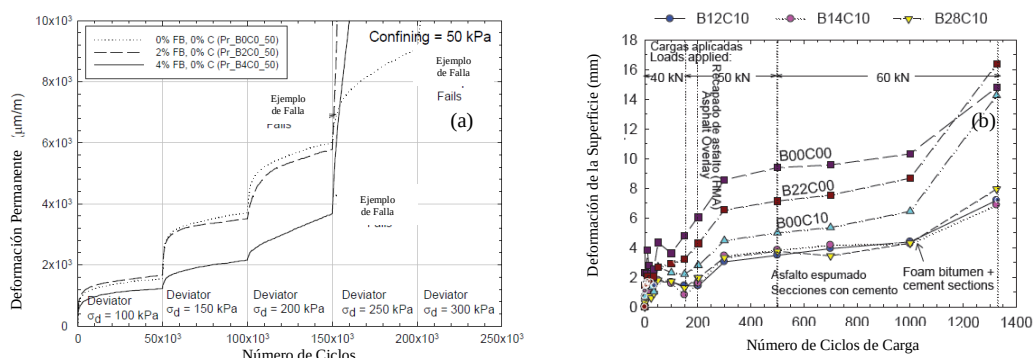


Figura 2-18: (a) Resultados preliminares en ensayos de deformación permanente
(b) Deformación dada en tramos de prueba a escala real

2.5. Resumen de los efectos del contenido AE en ensayos mecánicos

En la Tabla 2-2 se muestra un resumen de tendencias según investigaciones de laboratorio y campo, referidos al contenido de AE.

Los ensayos ITS generalmente muestran un incremento moderado ante el aumento del contenido de AE, mientras que los ensayos UCS, MLTx y RLTx, todos estos que

inducen compresión generalmente disminuyen con el aumento de contenido de AE. Por el contrario, la prueba realizada en CAPTIF mostro claramente que para un aumento en el contenido de AE, existió una mejora en el comportamiento del pavimento (resistencia al ahuellamiento y la deformación del pavimento) y una reducción en la sensibilidad a la humedad. Estos resultados demuestran la contrariedad entra las pruebas comunes de laboratorio y aquellos más sofisticados, identificando sistemáticamente los beneficios de añadir AE y filler activo a las mezclas, poniendo en evidencia la necesidad de realizar más o mejores pruebas que midan mejor los efectos del AE.

Tabla 2-2: Resumen de los efectos del incremento del contenido de AE con un porcentaje de filler activo constante

Autor	Prueba de Laboratorio				Prueba en Pavimento a escala real-carga acelerada	
	ITS	UCS	MLTx	RLTx	Resistencia Ahuellamiento	Deformación
Long and Theyse (2002b)	↑	↓	↓			
Long and Ventura (2004)	↔	↔	↓	↔		
Frobel and Hallet (2008)	↔	↓				
Fu et al. (2008)(1)	↑					
Halles y Thenoux (2009)	↔					
González et. al (2009)	↑			↓	↑	↑
González et. al (2011)	↔		↓	↓		

↔: poco efecto en el rendimiento, ↓: disminuye el desempeño, ↑: aumento o mejora el desempeño, (1): Sin filler activo

2.6. Características generales de los materiales reciclados con AE

La aplicación del AE en materiales para pavimentos, frente al uso tradicional del asfalto y el cemento, se muestra en la matriz de la Figura 2-19 (Theyse et al, 2004), que conceptualiza las características básicas de los materiales en pavimentos, tratados según el tipo y la cantidad del agente aglomerante o estabilizador, cuyas propiedades fundamentales de flexibilidad y deformación permanente varían según el aporte de cada uno. Se identifica el rango de aplicación del AE.

La Guía Sudafricana TG-2 (Asphalt Academy, 2009), para materiales estabilizados con AE, menciona que cantidades excesivas de filler activo puede transformar al material de una forma flexible a un estado frágil. En este estado la fuerza de cohesión dominará, pero, se reducirá de forma significativa una vez producida la fractura. Probablemente esto esté asociado a la deformación y el agrietamiento, pudiendo resultar en un material con grandes pedazos fracturados, con una resistencia a la fricción baja.

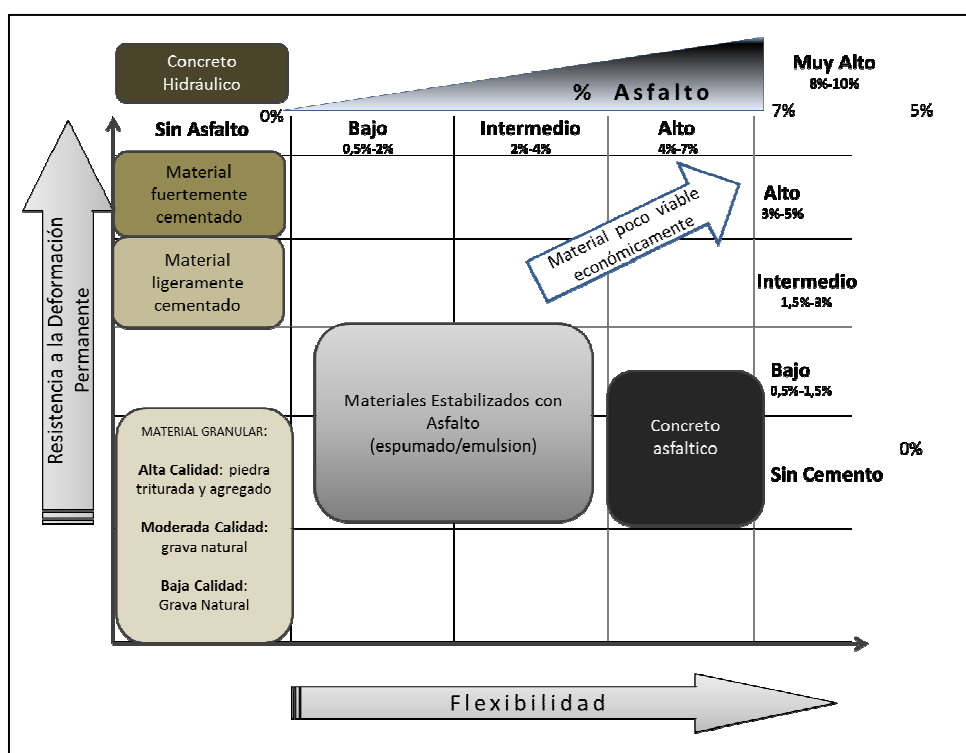


Figura 2-19: Matriz de conceptualización, uso del AE en relación a otros materiales para pavimentos. Theyse et al, 2004

Materiales con una granulometría mala o con áridos degradados arriesgan la resistencia y durabilidad del material. El material con exceso de finos, o filler activo, lo vuelve frágil y pasan a ser altamente susceptibles al agrietamiento y fallo por fatiga. Los materiales estabilizados con asfalto son claramente diferentes a ligados únicamente con asfalto (concreto asfáltico) en mayores porcentajes y cemento (hormigón hidráulico o materiales cementados) en términos de comportamiento y rendimiento. Diseñadores

inexpertos pueden caer en la tentación de compensar algunos problemas a través de una mayor adicción en las cantidades de cemento donde muchas veces terminan siendo perjudicial.

La mezcla de materiales con AE es una combinación de agregados, betún asfáltico, filler activo (cemento o cal), aire y agua, considerando esto, ciertos autores mencionan que el comportamiento de mezclas con AE es similar al de los materiales granulares, pero con una adición de una fuerza cohesiva y una mejora significativa en la susceptibilidad a la humedad, reduciéndola (Asphalt Academy, 2009).

Otras investigaciones, afirman que estas tienen características diferentes a los materiales granulares. En comparación con la mezcla asfáltica en caliente (HMA), las mezclas con AE son más difíciles de analizar por su estructura discontinua (Fu, 2009), especialmente en la condición húmeda, lo cual fue investigado por Fu et al, (2008). El asfalto residual en su interacción con los agregados actúa parcialmente con el agregado, no en forma continua como en una HMA. Los vacíos y la permeabilidad son sustancialmente más altos, por lo tanto las propiedades de mezcla con AE son más sensibles a la humedad (Fu et al, 2008).

De manera a entender mejor este comportamiento, Fu (2009) estudió la microestructura interna según la composición espacial dada por fases individuales en la mezcla, y definió que la misma está formada por (Figura 2-20):

- a) esqueleto de los agregados gruesos;
- b) un “mastic” compuesto por las partículas finas, el asfalto y el filler activo;
- c) finos no adheridos que rellenan los huecos del esqueleto formado por los gruesos.

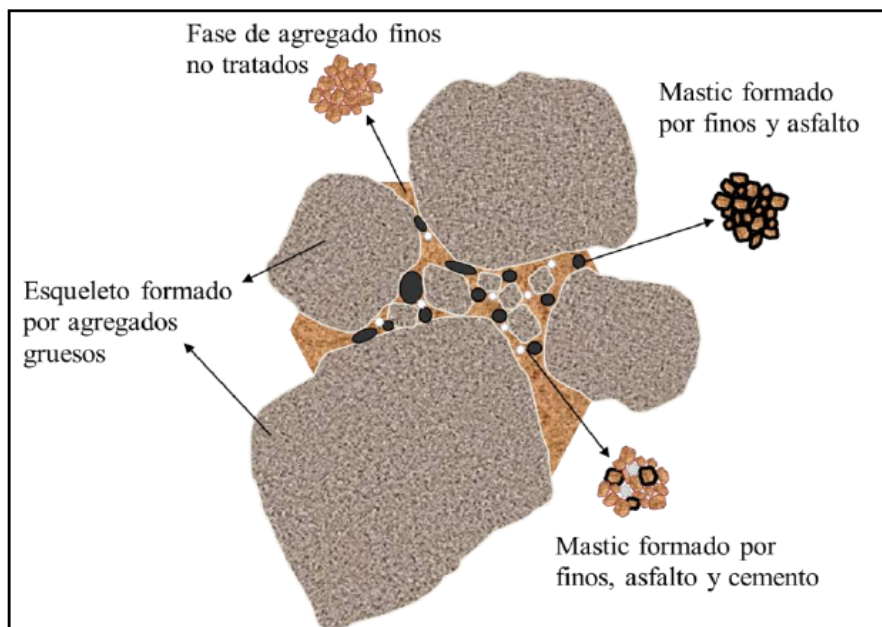


Figura 2-20: Esquema Conceptual de microestructura. Halles et. al, 2012

Dicho de otra manera, los agregados son parcialmente recubiertos por “puntos de soldadura” o “puntos de asfalto” que forman el mastic (Jenkins, 2000). Las partículas finas del agregado son recubiertas parcialmente por el asfalto en su forma de espuma, que luego queda en una fase de asfalto residual, mientras que otra parte considerable la conforman los huecos en el esqueleto del agregado, los cuales pueden estar llenos de partículas minerales sin asfalto (Fu et al, 2008). Investigaciones desarrolladas por Jenkins (2000), mencionan que esta unión “no continua” la hace diferente de otros materiales para pavimentos, donde el asfalto disperso genera un cambio en las propiedades de corte con un incremento del valor de cohesión, mientras que el cambio en el ángulo de fricción interno, el cambio debería ser pequeño. Dicha observación se representa en la Figura 2-21, cuyo gráfico generalmente se obtiene de los ensayos triaxiales de carga monotónica (MLTx).

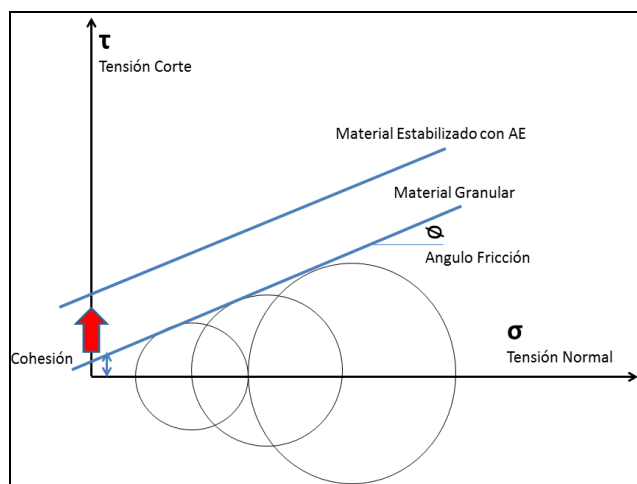


Figura 2-21: Influencia del AE en las propiedades mecánicas. Jenkins et al, 2007

Una investigación llevada a cabo recientemente en el Centro de Investigación de Pavimentos de California (Jones et al. 2008), incluyó una revisión de la literatura, y un gran número ensayos en materiales reutilizados, obtenidos del muestreo de proyectos de reciclado, cuyo trabajo en laboratorio utilizó diferentes tipos de asfaltos, granulometrías, temperaturas, 4 métodos de compactación, variaciones en las condiciones de curado y 4 métodos de ensayos mecánicos (ITS, UCS, Triaxial y Fatiga en Viga de Flexión), además se realizó un análisis de dispersión del asfalto sobre imágenes en las caras fracturadas de probetas ITS. El trabajo de estos investigadores de California, es una contribución significativa al estado de la técnica, sin embargo, gran parte del análisis utilizó mezclas sin filler activo, diferente a la práctica chilena. Concluyen en que los estudios de laboratorio no son del todo completos y que la evaluación en el diseño de mezclas se debe realizar en forma independiente entre el AE y el filler activo.

2.7. Análisis de Tensiones de Pavimento

Las cargas de ruedas del tránsito pesado resulta en una distribución de tensiones en la estructura del pavimento. A medida que el vehículo circula por encima del carril del pavimento se generan cambios en los niveles tensión de menor a mayor valor (Figura

2-22). Todo de cambio tensión tiene un efecto en el comportamiento del material (González, 2009).

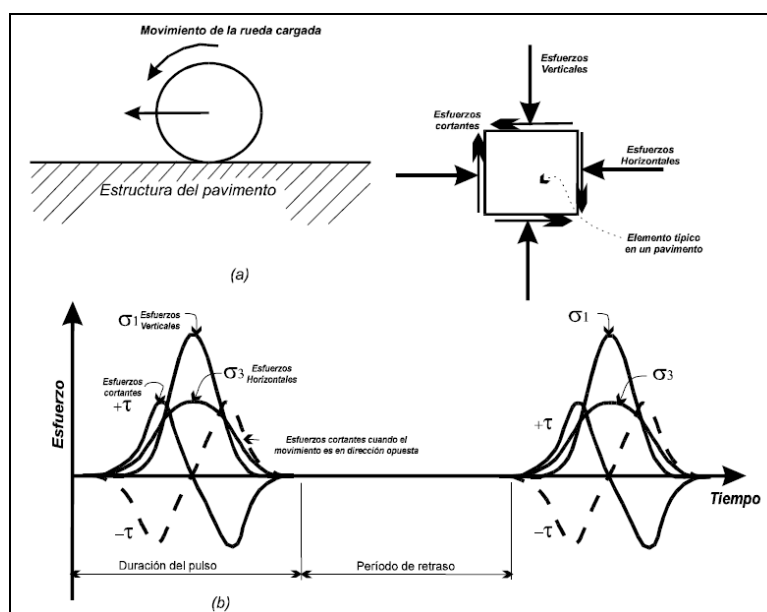


Figura 2-22: Representación de tensiones y pulso de carga por el paso del tránsito en un punto. Garnica et al, 2002

Garnica et al, 2002 (Figura 2-22) interpreta y muestra una simulación del estado de tensiones cuando la rueda cargada avanza sobre un punto y se producen pulsaciones de los esfuerzos verticales y horizontales, acompañados de una doble pulsación del esfuerzo cortante con una señal contraria en el plano horizontal y vertical; aquí también se muestra la relación entre el esfuerzo y el tiempo. Se observa que a medida que el vehículo se acerca al Punto P (Figura 2-22), el esfuerzo cortante describe un comportamiento como una onda senoidal completa.

2.8. Modelo Teórico

La adopción de los ensayos de laboratorio realizados en esta investigación buscó ser justificada respecto a las posibles interpretaciones, motivo por el cual se busca generar un Modelo Teórico (ensayos no tradicionales o complementarios) supuesto.

Cualquiera sea la simulación numérica utilizada en el diseño estructural de pavimentos, esta utiliza algún tipo de característica mecánica que define propiedades del material analizado. Estas propiedades normalmente se obtiene de ensayos mecánicos realizados en laboratorio, que finalmente tienen como objetivo proveer datos relativamente confiables para el diseño estructural.

En este caso se busca identificar mejor el rol del asfalto con relación a la matriz factorial propuesta cuyos ensayos mecánicos se definen más adelante.

Se considera además que en la estructura del pavimento pueden darse los siguientes esfuerzos supuestos que deberían de tenerse en cuenta al momento de caracterizar mecánicamente a estos materiales:

- Resistencia máxima que determine el máximo esfuerzo, dado quizá por una exagerada sobrecarga del tránsito pesado
- Fatiga por la repetición de cargas que somete al material a esfuerzos y deformaciones repetidas
- Módulo Elástico o Resiliente bajo un comportamiento cuya deformación sea idealmente elástica

Estas solicitaciones varían según el tipo y condición (seca, húmeda) del material, profundidad de análisis, condiciones climáticas, entre otros.

Se entiende que la respuesta y comportamiento de los materiales pueden ser distintos según el punto de análisis, por lo que se asume algún tipo de relación con cada tipo de ensayo. Por ejemplo: los ensayos de compresión pueden servir para un análisis de carga inmediatamente debajo del punto de aplicación de carga (rueda), así como los ensayos de tracción que pueden interpretarse en los puntos de máxima flexión o deformación (parte inferior de la capa), entre otros supuestos. Estos supuestos llevaron a pensar cuál de los ensayos podría simular mejor las solicitaciones a las que la estructura del pavimento pueda estar sometida, generándose el siguiente modelo teórico que identifica

un tipo de ensayo según la profundidad de análisis y posible esfuerzo al que esté sometido (Figura 2-23):

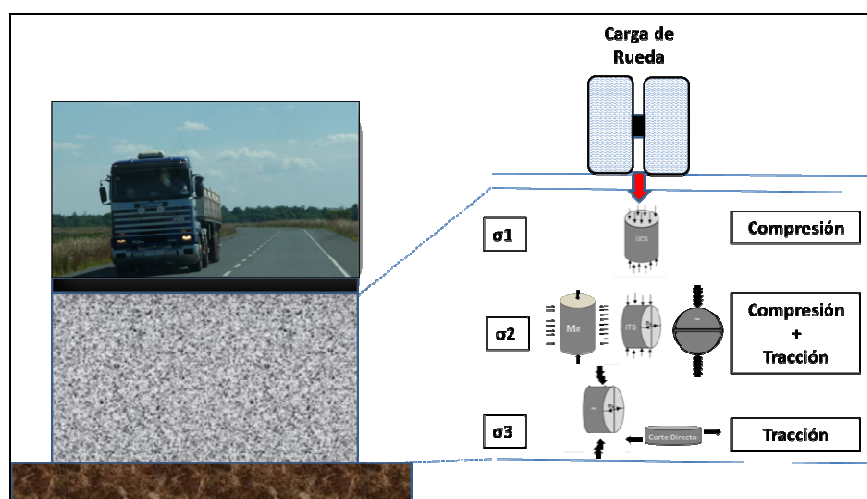


Figura 2-23: Modelo teórico de esfuerzos relacionados entre ensayos de laboratorio y solicitaciones en la estructura del pavimento

Con las suposiciones de esta teoría de esfuerzos muy general se justifica la adopción de otros ensayos que pueden evaluar mecánicamente a los materiales reciclados con AE y cuya vinculación con esfuerzos en terreno es necesario entenderlo. Específicamente según la profundidad de análisis podrían darse los esfuerzos siguientes:

σ_1 = esfuerzos predominantes de compresión o carga vertical de la rueda

σ_2 = combinación de esfuerzos de compresión ($<\sigma_1$) y cierto tipo de tracción

σ_3 = deflexiones máximas que inducen tracción ($>\sigma_2$) o esfuerzos horizontales

Conceptualización de esfuerzos de corte y su evaluación mecánica

Se considera al AE como un agente con la capacidad de ligar o generar unión principalmente en el material fino de las mezclas de pavimentos asfálticos reciclados según la revisión de literatura (Sección 2.6), por lo que el aporte del mismo se puede interpretar con ensayos que evalúen de mejor manera dichos esfuerzos. Normalmente la medición de los valores de cohesión y ángulo de fricción se calculan indirectamente por

ensayos triaxiales bajo sometidos a esfuerzos normales máximos (Ensayos Triaxial Monotónico). El valor C (cohesión) se obtiene en extrapolación de la curva tangente a los círculos de Mohr, cuyo origen está definido por dos valores σ , estos determinan el diámetro (Figura 2-24). Dichos σ , se obtienen en los ensayos triaxiales mencionados. El valor C , en realidad es un valor de cohesión aparente ya que es calculado indirectamente por la extrapolación.

La prueba de corte directo (Figura 2-25a) se utiliza para obtener el valor C (cohesión), nueva para estos materiales, buscando medir propiedades de resistencia al cizallamiento que evalúe mejor al asfalto en las mezclas recicladas. El uso de esta prueba ya se había realizado de manera exploratoria en mezclas con asfalto espumado en la Universidad de Canterbury de Nueva Zelanda. La prueba de la caja de corte es una prueba sencilla y bien conocida en la mecánica de suelos. Un esfuerzo normal (σ_n) se aplica verticalmente a la muestra, y el anillo superior se tira lateralmente ejerciendo la fuerza de corte (τ) hasta que la muestra falla. La carga aplicada y la inducida por la deformación se registra en los intervalos según la configuración y por intermedio de esta se determina la curva de tensión-deformación para la tensión normal adoptada.

En los resultados se obtienen valores de corte para la respectiva tensión normal, cuyos puntos definen la curvatura de la envolvente de resistencia a la cizalladura en niveles de tensión normal, considerados bajos (Figura 2-25b). Estos ensayos se pueden realizar en varias condiciones. La muestra se satura normalmente antes de que se ejecute la prueba, pero se puede ejecutar en el contenido de humedad in situ. Esta prueba representaría esfuerzos de corte máximos en la parte inferior de la estructura de la capa reciclada (Figura 2-23).

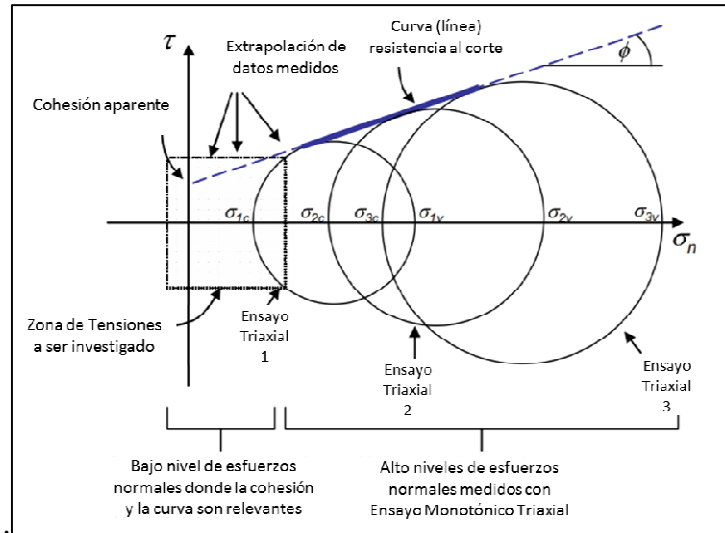


Figura 2-24: Calculo de la cohesión por el ensayo monotónico triaxial

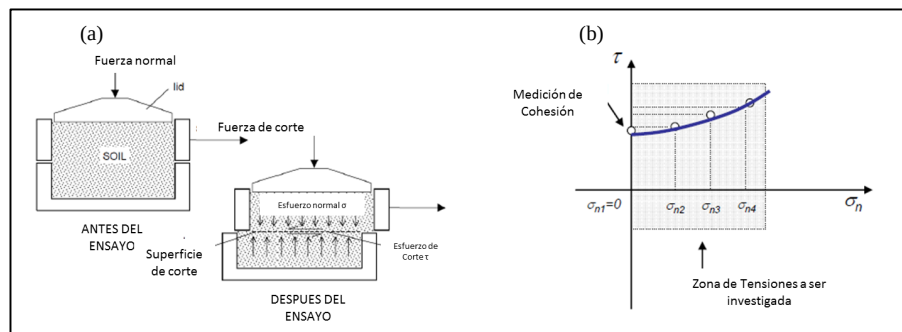


Figura 2-25: (a) Esquema de la prueba de corte directo (b) Zona a investigar y obtención del valor de cohesión

3. MATERIALES Y METODOS DE LABORATORIO

3.1. Introducción

El reciclado en frío de pavimentos flexibles con asfalto espumado (AE) en Chile, tiene como principal ensayo en laboratorio la prueba de Tracción Indirecta (ITS: Indirect Tensile Strength). Este busca determinar el contenido óptimo de AE que resulte con el mejor valor ITS en dos condiciones, secas y/o saturadas, y combinadas mediante la relación entre ambos (TSR: tensión retenida). En el diseño de mezclas normalmente se asumen o definen dosificaciones con un contenido “óptimo” de AE entorno al 2,5%, en un rango entre 2,0% y 3,0% para el caso Chileno. Sin embargo el contenido de cemento es constante y corresponde al 1% del peso total del material a reciclar.

Este capítulo describe el trabajo en laboratorio, resumido en cuatro etapas:

- a. Obtención y separación por tamaño de los materiales reciclados y vírgenes de origen local, uso de equipos en laboratorio y métodos de ensayo
- b. Caracterización del asfalto espumado utilizado
- c. Fabricación de probetas según los tipos de mezclas definidos y ejecución de “Ensayos Tradicionales”
- d. Utilización de mezclas hermanas para la ejecución de “Ensayos Complementarios”.

Se busca obtener resultados mediante ensayos mecánicos según las variables definidas en la matriz factorial (Sección 3.2.1), que sensibilicen ante los diferentes contenidos de AE y que reconozca el tipo de mezcla según la granulometría utilizada y definida por distintos contenidos de finos (Pasante #200).

3.2. Diseño Experimental

El estudio experimental en laboratorio parte en la obtención de materiales que simulen el reciclado profundo de un pavimento asfáltico (Figura 3-1). El reciclado profundo consta de la trituración de dos capas de la estructura del pavimento: carpeta de rodado (CA) y base granular (BG). Los espesores de trituración adoptados se consideran típicos para proyectos en Chile, a los mismos se le incorporan los dos agentes estabilizadores, AE y filler activo, además del agua de compactación.

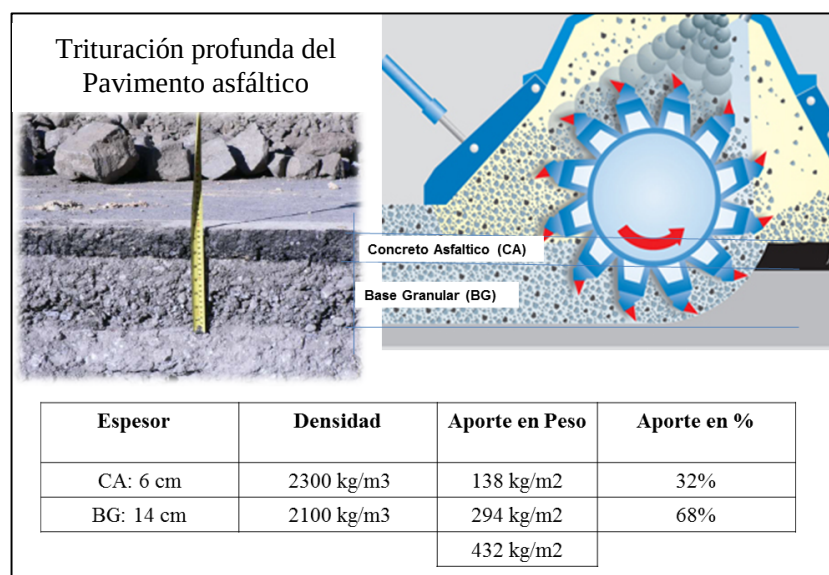


Figura 3-1: Representación del reciclado profundo de un pavimento asfáltico adoptado, con espesores y densidades respectivas. CIIV, 2010; Wirtgen, 2004

Dicha simulación, define el aporte en porcentaje de los materiales triturados. Definidos estos aportes de materiales, se generan las otras variables del diseño experimental (Figura 3-1).

3.2.1. Factorial de Diseño en Laboratorio

Se desarrolló la matriz factorial (Tabla 3-1) para ejecución de ensayos “Tradicionales” y “Complementarios” en laboratorio con cuatro variables, y un número de réplicas que valide estadísticamente cada ensayo.

La matriz definida busca sensibilizar resultados según 6 ensayos mecánicos, para dos variables principales:

- el porcentaje finos del material granular y
- el porcentaje de asfalto espumado incorporado

Cada probeta se construye según la granulometría definida (Tabla 3-2) y adición del estabilizador respectivamente (Tabla 3-1).

Tabla 3-1 Matriz factorial de estudio en laboratorio

Variables		N° Niveles		Valores		
1	Graduación Granulométrica	3	A	5%	% Finos Pasante Tamiz 0,075mm (#200). N=1	
			B	10%		
			C	15%		
2	% Asfalto Espumado	4		0.00%	Agua espumación: 2,5% Temperatura Asfalto a inyectar: 160°C (Ver sección caracterización del AE). N=2	
				1.25%		
				2.50%		
				3.75%		
3	Tipo de Ensayo (asociado al método de fabricación)	5	2 Tradicionales	ITS Φ : 101,6mm; h: 63,5mm Compactación Marshall. N=4		
				UCS Φ : 100 mm; h: 116 mm Compactación Proctor Modificado (PM). N=3		
			4 Complementarios	M _R (Módulo Resiliente) Φ : 100 mm; h: 200 mm. Compactación PM. N=2		
				CD (Corte Directo) Φ : 98,4 mm; h: 22-25 mm Adaptación similar al PM. N=4		
				ITFS (Fatiga por Tracción Indirecta) idéntico a ITS. N=3		
				ITMS (Modulo Dinámico por Tracción Indirecta) idéntico a ITS. N=3		
4	Condición de Ensayo	2		Seco	25°C_2hr en horno	Curado: 72hs a 40°C en horno
				Saturado	25°C_24hr en agua	

Φ : diámetro del molde; N: número de replica

3.3. Obtención y selección de materiales

3.3.1. Agregados

a) Pavimento Asfáltico Recuperado (RAP)

El material RAP fue obtenido del fresado de un pavimento asfáltico deteriorado de la zona metropolitana de Santiago de Chile. El deterioro (Figura 3-2a) se evidenciaba por la presencia de agrietamientos por fatiga y en algunos puntos con depresiones en el material de rodado. El RAP fue acopiado (Figura 3-2b) en un sector cercano al laboratorio y en cada muestreo se buscó evitar segregar al material. La obtención de cada mezcla granulométrica parte del secado, primeramente extendiendo el mismo al sol y luego con la puesta del material en horno hasta obtener peso constante.

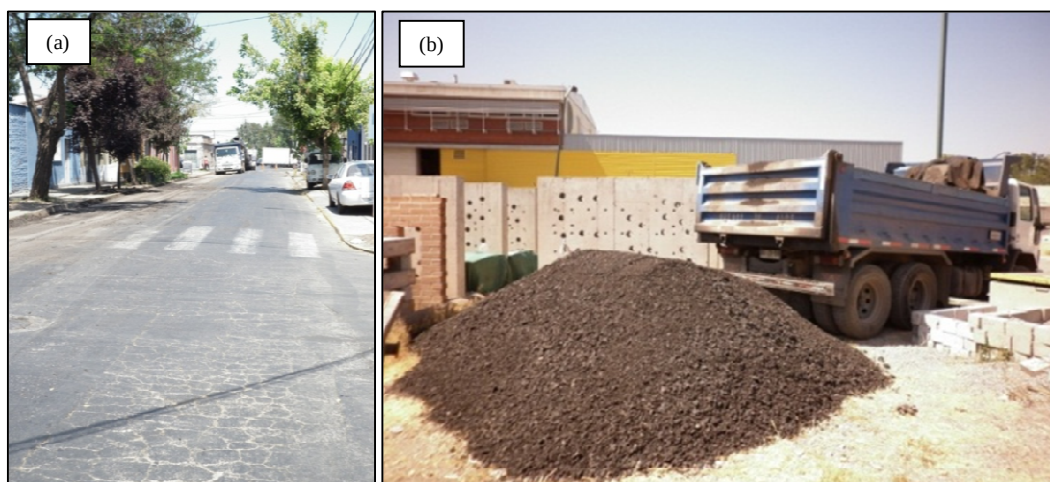


Figura 3-2: (a) Pavimento Asfáltico deteriorado (b) Acopio del RAP fresado

La curva granulométrica del RAP resultó en un material con escaso contenido de finos, cuyos pasantes fueron: # N°4 (4,76 mm) = 38%, # N°40 (0,42 mm) = 3,3%, y #N°200 (0,074 mm)= 0,5%. De manera a reproducir las mismas granulometrías de terreno, en laboratorio, se optó por separar el RAP en tamaños según las distintas aberturas de tamices (Tabla 3-2).

b) Base Granular (BG)

La BG que representa la capa de material de apoyo del concreto asfáltico deteriorado, fue obtenida de una planta comercial de áridos (Zona Metropolitana de Santiago), en tres grupos de tamaños: grueso, medio y fino.

Para construir las tres curvas granulométricas (A, B y C) cuya variación se da en el sector fino, definidas en la Tabla 3-2 y cuyo gráfico se muestra en la Figura 3-3, se optó por separar la BG en los 11 tamaños según el juego de tamices adoptado, de manera a poder reconstruir curvas que varíen únicamente en el sector fino y buscar asegurar la utilización de las mismas granulometrías en la BG durante el transcurso del proyecto de investigación en laboratorio. Además disminuye la variabilidad de los resultados de laboratorio.

Tabla 3-2: Granulometría obtenida (RAP) y adoptada para Laboratorio

Tamiz		TG 2 (Zona Ideal)		RAP	Curvas Paralelas Utilizadas		
		Superior	Inferior		A (Pasa#200:5%)	B (Pasa#200:10%)	C (Pasa#200:15%)
Pulg.	mm	% Pasante					
1 ½"	38.1	100	95	100.0	93.3	93.8	94.2
1"	25.4	100	73	98.0	88.1	89.0	90.0
¾"	19.05	99	66	93.7	82.0	83.3	84.7
½"	12.7	82	54	78.3	68.8	70.6	72.4
3/8"	9.52	74	48	65.0	60.6	62.9	65.1
4	4.76	55	33	37.6	44.4	47.1	49.9
8	2.36	42	24	17.2	32.2	35.4	38.6
30	0.6	28	13	5.0	19.5	23.2	26.8
50	0.3	24	10	2.9	15.4	19.5	23.5
100	0.15	21	7	2.0	10.2	14.7	19.3
200	0.074	18	5	0.5	5.0	10.0	15.0

El RAP se mezcló con la BG para fabricar las tres granulometrías, variando principalmente el porcentaje de finos que pasa el tamiz N°200 (0,075mm): A=5%, B=10% y C=15%. Las distintas granulometrías se observan en las curvas de la Figura 3-

3. Para definir la proporción RAP/BG se considera la simulación de un reciclado pavimento asfáltico, cuyos espesores son: 6 cm de concreto asfáltico y 14 cm de base granular; con un espesor total de 20 cm y un remanente de 6 cm. Los valores adoptados son representativos del reciclado profundo local, definiendo así el aporte de RAP y los áridos vírgenes para las respectivas mezclas (Figura 3-3/Tabla 3-2).

La trituración o pulverización de estas capas del pavimento deben estar dentro de la faja (inferior-superior) granulométrica recomendada. En este caso se adoptó la Guía Técnica Sudafricana (TG2 Mayo 2009): Estabilización de Materiales con Bitumen, cuyos valores se presentan en la Tabla 3-2 y la Figura 3-3.

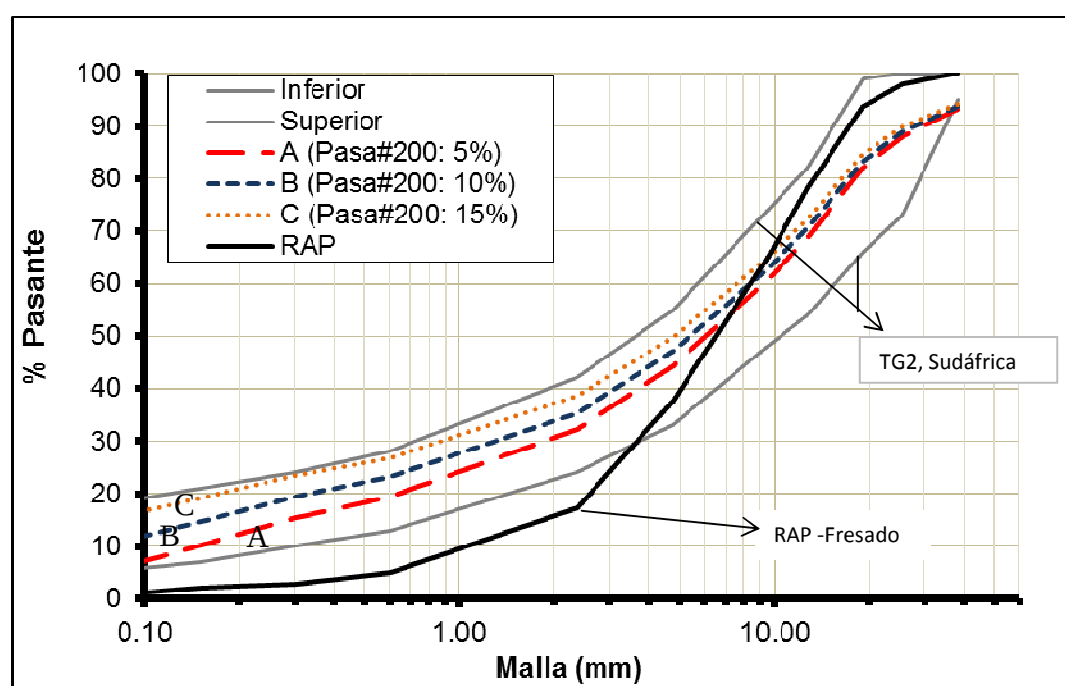


Figura 3-3: Granulometrías de Referencia: faja TG2 recomendada, curva RAP y 3 curvas a fabricar

La separación de áridos (Figura 3-3 tamices principales) se realizó en laboratorio de manera a construir dichas curvas para la preparación de mezclas. Se optó por separarlos por tamaños, de manera a disminuir la variabilidad que pudiese darse en los resultados

de ensayos ante probetas con distintas estructuras granulométricas. La mezcla de los materiales se realizó en el Mezclador WLM 30 que dispone de paletas especiales de mezclado, con un tiempo no menor a 90 segundos.

El trabajo en laboratorio con la mezcla RAP/BG se inicia con la caracterización de dicha mezcla. La falta de finos en el RAP fue compensada con el aporte de áridos, generando mezclas RAP/Árido-virgen en peso, según las 3 curvas definidas. La granulometría del RAP se determinó según el Método 8.202.3 del Manual de Carreteras (Volumen N°8) para tamizar y determinar granulometría.

Al reconstruir la curva granulométrica el aporte a utilizar en cada malla se pesa y adiciona cuidadosamente. Los distintos tamaños están separados en sacos (material grueso) y tarros (material fino), según las mallas definidas, tanto para el RAP y los áridos (Figura 3-4).



Figura 3-4: Acopio de RAP y áridos, separados por tamaños

La determinación de humedad óptima y densidad máxima seca se realizó según el Método 8.102.7 (Método D-Molde 150 mm de diámetro), cuyos resultados se presentan en la Tabla 3-3.

Tabla 3-3: Densidades máximas secas y humedades óptimas s/granulometrías

Granulometría	% Pasante #200 (0,074mm)	Densidad Max. Seca [kg/m³]	Humedad Óptima [%]
A	5	2.220	6.2
B	10	2.245	6.6
C	15	2.225	6.4

La granulometría B, cuyo valor se considera intermedio o ideal dentro de la faja recomendada (TG2), resulta con una mayor densidad máxima de compactación seca, coincidiendo con la propuesta de investigar materiales con diferentes graduaciones.

3.3.2. Cemento asfáltico y capacidad de espumación

El cemento asfáltico utilizado se denomina CA 24, de una única fuente y cuya denominación equivalente según SUPERPAVE (Thenoux y Carrillo, 2002) sería un asfalto PG 64-16. El asfalto es de uso comercial y normalmente utilizado en proyectos de reciclado en frío en Chile. Sus características principales son presentadas en la Tabla 3-4.

Tabla 3-4: Datos del cemento asfáltico

Tipo:	CA 24	Certificado de Control de Calidad	
Proveedor:	AsfalChile		
Ensayos	Resultado	Norma	Especificación
Viscosidad Absoluta a 60 °C	3234	NCh 2336	Min 2400
Índice de Penetración	-0.7	P. Abl/Pen.	Min -1.5 - Mx 1.0
Punto de Ablandamiento (°C)	296	NCh 2338	Min. 232

La capacidad de espumación o espumabilidad del cemento asfáltico (Tipo CA 24) se determinó midiendo el contenido óptimo de agua de espumación y temperatura de inyección, obteniéndose la Razón de Expansión (ER) y Vida Media ($\tau^{1/2}$), conceptos definidos en la Sección 2.2.2. Previo a dicha caracterización, el cemento asfáltico es

calentado a 100°C en horno por lo menos dos horas antes del ensayo. El equipo de espumación se denomina Wirtgen WLB 10 (Figura 3-5a), el cual se utilizó para producir espuma variando los siguientes factores:

- Agua de espumación: 1.5%, 2.5%, 3.5% y 4.5%
- Temperatura de inyección del cemento asfáltico: 150 °C, 160 °C y 170 °C.

La presión de aire fue de 5 bares y de agua 6 bares y en cada inyección de asfalto se incorpora aproximadamente 500 gr de cemento asfáltico. En la Tabla 3-5 se presentan los valores de expansión (multiplicación del volumen original) y vida media (tiempo en segundos de la pérdida de la mitad del volumen máximo).

Tabla 3-5: Caracterización de la espumabilidad del asfalto utilizado

Contenido Agua (%)	Temperatura								
	150 °C		160 °C				170 °C		
	ERm (veces)	τ1/2 (s)	FI	ERm (veces)	τ1/2 (s)	FI	ERm (veces)	τ1/2 (s)	FI
1.5%	7	16	125	6	17	112	6	15	107
2.5%	19	6	217	19	6	192	17	8	224
3.5%	22	6	261	23	7	283	23	6	286

ER_m: expansión media; $\tau_{1/2}$: vida media; FI: índice de espumación

Basados en la caracterización de espuma, se adoptó una temperatura de 160 °C y un contenido de agua del 3.5% (máximo recomendado por TG2) para las mezclas con AE. Nótese una diferencia marginal con FI: 286, siendo una práctica común en Chile utilizar 160°C con 2.5% de agua de espumación.

El cálculo de FI (Índice de Espumación), se obtiene de la fórmula:

$$FI = A_1 + A_2$$

$$= \tau_{1/2} \times (1/\ln 2) \times (4 - ER - 4 \cdot \ln(4/ER))$$

$$+ ((1 + c) / 2c) \cdot ER \cdot \tau_s \quad (3-1)$$

Dónde: t_s : 5s, tiempo de descarga (segundos); c : ER_m/ER_a relación entre el ER medido y el real, obtenido del retrocálculo (Jenkins, 2000). Adoptándose los siguientes valores:

- Expansión (ER): 23
- Vida media ($T_{1/2}$): 7
- Índice de Espumación (FI): 283. Mínimo recomendado FI: 257

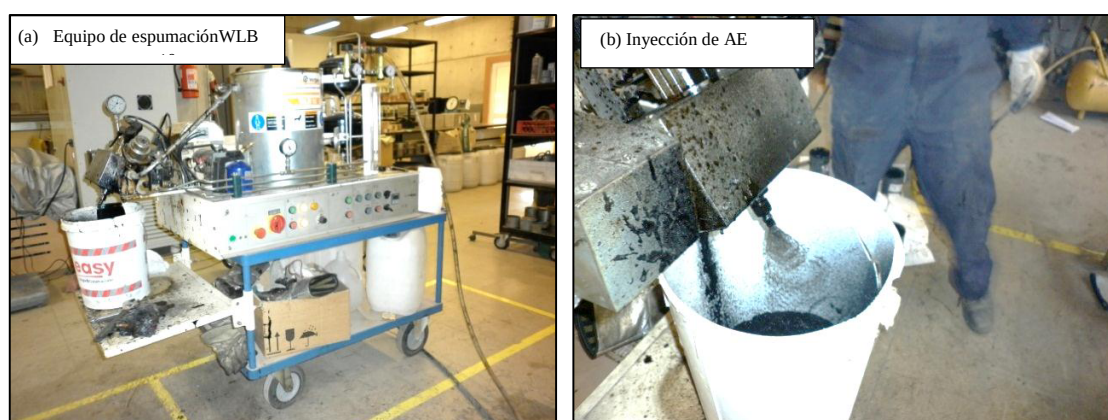


Figura 3-5: Generación de Asfalto Espumado en laboratorio

Se cumple con los mínimos recomendados, los cuales se presentan en la Tabla 3-6.

Tabla 3-6: Valores obtenidos en la caracterización del cemento asfáltico y recomendaciones

Características del Asfalto Espumado obtenido/Límite mínimo recomendado			
Temperatura del Agregado (Mayor a 25 °C)	Obtenido	MOP 2012	Recomendado TG2
Razón de Expansión [veces]	23	10	10
Vida Media [segundos]	7	5	6
Índice de Espumación	283	No aplica	164-257 (>200 Muy bueno)

3.3.3. Filler activo (Cemento)

El filler activo utilizado fue un cemento hidráulico de uso comercial, denominado especial y comercializado en sacos de 42,5 kg, cuyo stock en laboratorio se renueva aproximadamente cada un mes. En la mayor parte de las mezclas se utilizó un contenido de 1% y en algunas mezclas no se adicionó cemento.

3.3.4. Materiales del Norte de Chile

Se participó en el diseño de mezcla con materiales utilizados en un proyecto del Norte de Chile. La caracterización de los materiales entregó la siguiente curva granulométrica de la Figura 3-6, con una densidad seca máxima de 2.140 kg/m³.

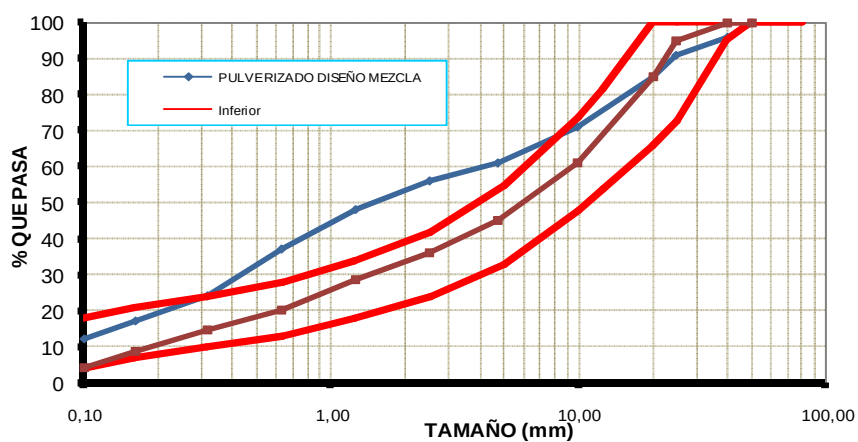


Figura 3-6: Curva granulométrica para el diseño de mezclas con materiales del Norte de Chile

La humedad de compactación de 7% y porcentajes pasantes fueron de:

- Tamiz 3/4"= 85%,
- Tamiz #4= 45% y
- Tamiz #200= 4%

3.4. Preparación de Probetas

Se describen algunos pasos básicos para la generación de mezclas en laboratorio, cuyo objetivo es fabricar especímenes o probetas, para ejecutar ensayos tradicionales (ITS-UCS) y probetas para realizar ensayos complementarios (M_R -CD-ITFS-ITMS).

3.4.1. Proceso de mezclado

1. **Combinación RAP/Áridos**, según la granulometría y aporte en peso por tamaño (Tabla 3-2). Esta composición de material (RAP/árido) simula la trituración descrita en la Sección 3.2. Se debe realizar previo al día de mezcla.
2. **Mezclado RAP/Árido**, en el dispositivo mezclador (Figura 3-7a), se adiciona además el cemento realizando un re-mezclado, seguidamente se incorpora agua y buscando la humedad de compactación (entre 60-80% de la humedad óptima de compactación), dicha cantidad se define en el ensayo de Proctor Modificado. Se verifica la condición humedad al tacto y muestreándola (Figura 3-7b).

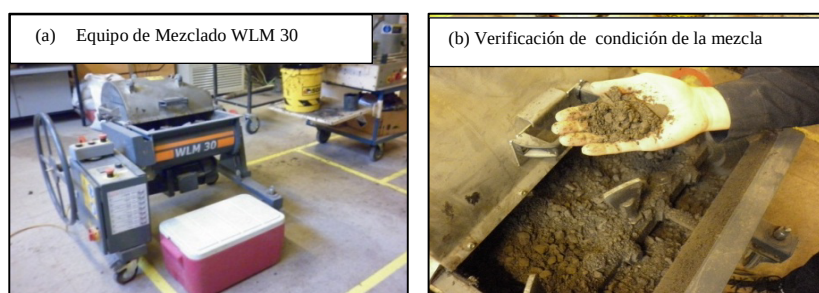


Figura 3-7: Generación de Mezclas con AE

3. **Calentamiento del asfalto y verificación de la espuma**, la puesta a punto del equipo de espumación (Figura 3-5a) está definida por la temperatura del tanque de asfalto y verificación de la calidad de la espuma (combinación del agua, aire y bitumen caliente), donde una vez comprobada la efectiva en la generación del AE, visualmente, se procede a inyectarlo.

4. **Inyección del AE** sobre la mezcla RAP/Árido/Cemento/Agua, en porcentajes del peso de la mezcla (previamente definidos: 1,25%; 2,50%; 3,75%). Previo a la inyección se toman muestras de manera a verificar que la cantidad sea la efectiva.
5. **Inspección y muestreo de humedad**, terminado el tiempo de mezclado (no menor a 90 segundos), se realiza un muestreo para una posterior verificación del porcentaje de humedad de la mezcla.

3.4.2. Proceso de Compactación

La fabricación de probetas se realiza en casi todos los casos a temperatura controlada de laboratorio ($20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$). Finalizada la mezcla, se busca evitar influencia de la temperatura ambiente y pérdida de humedad por evaporación, colocándola en una caja fabricada con aislantes térmicos. El método de compactación y dimensiones de las probetas se muestran en la Tabla 3-7. Aquellas probetas que requieran más de una capa de compactación, después de fabricada la primera capa se procede a remover superficialmente el material de manera a generar continuidad entre las capas de la probeta unida en toda la altura.

Tabla 3-7: Detalle de probetas según el tipo de ensayo

Probeta	Dimensiones	Compactación	N° Réplicas
ITS (Tracción Indirecta)	Cilíndrico ($\phi = 101,6\text{mm}$; $h = 63,5\text{mm}$)	Martillo Marshall 75 golpes x cara	8 (4 Secas/4 Saturadas)
UCS (Compresión Simple)	Cilíndrico ($\phi = 100\text{mm}$; $h = 115\text{mm}$)	Proctor Modificado 25 golpes x 5 capas	6 (3 Secas/3 Saturadas)
M_R (Módulo Resiliente)	Cilíndrico ($\phi = 100\text{mm}$; $h = 200\text{ mm}$)	Proctor Modificado 56 golpes x 5 capas	2 (2 Secas/2 Saturadas)
CD (Corte Directo)	Cilíndrico ($\phi = 98,5\text{mm}$; $h = 25\text{ mm}$)	Proctor Modificado(adecuado) 85golpesx1 capa	3 (3 Secas/3 Saturadas)
ITFS (Fatiga)	Cilíndrico ($\phi = 101,6\text{mm}$; $h = 63,5\text{mm}$)	Martillo Marshall 75 golpes x cara	3 (3Secas)
ITMS (Módulo Dinámico)	Cilíndrico ($\phi = 101,6\text{mm}$; $h = 63,5\text{mm}$)	Martillo Marshall 75 golpes x cara	6 (3 Secas/3 Saturadas)

SR: Razón de tensión

3.4.3. Proceso de Curado

Todas las probetas son puestas a curar una vez desmoldadas. El curado se realiza en horno (con aire forzado) a temperatura contralada de 40 °C durante 72 hs. Luego de curado, aquellas probetas que serán ensayadas en condición saturada son puestas en agua a 25 °C por 24 hs, y aquellas ensayadas en condición seca son puestas en horno a 25 °C o ambientadas a temperatura del laboratorio (20±5 °C).

3.5. Ensayos para la determinación de propiedades mecánicas

Los ensayos se ordenan en dos grupos: ensayos tradicionales y ensayos complementarios.

a) Los ensayos tradicionales fueron:

- Tracción indirecta (ITS: Indirect Tensile Strength)
- Compresión simple no confinada (UCS: Unconfined Compressive Strength)

b) Los ensayos complementarios o no tradicionales fueron:

- Módulo resiliente (M_R)
- Corte directo (CD)
- Fatiga por tracción indirecta (ITFS)
- Rigidez o Módulo Elástico por tracción indirecta (ITMS)

Cualquiera sea el ensayo, en las probetas a ser ensayadas se toman medidas de peso seca o saturada y dimensiones respectivas.

3.5.1. Ensayos tradicionales

a) Tracción Indirecta (ITS).

El ensayo ITS aplica una carga diametralmente de manera vertical, induciendo esfuerzos de tracción horizontal en el centro de la muestra y calculados asumiendo la teoría lineal elástica. Se carga al espécimen hasta la falla o rotura (Figura 3-8).

Las probetas de diámetro nominal de 101,6mm (4 pulg.) y altura de 63,5mm (2,5 pulg.) fueron fabricadas en laboratorio y numeradas según el orden compactación. Se tomaron datos de temperatura ambiente y humedad relativa del aire. Se aplicó el método de compactación Marshall, cada muestra compactada recibe 75 golpes por cara. Se fabricaron ocho muestras por tipo de mezcla, inmediatamente desmoldadas y puestas a curar en horno a 40 °C por 72 hs. Posterior al curado y previo al ensayo, estas son sometidas a dos condiciones, seca y saturada. Las probetas sometidas a condición seca fueron acondicionadas en horno a 25 °C dos horas antes al respectivo ensayo, y las saturadas 24 hs antes en agua también a 25°C. En la condición seca, después del tiempo de curado, se miden alturas (promedio de 4 lecturas) de las probetas y diámetro (constante del molde), así como sus respectivos pesos en gramos.

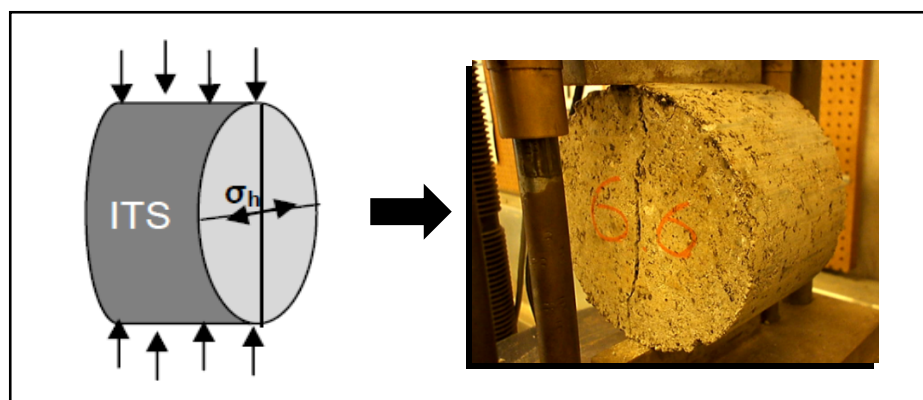


Figura 3-8: Representación de tensiones en el ensayo ITS y modo real de falla

Procedimiento de Ensayo:

El ensayo aplica una carga a velocidad de 50,8 mm/min con lecturas de 0,1 kN de precisión. Las lecturas de deformación en el sentido de aplicación de carga se miden en milímetros con una precisión de 0,01mm. El ensayo ITS se desarrolla según el Método 8.202.3 del Manual de Carreteras de Chile (MOP-Chile, 2012).

Adicionalmente se toman lecturas de deformación vertical en el sentido de aplicación de carga, buscando obtener los gráficos de carga versus deformación. La probeta se somete a la falla o rotura, la cual debe manifestarse de manera aproximadamente diametral para que el ensayo sea válido. Las probetas secas y saturadas están acondicionadas a 25 °C. En todos los casos la temperatura ambiente de fabricación de muestras y ejecución de ensayos se encontraban aproximadamente a los 20°C±5 °C.

b) Compresión Simple No Confinada (UCS).

Los especímenes UCS son cargados axialmente y el esfuerzo de compresión es calculado utilizando el cociente de carga ejercida y área de aplicación de la misma. La aplicación de carga y modo de falla real se muestran en la Figura 3-9.

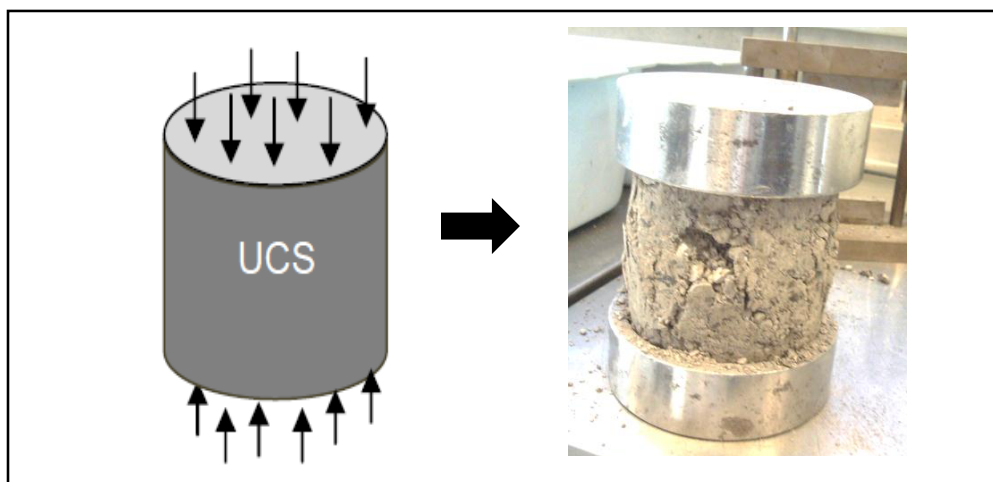


Figura 3-9: Esquema de aplicación de carga en el ensayo UCS y modo de falla

Las probetas fueron fabricadas con diámetros de 100 mm y alturas de 115 mm, cuya relación diámetro/altura cumple $d/h > 0,85$, mencionada en algunas recomendaciones (Jenkins, 2009; Collings, 2012). Se fabricaron 6 (seis) probetas por cada tipo de mezcla, ensayadas en condiciones secas y saturadas. Cada probeta se compactó en 5 capas de 23 mm aproximadamente, donde cada capa recibe 25 golpes del martillo compactador Proctor Modificado aplicado de manera manual. Terminada la primera capa, se

remueven (rayado) los primeros milímetros de la superficie buscando unir la capa ya compactada con la siguiente capa a compactar.

Procedimiento de Ensayo:

En el ensayo se aplica una carga a velocidad de 50,8 mm/min con lecturas de 0,1kN de precisión. Las lecturas de deformación en el sentido de aplicación de carga, se miden en milímetros con una precisión de 0,01 mm y en forma vertical. Para la aplicación de la carga se utilizó el mismo equipo de medición (estabilización Marshall y medidores LVDTs de deformación) que en el ensayo ITS.

El acondicionamiento previo al ensayo es idéntico a la prueba ITS, donde posterior al curado, los especímenes son puestos en dos condiciones, secas y saturadas. Las secas fueron acondicionadas en horno a 25 °C durante dos horas antes al respectivo ensayo, y las saturadas 24 hs antes en agua también a 25 °C. Las fallas en las probetas se dan básicamente de dos maneras, por un hinchamiento horizontal en la zona central, acompañado de grietas verticales que se reflejan de manera paralela entre ellas o por una directa aparición de fisuras desde los extremos hacia el centro. Ejemplo de una de ellas se muestra en la Figura 3-9.

3.5.2. Ensayos Complementarios

a) Módulo Resiliente (M_R o M_{rTx}).

El módulo de resiliencia se define como el cociente entre el esfuerzo desviador aplicado (σ_d) y la deformación unitaria elástica en cada ciclo de carga (ϵ_r). El estudio del módulo resiliente se ha desarrollado a partir de ensayos triaxiales dinámicos con carga repetida. Este ensayo consiste en someter a una probeta de material a un estado de esfuerzos, compuesto por una presión de confinamiento y un esfuerzo desviador dinámico (Figura 3-10). Este estado de esfuerzos que pretende reproducir la condición al que se encuentra sometido el material en el pavimento cuando éste es solicitado por las cargas de

vehículos y a su vez confinando. La respuesta del material y sus respectivos datos se definen matemáticamente según la expresión indicada en la Ecuación (3-2) e interpretada gráficamente en la Figura 3-11.

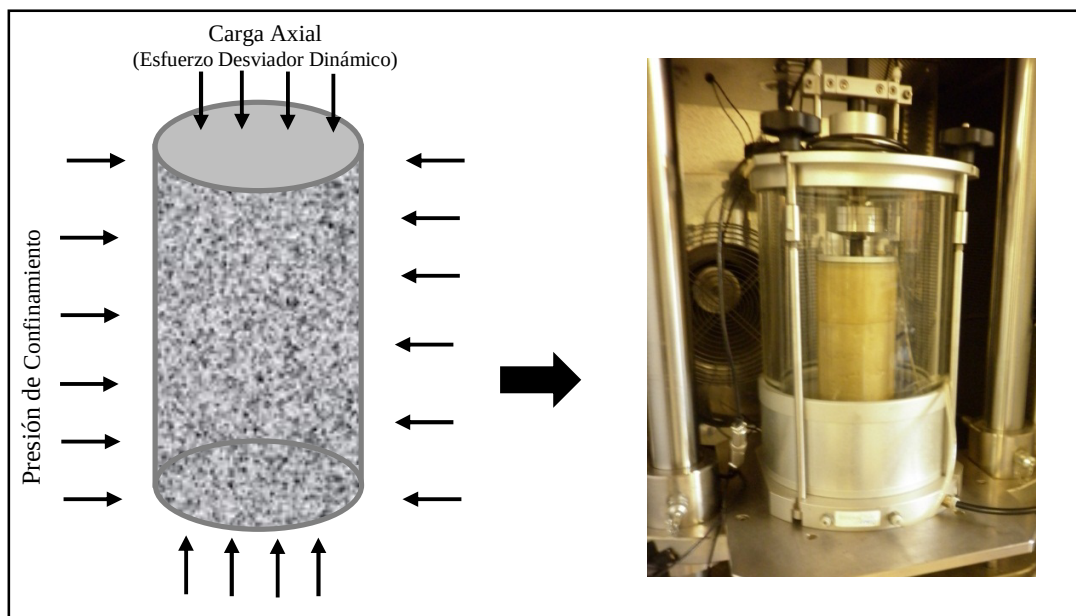


Figura 3-10: Representación ensayo M_R y cámara triaxial de ensayo

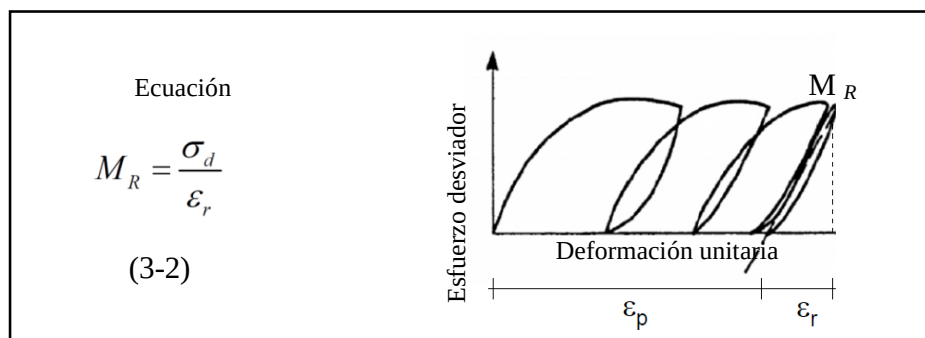


Figura 3-11: Ecuación representativa para obtención del M_R y concepto gráfico del módulo de resiliencia

Dónde:

M_R : Modulo resiliente o modulo elástico del material

σ_d : tensión desviatoria o esfuerzo desviador aplicado

ϵ_r : deformación unitaria elástica; ϵ_p : deformación unitaria permanente

Se fabricaron probetas con un diámetro 100 mm y alturas de 200 mm conjuntamente con las probetas ITS e UCS, todas en las mismas condiciones de humedad y temperatura. Una cantidad de 2 (dos) probetas, ensayadas en ambas en condiciones (secas y saturadas), considerando que no es un ensayo destructivo, las mismas probetas ensayadas en condiciones secas fueron utilizadas para repetir el ensayo en condiciones saturadas. El curado fue igual a los ensayos ITS/UCS, 72 hs en horas a 40 °C y luego acondicionadas a 25°C por 24 hs previas al ensayo.

La compactación de cada probeta se realizó en 5 capas de 40 mm aproximadamente, donde cada capa recibe 56 golpes del martillo proctor modificado aplicado de manera manual. Terminada la primera compactación se remueve la superficie de la parte superior, buscando unir la capa compactada con la capa a compactar. Se tiene un especial cuidado en la terminación de la capa final, la cual debería de estar lisa.

Procedimiento de Ensayo:

Previo al ensayo se procede a acondicionar y verificar que la probeta esté efectivamente sometida a presiones de confinamiento definidas en el procedimiento de ensayo, y que no disponga de ninguna pérdida (presión de aire) o variación en las condiciones de aplicación de carga. Los valores de módulo resiliente están definidos por la aplicación de cargas en pulsos de 0.1 seg, para distintas presiones de confinamiento y para tres cargas desviatorias dadas en 100 aplicaciones. El procedimiento corresponde al descrito en la Norma AASHTO TP46 (Resilient Modulus of Unbound Granular Base/Subbase Materials and Subgrade Soils) (AASHTO, 2000).

Considerando que los ensayos de M_R son pruebas no destructivas, los especímenes fueron ensayados en dos edades distintas con dos equipos de medición distintas:

- EDAD 1: curado (72 hs a 40 hs: 3 meses) + 3 meses = 6 meses. Equipo 1.
- EDAD 2: EDAD 1 + 12 meses = 18 meses. Equipo 2.

El hecho de haber realizado en distintos equipos de medición, quizá se introduce cierto grado de incertidumbre, el primer equipo es un equipo más antiguo frente al otro que es un equipo de medición nuevo. En los resultados se encontraron diferencias significativas que se comentan en descripción de resultados. Los gráficos del ensayo se obtienen de 15 combinaciones de presiones de confinamiento y esfuerzos desviatorias, esta definen la dependencia tenso-dependiente. Estos se grafican (

Figura 3-12) en función de θ ($3\sigma_0 + \sigma_d$) y según los valores de M_R obtenidos de los resultados respectivos dado por comportamientos elásticos que el equipo reconoce.

En los ensayos M_R se optó por definir un valor comparable con entre todos los tipos de mezclas, por lo que se adoptó un rango de valores de θ ($3\sigma_0 + \sigma_d$) en el que se encuentren valores M_R más uniformes o representativos del ensayo. Según los gráficos obtenidos, se promedió valores de M_R para valores de θ ($3\sigma_0 + \sigma_d$) entre 274 y 502 kPa.

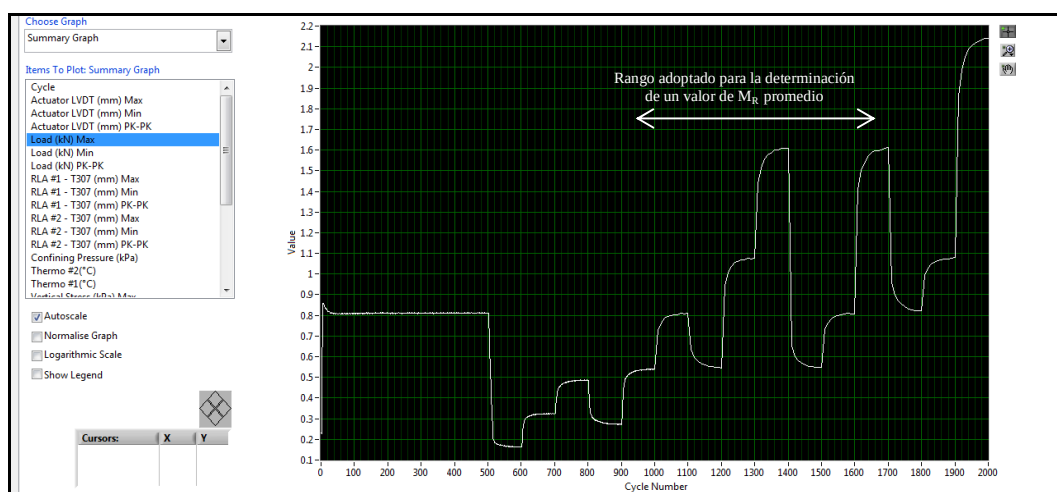


Figura 3-12: Grafico típico de resultados M_R y rango considerado para la obtención de un valor M_R promediado

b) Corte Directo (CD).

En ensayo aplica una fuerza horizontal de corte o cizalla a una probeta cilíndrica sobre la cual se genera un plano de corte, específicamente en la mitad del espesor de la misma. La resistencia al corte se calcula considerando la fuerza aplicada sobre el área del cilindro de espesor determinado. No se aplicó carga normal o de confinamiento como en los ensayos normalmente ejecutados en suelos.

La fabricación de probetas y ensayo no están normalizados para mezclas recicladas con AE, por lo que se buscó priorizar tres aspectos principalmente:

1. Probetas lo más regular posible (terminaciones adecuadas o sin irregularidades)
2. Densidades consistentes, respetando la altura máxima exigida por el equipo (no mayor 1pulg.), considerando además que estas probetas incluyen únicamente material pasante el Tamiz #3/8 (9.52 mm) de las mezclas con AE
3. Replicar condiciones de curado al igual que en los ensayos tradicionales

En la Figura 3-13 se representa el modo de aplicación de la cizalla, así como el dispositivo o caja de corte con la probeta respectiva. Se fabricaron probetas con un diámetro nominal de 98.5 mm y alturas no mayores a 25 mm. El molde cilíndrico de ensayo dispone de un diámetro nominal de 100 mm, motivo por el cual se construyen probetas en otro molde con un diámetro un menor (<100 mm) de manera a que estas puedan colocarse sin ser dañadas.

El material una vez mezclado se tamiza en la malla 3/8" (9.52 mm), utilizando únicamente el material fino que pasa dicho tamiz. Se utilizan cantidades de 410 ± 10 gr en estado húmedo de la mezcla que luego es compactada con el martillo Proctor Modificado, aplicando golpes a una placa o plato de acero que apoya directamente sobre la mezcla de manera a que esta pueda dar una terminación regular o uniforme a la probeta cilíndrica. Por cada mezcla se fabricaron 8 (ocho) probetas para ser ensayadas en condiciones seca y húmeda.

A mayor porcentaje de bitumen, existe una pequeña disminución en el peso del material compactado, siempre que se utilice el material con una misma granulometría. Se aplicaron 85 golpes en una sola cara sobre la placa de acero, debiéndose verificar una vez terminado el número de golpes la altura efectiva de la muestra.

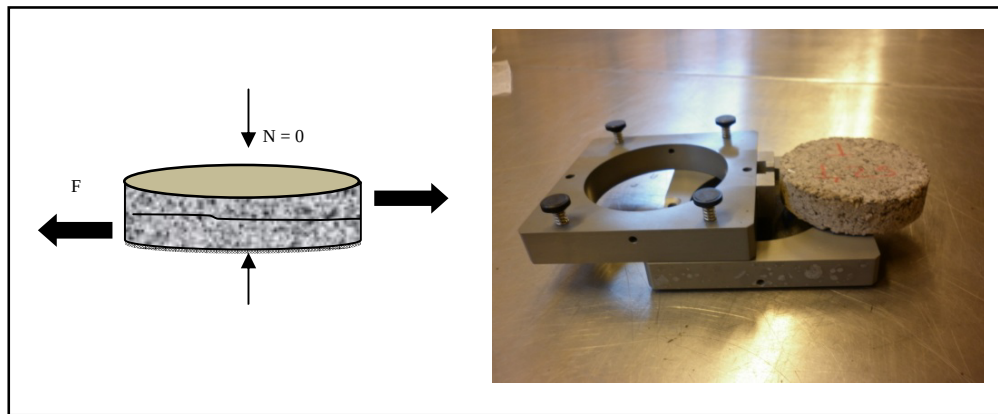


Figura 3-13: Representación del ensayo de corte directo con el plano de falla y dispositivo o caja de corte con probeta ensayada

La placa de acero permite empujar la probeta para el desmolde respectivo. La Figura 3-14 muestra la mezcla tamizada por la malla de corte (Tamiz #N° 3/8).



Figura 3-14: Material retenido y pasante en la malla 9.52 mm

Procedimiento de Ensayo:

El ensayo se ejecutó según la configuración ingresada al software del equipo de corte directo. Sobre esta se definen principalmente tres factores de ensayo:

1. Información de la probeta, como el peso y dimensiones respectivamente
2. La aplicación de carga se realiza en el sentido horizontal, de manera a medir únicamente las tensiones de corte (carga vertical nula). Precisión de 0.1 kN
3. Lectura de datos de tensión y deformación medidas cada 5 segundos con una velocidad de aplicación de carga de 1mm/min.

El procedimiento de ensayo sería una adecuación del ensayo normalizado para medir valores de cohesión en suelos, descrita según la Norma: ASTM Standard D3080-90 (Method for Direct Shear Test of Soil Under Consolidated Drained Conditions). Se obtienen valores tensiones de corte y deformaciones en el sentido de cizallamiento.

c) Tracción Indirecta por Fatiga (ITFS)

Se induce fatiga a una probeta cilíndrica cargándola diametralmente de manera vertical y someténdola a una tensión indirecta contralada en el sentido horizontal, dicha carga vertical se aplica repetidamente. La compresión diametral vertical puede generar una fuerza de tensión uniforme y controlada en el sentido del diámetro horizontal o perpendicular a la aplicación de la carga. La aplicación de carga y la disposición de la probeta de ensayo se muestran en la Figura 3-15.

Las probetas ITFS al igual que las probetas ITS son fabricadas con diámetro nominal de 101,6 mm (4 pulg.) y altura nominal de 63,5 mm (2,5 pulg.). Se aplicó el método de compactación Marshall, donde cada muestra recibe 75 golpes por cara. Se fabricaron 8 (ocho) muestras por tipo de mezcla, inmediatamente desmoldadas y puestas a curar en horno a 40 °C por 72 hs.

Procedimiento de Ensayo:

El procedimiento de ensayo corresponde a una adecuación de la Norma EN 12697-24 (British Standard, 2012a).

Considerando que la probeta apoya en dos cabezales que comprimen la muestra induciendo esfuerzos de tracción en forma indirecta, la disposición de la probeta con respecto a estos cabezales debe ser muy cuidadosa. Sobre el cabezal superior actúa el pistón que va transmitiendo carga en el eje vertical, al mismo tiempo se miden deformaciones en el sentido vertical y por medio de lectores (LVDTs) ubicados de manera horizontal se obtienen variaciones del diámetro horizontal, el cual define al fallo o exceso de deformación. Se supone que la carga aplicada genera una tracción indirecta controlada y constante (adoptado 240 kPa). La aplicación de carga de manera repetida en el cabezal superior permite inducir y medir fatiga ante diferentes niveles de esfuerzo. Previo al ensayo se deben marcar los ejes diametrales perpendiculares de manera a colocar en un mismo eje los cabezales de aplicación de carga (plano vertical) y en el otro los medidores de deformación horizontal (plano horizontal). El número de ciclos de carga-descarga que puede resistir la probeta bajo cierto nivel de esfuerzo, se traduce en gráficos de tensión versus número de repeticiones.

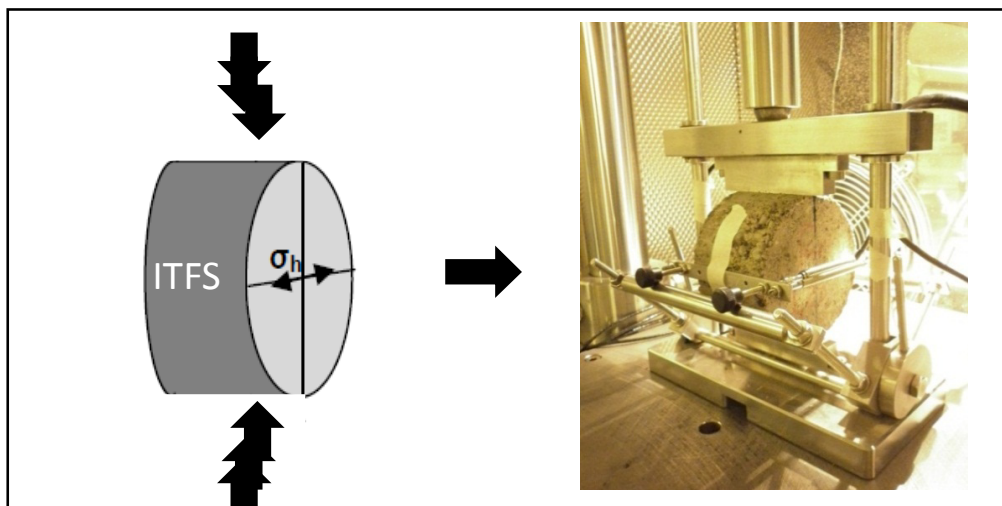


Figura 3-15: Esquema y disposición real del ensayos ITFS

d) Módulo elástico por Tracción Indirecta (ITMS)

El ensayo de Módulo Elástico o Dinámico por Tracción Indirecta (ITMS), consiste en aplicar un número de cargas normalizado (tensiones controladas) y deformaciones bajo un comportamiento lineal elástico.

Inicialmente la probeta es sometida a una etapa de acondicionamiento hasta que el equipo reconozca una deformación elástica y mediante cálculos se obtiene el esfuerzo de tracción indirecta horizontal en la probeta. La medición de deformación horizontal es en el mismo sentido (horizontal). La Norma aplicada corresponde a la EN 12697-26 (Indirect tensile stiffness modulus) (British Standard, 2012b).

Este ensayo está normalizado para medir rigidez en materiales correspondientes a mezclas bituminosas en caliente. La aplicación de este ensayo surgió a partir de la nueva propuesta de australiana, específicamente la recomendación Austroads, 2013. En la Figura 3-16 se muestra la disposición.

Procedimiento de Ensayo:

Una vez puesta que el actuador mecánico y este haya hecho contacto con la platina superior, el equipo reconoce las lecturas de los LVDTs (deformaciones horizontales), e inician 10 aplicaciones de carga de reconocimiento o acondicionamiento identificando el supuesto comportamiento elástico de la probeta. Seguidamente 5 aplicaciones de cargas en que el promedio define el valor del Módulo. Esto se repite en dos posiciones, la segunda varía respecto a la primera en 90 grados.

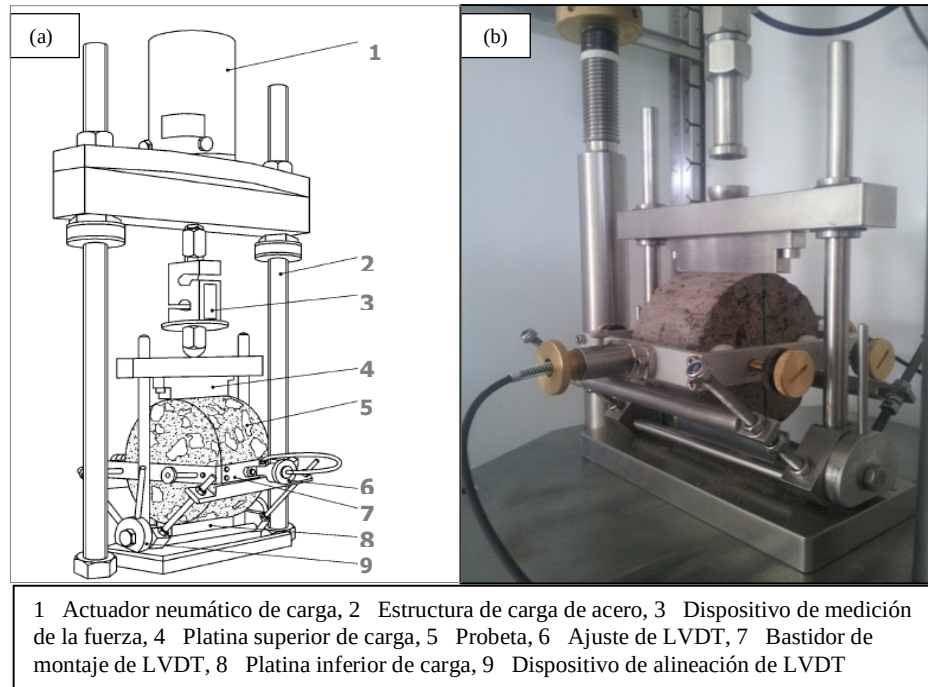


Figura 3-16: Ensayo ITSM (a) Identificación de partes del equipo de medición (b) Disposición del ensayo

4. ANALISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se analizan y describen los resultados de ensayos mecánicos de laboratorio, los cuales se separan en dos grupos: ensayos tradicionales (ITS, UCS) y ensayos complementarios (M_R , ITFS, CD e ITMS), siendo uno de los objetivos principales en esta investigación evaluar y comparar los resultados de dichas pruebas en materiales tratados con AE.

Dentro de las tablas y figuras de resultados se especifican los contenidos en las mezclas (granulometría, porcentajes de AE, etc.), valor promedio de esfuerzo, cálculos de la desviación estándar y coeficiente de variabilidad, además algunas descripciones según la condición de ensayo y observaciones que hayan podido influir en los resultados.

4.1. Ensayos Mecánicos

En todos los casos se comparan esfuerzos y respuestas de los materiales, buscando evaluar principalmente el efecto de dos factores, según sus contenidos:

- Asfalto Espumado: 1.25%, 2.50% y 3.75%
- Material Reciclado (Material Fino Pasante 0,075mm): 5%, 10% y 15%

Se fabricaran probetas según la matriz de laboratorio descrita en el Capítulo 3. Las muestras fueron ensayadas en dos condiciones, secas y saturadas (25 ± 5 °C).

4.1.1. Ensayos Tradicionales (ITS-UCS)

Tracción indirecta (ITS)

La Figura 4-1 resume los resultados de valores ITS en las mezclas (3 granulometrías), cuyos gráficos muestran la desviación estándar asociada a las probetas ensayadas en condiciones secas y saturadas obtenidas del valor promedio 4 roturas, ensayadas según cada una de las variables definidas en la matriz factorial (Sección 3.2.1). Resultados y tendencias se muestra en la Tabla 4-1 y Figura 4-2.

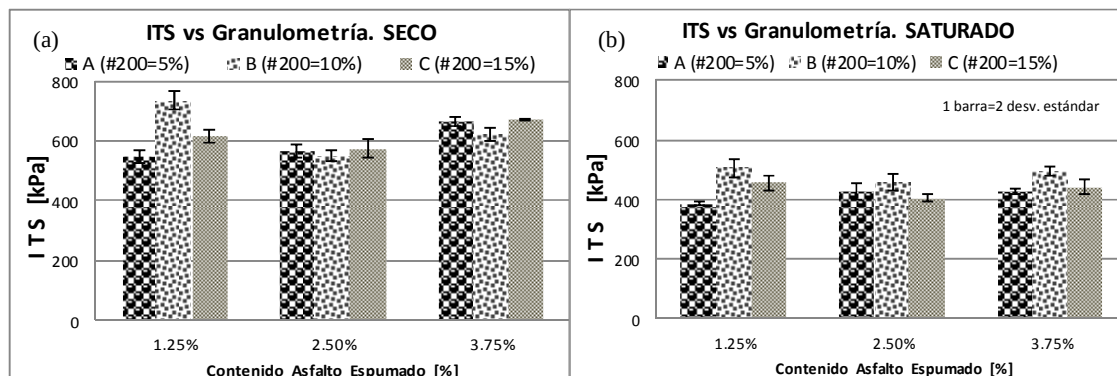


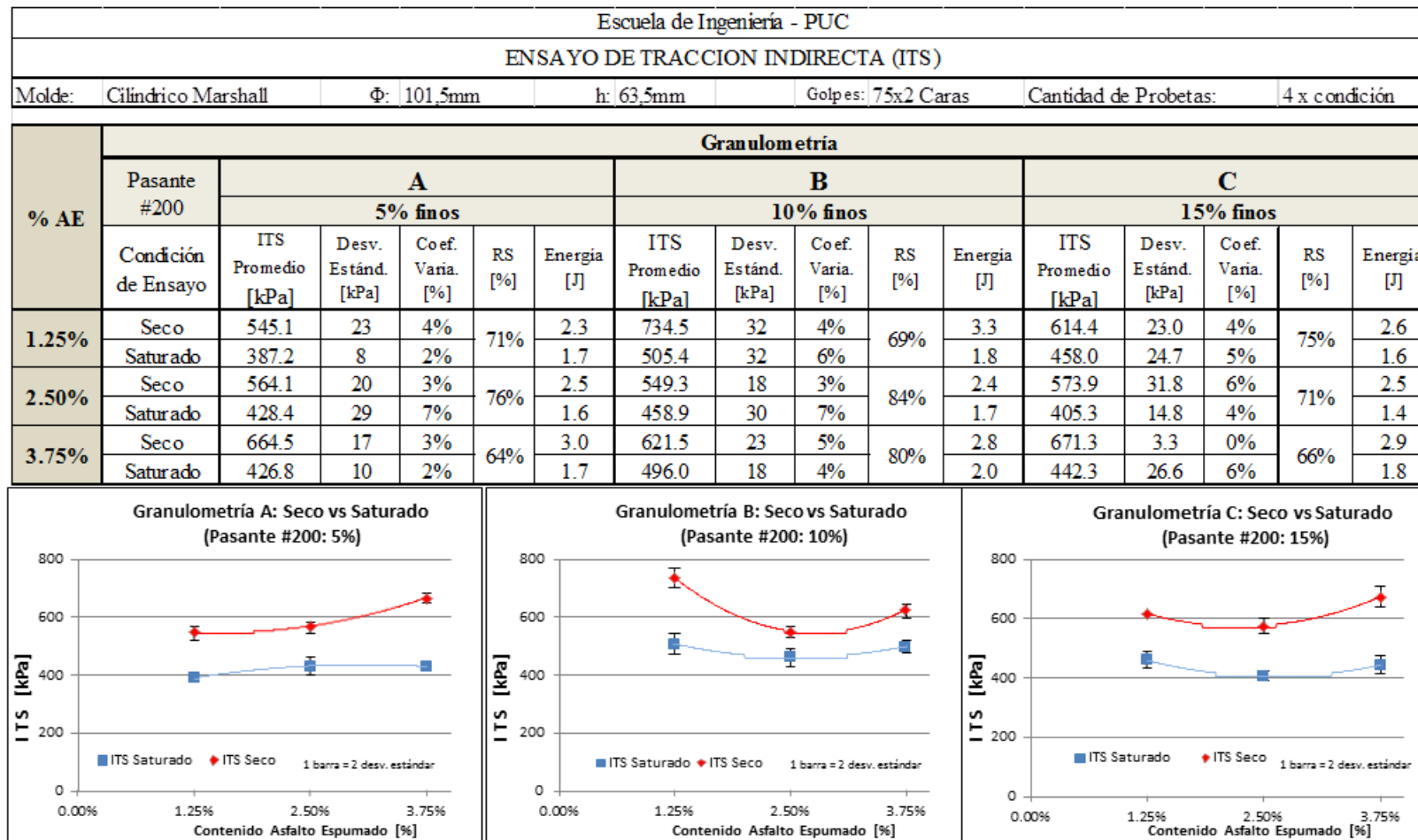
Figura 4-1: Resultados (a) ITS secos (b) ITS saturados

En base a los resultados obtenidos se generan las siguientes observaciones:

- Normalmente se considera al contenido de 2.5% de AE como valor en torno al cual debería estar el óptimo según la experiencia en Chile para ensayos ITS, sin embargo en estos ensayos no se da dicho valor para ninguna de las 3 mezclas (A, B y C).
- De manera general, si bien existen valores de ITS máximos para determinados contenidos de AE, estos no coinciden en un mismo contenido para ambas condiciones de ensayo (seco o saturado) dadas en las tres granulometrías. Esto según comparaciones valores de resistencias ITS y retenida (RS).
- En la Mezcla A se tiene un ITS máximo seco (664 kPa) para un 3.75% de AE, siendo 15% y 18% mayor frente a los otros dos contenidos de 2.5% (564 kPa) y 1.25% (545 kPa) respectivamente. En la condición saturada la diferencia es marginal entre ellos, el ITS máximo (428 kPa) se obtiene para un 2.5% de AE, frente a un ITS (427 kPa) muy similar al de 3.75% de AE. Nuevamente no se identifica variación considerable en el ITS para iguales contenidos de asfalto.

Tabla 4-1: Resultados de ensayos ITS según Granulometría y %AE

Figura 4-2: Gráfico de Resultados ITS secos y saturados según cada granulometría



- En la mezcla Tipo B (#200=10%), contrariamente a las otras dos granulometrías, se obtiene un máximo ITS seco (734 kPa) para un contenido de 1.25% de AE, el cual es 15% mayor al de 3.75% de AE y 25% mayor al de 2.5% de AE; nuevamente en la condición saturada las diferencias son marginales, obsérvese que para dos contenidos de AE no consecutivos (para 1.25% de AE-ITS: 505 kPa y para 3.75%-ITS: 496 kPa), se obtienen valores ITS muy similares. En esta mezcla se obtuvo el mayor valor ITS entre todas las demás granulometrías, tanto seca (máximo ITS: 734 kPa), como saturada (máximo ITS: 505 kPa). Esto válida la relación que, a mayor densidad seca de la mezcla sin estabilizar (2.245 kg/m³), se obtiene mejor propiedad mecánica.
- Si es claro que en las muestras saturadas, la capacidad de resistir tensión y absorber energía (Figura 4-3) es menor, justificada principalmente por la susceptibilidad al agua, sea por un efecto de lubricación entre las partículas, pérdida de cohesión u otro. El criterio de considerar el valor RS mayor, junto con los valores de tensiones en condiciones saturadas, aportan un buen criterio.
- En la Granulometría Tipo B, para un 2.5% de AE se observa una mayor consistencia entre el ITS seco y saturado, cuyo valor RS: 84% (Resistencia Retenida) es mayor frente a las otras mezclas. Respecto a los valores RS, al igual que la mezcla Tipo A (RS: 76%) se tiene un mayor valor para un contenido de 2.5% de AE.
- En la mezcla con mayor contenido de finos, Tipo C (#200=15%), el máximo ITS seco (671 kPa), se da con el mayor contenido de AE (3.75 %), siendo 8% y 15% respectivamente mayores que los valores ITS para 1.25% y 2.5% de AE, de manera similar a la mezcla A, donde la tendencia es la misma. En la condición saturada se tiene un mayor valor ITS (458 kPa) para un 1.25% de AE, por lo que la tendencia es opuesta a la condición seca; sin embargo para este contenido (1.25%) si se da el valor de RS (75%).

- La capacidad de disipar energía esta resumida en la Figura 4-3, la cual se obtiene por el cálculo del área obtenida de la relación carga (kN) versus deformación (mm); con un mejor desempeño en la mezcla B.
- Si es claro que en las muestras saturadas, la capacidad de resistir tensión y absorber energía (Figura 4-3) es menor, justificada principalmente por la susceptibilidad al agua, sea por un efecto de lubricación entre las partículas, pérdida de cohesión u otro.

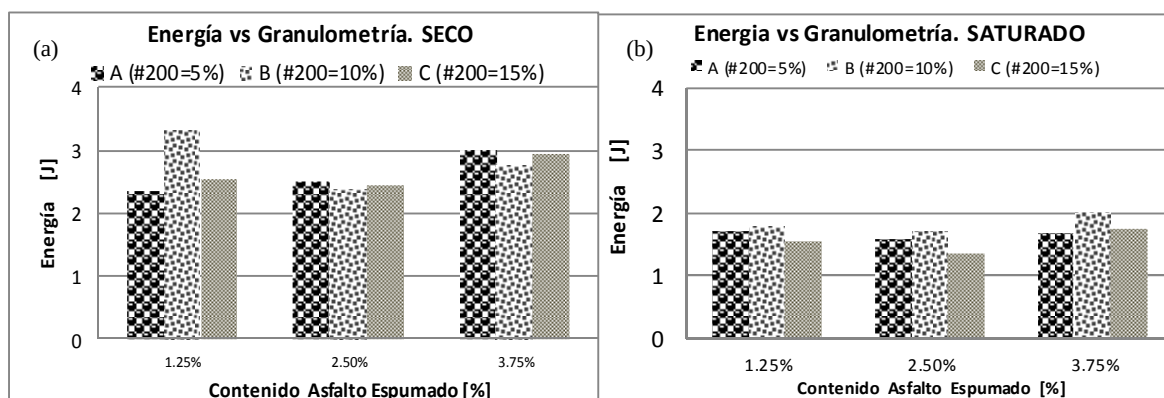


Figura 4-3: Valores de energía s/ Granulometría y %AE. (a) Secos y (b) Saturados

- Los valores de energía, secas o saturadas, muestran mejores resultados para un contenido de 3.75% de AE en casi todos los casos, siendo diferente en el caso de la Mezcla B seca, cuyo máximo de energía se da en un contenido de AE de 1.25%.
- Los valores de densidad de mezclas se muestran en la (Figura 4-4) a continuación, observando la incidencia del AE en las diferentes tipos de granulometría. La primera observación es que mezclas Tipo B (10% Pasante #200) para los tres contenidos de AE muestra las mayores densidades secas. Esto se relaciona con los valores de densidades máximas secas obtenidas en el ensayo Proctor, donde se obtuvo un mayor valor en la mezcla Tipo B (2.245 kg/m³) reportado en el Capítulo 3 y densidades de probetas secas máximas que se muestran en la Figura 4-4. En el ensayo Proctor se utilizaron las mismas mezclas, pero sin la adición del AE y filler activo.

- En la mezcla Tipo C (15% Pasante#200), los cambios de densidad ante los diferentes contenidos de AE son marginales. De menor manera pero con valores mayores en la mezcla Tipo A.

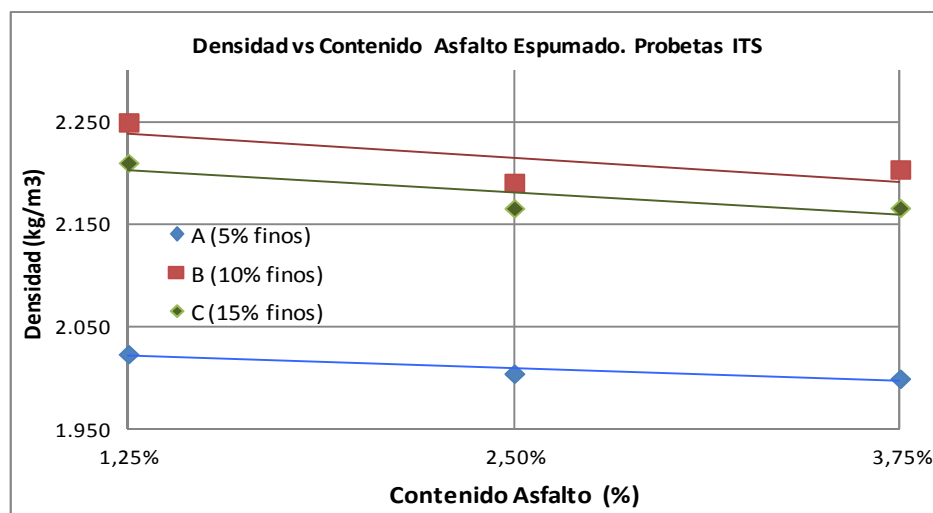


Figura 4-4: Densidades de probetas secas según granulometrías

Caso Mezclas con “solo AE”

De manera a evaluar mejor el rol del AE como estabilizador, se fabricaron probetas ITS con las 3 granulometrías definidas en el factorial de diseño con mezclas “solo AE”, con 5 contenidos de AE y sin cemento.

Un resumen de los valores ITS secos se muestran en la Figura 4-5. Un mayor detalle, así como las tendencias respectivas en cada mezcla se muestran en la Tabla 4-2 y Figura 4-6. La propuesta de ensayar con mezclas solo AE ya se menciona en el Capítulo2 (Fu, et al, 2008).

- Con un 3.75% de AE, las 3 mezclas muestran valores máximos ITS (Secos). La comparación de estas con las mezclas con ambos estabilizadores para este mismo contenido de AE resulta en ITS (secos) menores en las que no contienen cemento, en la Mezcla A disminuye un 43% y en las otras dos mezclas un 33%. En la condición

saturada, esta comparación representa valores de apenas entre un 5% y 15% de los valores ITS con ambos estabilizadores. En la condición saturada además de resultar en valores ITS mucho menores, estos arrojan diferencias marginales entre ellos.

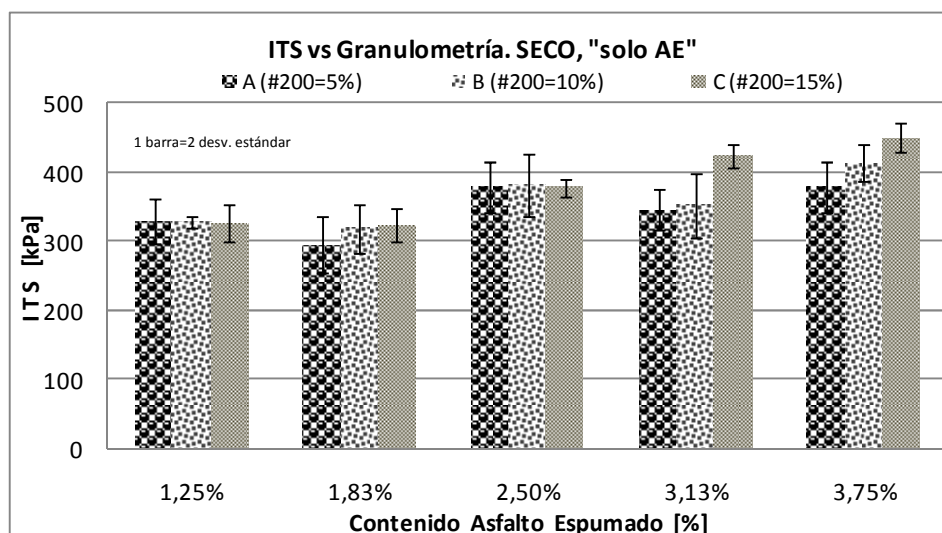
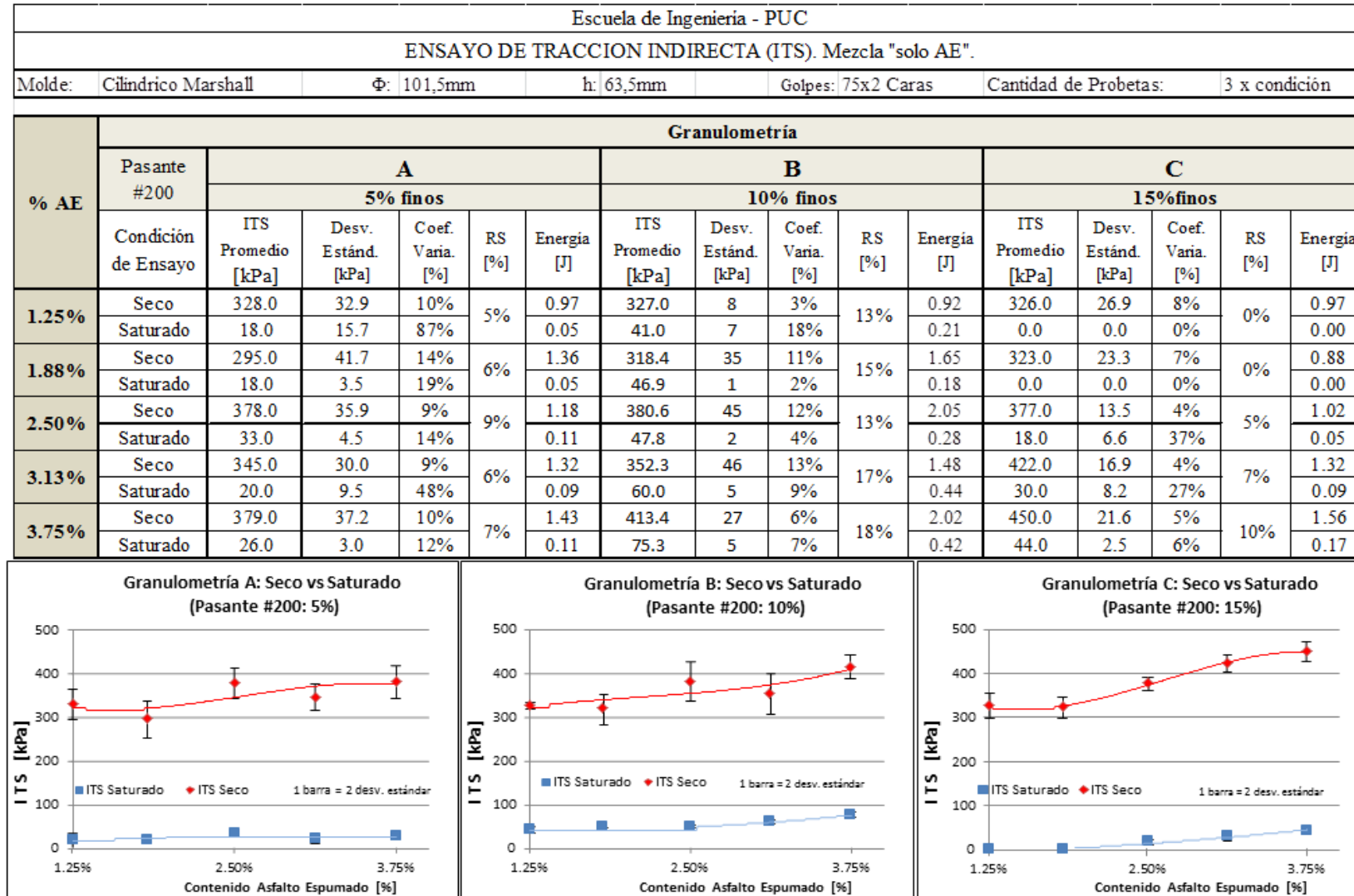


Figura 4-5 ITS Mezcla A, B y C, “solo AE”

- En general, las mezclas “solo AE” son fuertemente afectadas cuando son puestas a saturar, disminuyendo sus propiedades mecánicas en el ensayo ITS independiente del contenido de AE. En algunos casos, estos especímenes (sin cemento) no pudieron ser ensayados, por disgregación de las mismas probetas o por el simple deterioro de las mismas, en especial aquellas cuyo contenido de AE eran menores (1.25%-1.625%). Misma observación se da en mezclas utilizadas para diseños con materiales del Norte de Chile, desarrollada más adelante. El promedio de valores RS es de apenas 8%, siendo 50% el mínimo exigido (MOP-Chile, 2012).
- En estas mezclas, en casi todos los casos en la medida que aumenta el contenido de AE, aumentan también los valores ITS (secos). Dicha tendencia se da en las tres granulometrías.

Tabla 4-2: Resultados de ensayos ITS en mezclas “solo AE” según Granulometría y %AE

Figura 4-6: Gráfico de resultados ITS en mezclas “solo AE” secos y saturados según cada granulometría



- En la Granulometría B, el máximo valor ITS seco (413 kPa) e ITS saturado (75 kPa) se dan para un contenido de 3.75% de AE, cuya comparación frente a las mezclas con ambos estabilizadores de valores ITS: 621 kPa (seco) y 496 kPa (saturado), resultan en una disminución del 33% (413/621) en su resistencia ITS (seco), y en la condición saturada la resistencia con ambos estabilizadores es 6 (496/75) veces mayor, resaltando la importancia del cemento ante la presencia del agua (saturadas).

Caso Norte de Chile.

De manera práctica se participó en varios diseños de mezclas para proyectos del Norte de Chile, en un caso en particular los resultados se resumen en la Tabla 4-3. Los valores ITS obtenidos corresponden al promedio de 3 ensayos en probetas tipo Marshall. Dichos valores se muestran la Tabla 4-3 y Figura 4-8.

Tabla 4-3: Resultados ITS/Diseño de mezclas con materiales del Norte Chile

% Asfalto	ITS Promedio [kPa]				RS	Deformación (mm)		Energía (Área: ITS x Def/2)	
	Seco	Des. estand	Saturado	Des. estand		Seco	Saturado	Seco	Saturado
1.5%	349	8	159	17	46%	0.77	0.87	135	69
2.0%	349	8	189	7	54%	1.18	1.18	206	112
2.5%	346	15	228	10	66%	1.25	1.24	216	141
3.0%	406	9	224	16	55%	0.99	1.20	201	135
3.5%	386	21	237	9	61%	1.14	1.19	220	140
0% AE, 1%Cem	268	12	147	26	55%	0.90	0.87	121	64
3% AE, 0%Cem	254	35	121	18	48%	1.10	1.37	139	83

Dichos resultados incluyen ensayos con porcentajes de AE tradicionalmente utilizados, además de dos mezclas distintas a las tradicionales, una con 3% de AE (con “solo AE”, sin cemento) y otra con 1% cemento (“solo cemento”, sin asfalto).

Nótese que, no se da una relación directa o exacta entre los valores de resistencia ITS y los valores de energía disipada, cuyas diferencias las hace la capacidad de deformar de cada tipo de mezcla. El máximo ITS 406 kPa seco se da con un 3.0% de AE, sin embargo el máximo valor de energía se da con el 3.5% de AE. Para la condición saturada en ambos casos el máximo se da con un contenido de 3.5%.

- En la condición seca, se tiene un máximo ITS con el 3% de AE, el cual no se da dentro una tendencia clara, puesto que el contenido 2.5%, es el menor valor de todos siendo el contenido anterior al 3.0%.

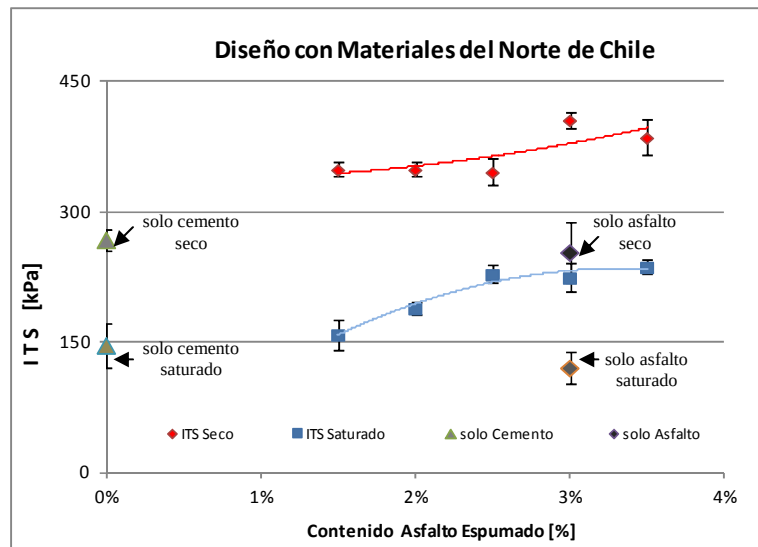


Figura 4-8: Resumen resultados ITS diseño norte Chile

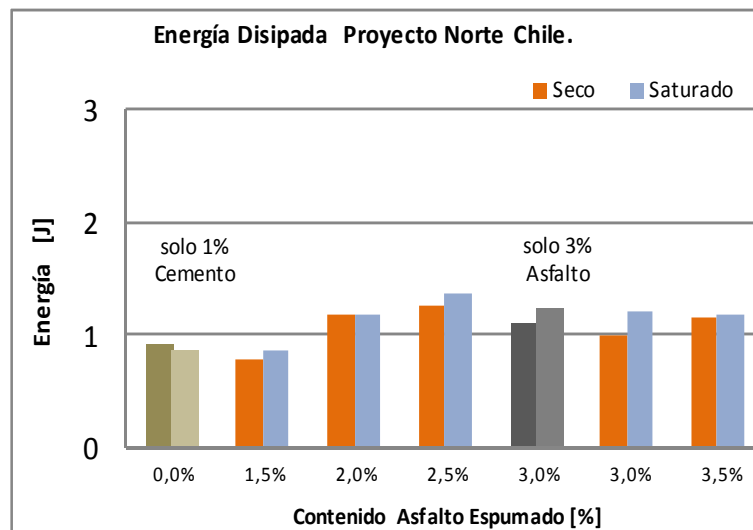


Figura 4-7: Diseño con materiales del norte Chile/energía disipada

- La tendencia de energía disipada no es clara. Inicialmente, en la medida que el porcentaje de asfalto aumenta, la capacidad de disipar energía también, no así para un

contenido de 2.5% de AE, donde la tendencia decrece y luego vuelve a crecer, hasta llegar al máximo para un contenido de 3.5% de AE, igualmente en la condición saturada.

En este análisis se incluye dos mezclas distintas o no comunes, una mezcla con “solo Cemento” (1% Cem.; 0% AE), y la otra “solo AE” (3% AE; 0% Cem.), cuyo objetivo es identificar mejor las propiedades independientes de cada agente estabilizador, generándose el siguiente análisis:

- La capacidad ITS de resistir en estas mezclas, si bien en este caso, los valores de la mezcla “solo Cemento” son levemente mayores al que “solo AE”, considerar que en el material “solo Cemento” aporta mayormente en resistencia (después del curado 72 hs a 40 °C) no es correcto, abriéndose la discusión sobre el aporte en resistencia de cada estabilizador, por lo que debería de profundizarse y seguir investigando.
- En estas mezclas, si existe una clara diferencia en la capacidad de disipar energía, la mezcla “solo AE”, es mayor a la de la mezclas “solo Cemento”, reconociendo que la capacidad de deformar sin llegar a la falla del material con solo AE es mayor a la del material con cemento. Se valida el concepto de que el asfalto aporta la propiedad de ductilidad a la mezcla y el cemento la propiedad de rigidizar (Collings, 2010), atendiendo las propiedades mecánicas en estos materiales, considerando además, que para el caso del asfalto, la propiedad de deformar aumenta notablemente en la condición húmeda. En la Figura 4-9 se muestra la variación en las densidades respecto al contenido de asfalto, notese la disminución del mismo en la medida que aumenta el contenido de asfalto.

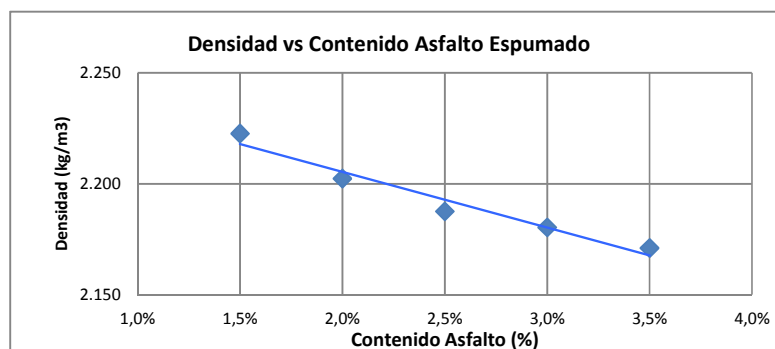


Figura 4-9: Valores de densidades obtenidas en probetas ITS

Compresión Simple No Confinada (UCS)

Los resultados UCS se resumen en el

Figura 4-10 (a) y (b), y cuyos valores se detallan en la Tabla 4-4 y Figura 4-12. Generándose las siguientes observaciones:

- La primera observación de manera general es que los ensayos UCS tienen distintas tendencias a los ensayos ITS. Los valores UCS máximos se encuentran aproximados al contenido de 2.5% de AE, en casi todos los casos (distinto en la mezcla A, seca). Puede observarse que los resultados UCS son más sensibles ante los contenidos de AE, además presentan menor variabilidad que los valores ITS, esto se describe más adelante en el análisis de varianza de los distintos ensayos.

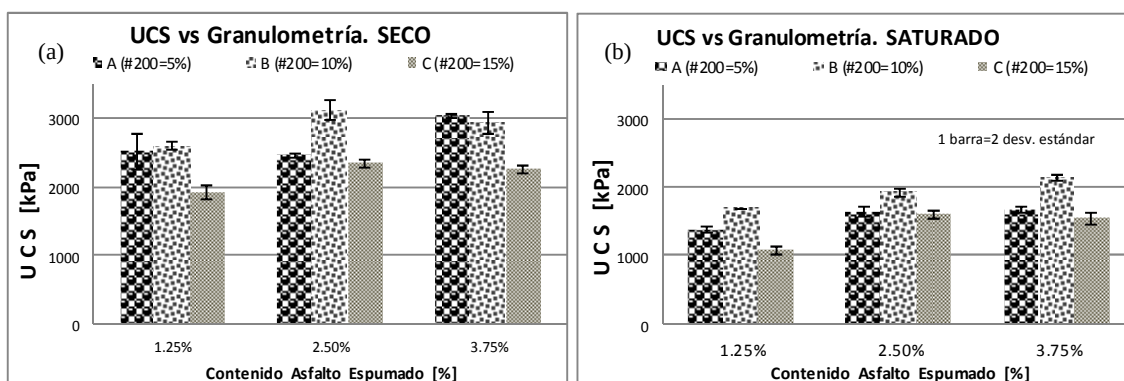


Figura 4-10: Valores UCS s/ Granulometría y % AE. (a) Secos y (b) Saturados

- La mezcla de Granulometría Tipo A tiene como máximo UCS: 3.025 kPa en su condición seca para un contenido de 3.75% de AE, igualmente en su condición saturada (UCS: 1.664 kPa) con una diferencia marginal respecto al 2.5% (UCS: 1.641 kPa). Obsérvese además que para un 2.5% de AE se da el máximo valor RS: 67%, frente a un 55% para 3.75% de AE.
- Siendo la Granulometría B, la de mayor densidad seca (2.245 kg/m³), esta arroja mejores valores de resistencia UCS (seco: 3.112 kPa para 2.5% de AE y saturado: 2.138 kPa para 3.75% de AE). En la condición saturada, los valores UCS aumentan con el

incremento del contenido de AE, siendo el UCS con un 3.75% de AE, 10% mayor al de 2.5% y 22% mayor al de 1.25% de AE.

- En dos tipos de mezclas, la B y la C, se obtienen mejores resultados UCS (secos) para un 2,5% de AE, con valores de 3.112 kPa y 2.342 kPa respectivamente.
- La capacidad de disipar energía se resume en las Figura 4-11 (a) y (b). Habiendo medido valores de carga/deformación en el sentido vertical, se analiza la capacidad de las probetas de disipar energía. La deformación como indicador de un material más o menos flexible, puede aportar al diseño de mezclas, siendo uno de los objetivos poder evaluar estos resultados.
- Las mayores capacidades de disipar energía se dan para un contenido de 3.75 % de AE en los tres tipos de granulometrías, sean secas o saturadas. Nuevamente la mezclas Tipo B, arroja mayores valores de energía disipada, excepto en la mezclas Tipo A, cuyo valor de energía para un 3.75 % de AE es mayor entre todos (137 J) frente a la mezclas B cuyo valor de energía máximo (132 J) también para un 3.75% de AE. En la mezcla C también se obtiene un máximo de 98 J, para un 3.75% de AE.

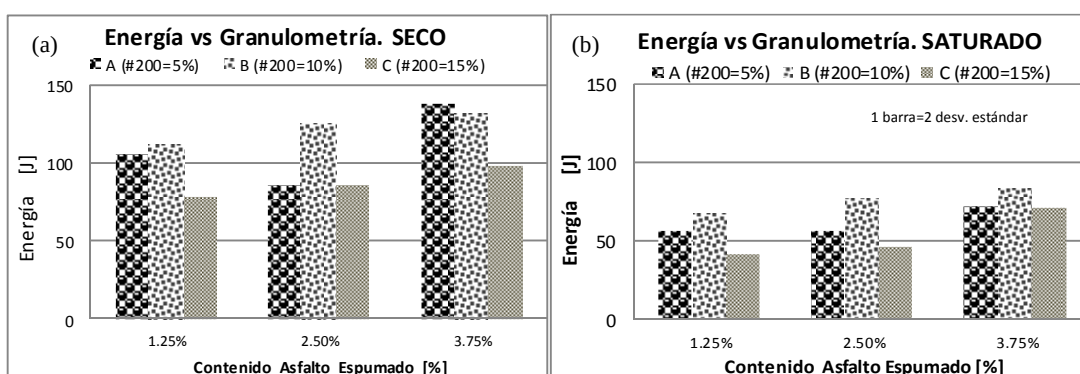
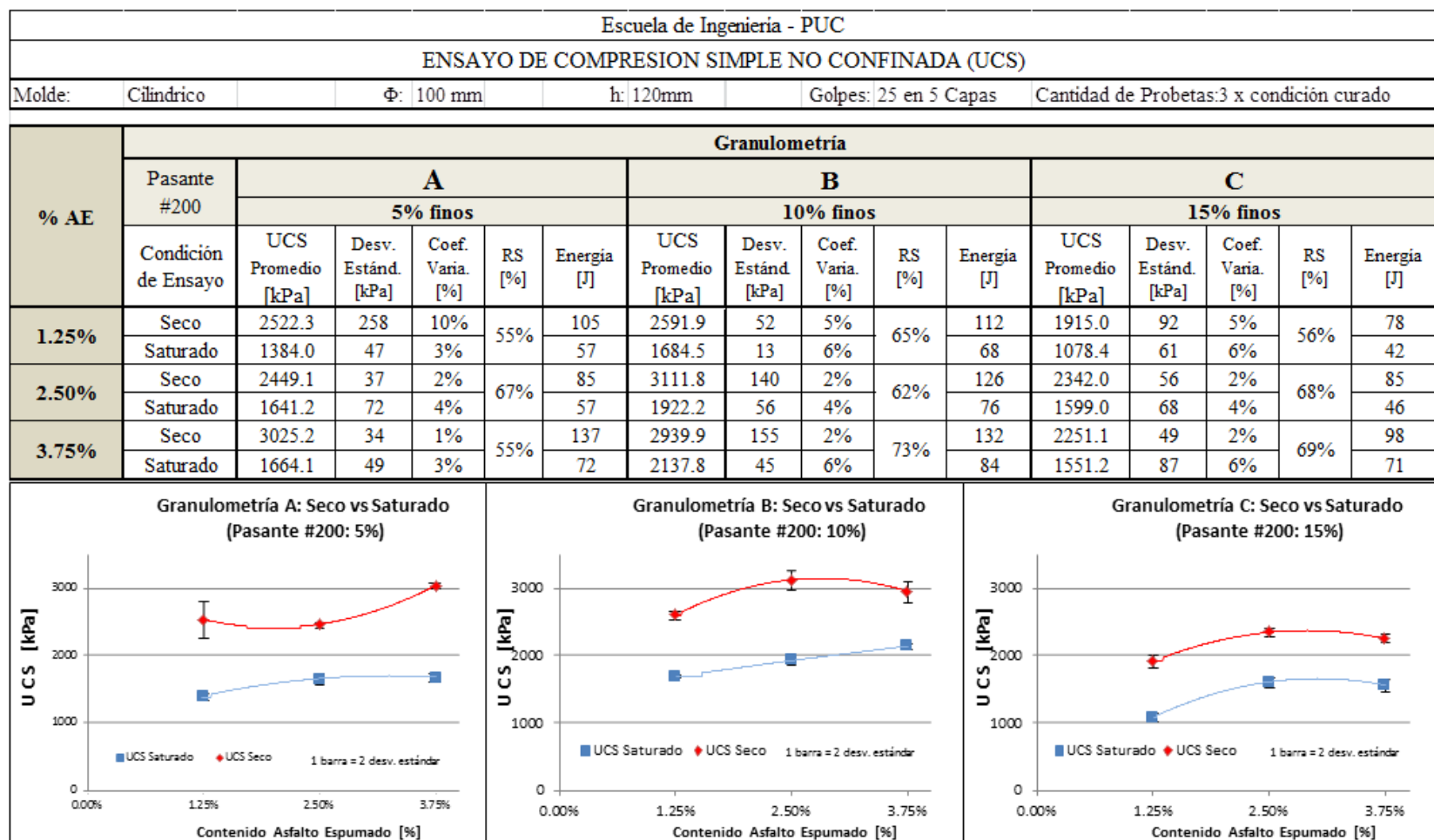


Figura 4-11: Valores de Energía. (a) Secos y (b) Saturados

Tabla 4-4: Resultados de ensayos UCS s/Granulometría y %AE

Figura 4-12: Gráfico de resultados UCS secos y saturados según cada granulometría



4.1.2. Ensayos Complementarios (M_R -CD-ITFS- ITMS)

Módulo Resiliente Triaxial (M_{rTx} o M_R)

Los ensayos de Módulo Resiliente (M_R o M_{rTx}) que se resumen en la Figura 4-13 (a) y (b) son el promedio de distintos módulos obtenidos de los gráficos de ensayos, para lo cual se consideró solo valores de θ ($3\sigma_0 + \sigma_d$) entre 274 kPa y 502 kPa representativos de cada ensayo. Los gráficos del ensayo se obtienen de 15 combinaciones de presiones de confinamiento y esfuerzos desviatorias, esta definen la tenso-dependiente del material. El ensayo fue ejecutado en condiciones secas y saturadas para distintas presiones de confinamiento (AASHTO T307-99 Base or Subbase Material). Considerando que los ensayos M_R son pruebas no destructivas, los especímenes se ensayaron en 2 edades: 1(6 meses) y 2 (18 meses).

Mayor detalle del ensayo (Edad 2) se muestra en la Figura 4-14, cuyas gráficas de valores se dan para las distintas presiones de confinamiento y tensiones desviatorias, además muestra la condición tenso-dependiente. Nótese que los resultados de la Figura 4-13 son referenciales. Los resultados a la Edad 1 se muestran en el Anexo “Resultados ensayo de módulo resiliente triaxial” y fueron calificados con un grado de mayor incertidumbre en el ensayo, debido a que el equipo presento desperfectos técnicos justificados por la antigüedad del mismo.

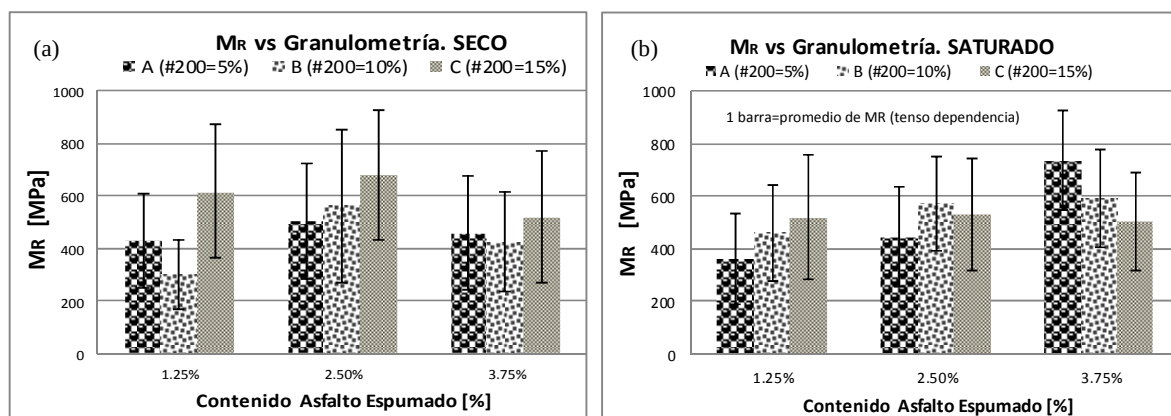
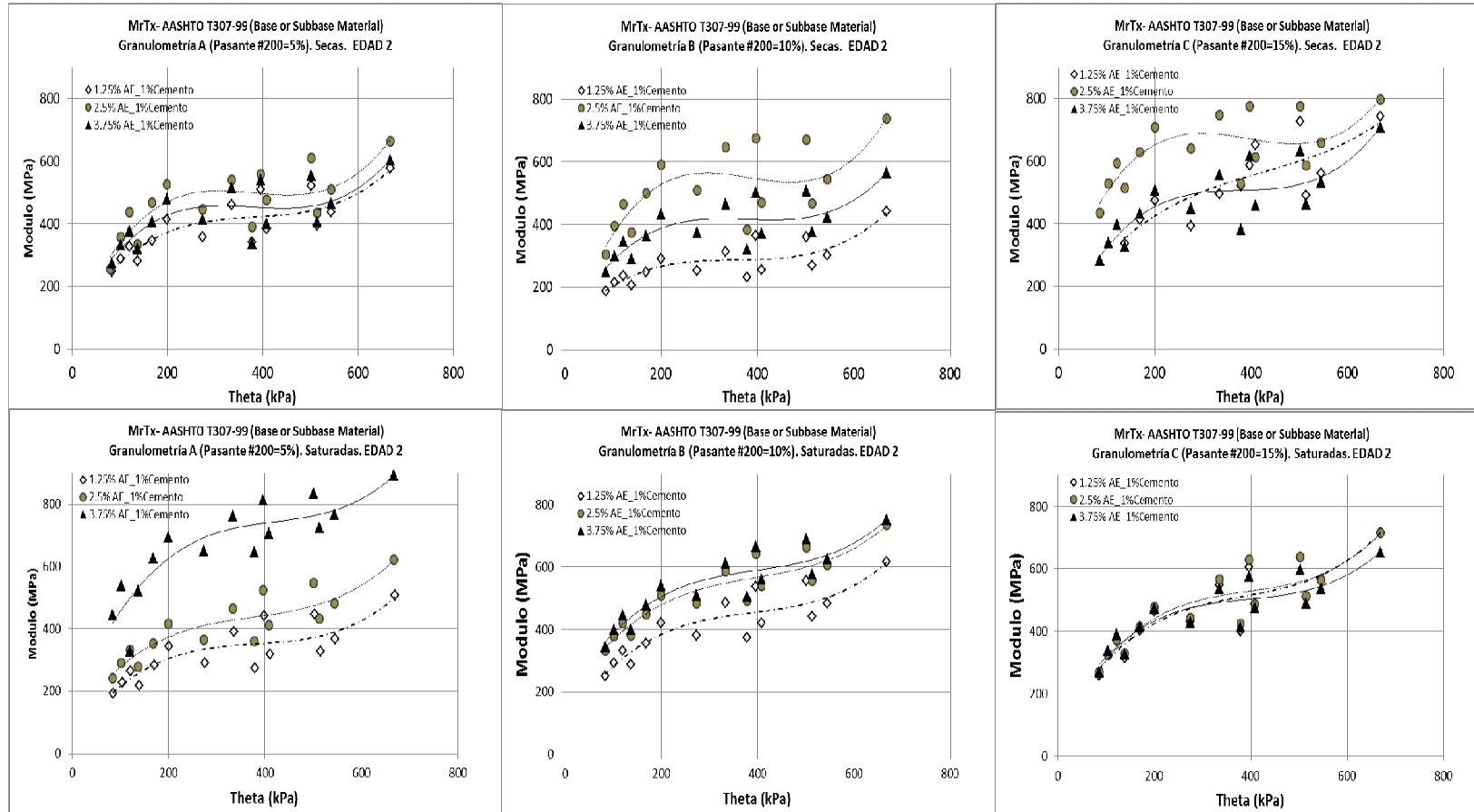


Figura 4-13: Promedio de valores M_R y θ . (a) Secas (b) Saturadas

Se realizan las siguientes observaciones:

- En la Figura 4-13, cuyos valores son un resumen representativo del ensayo, se observa que en la condición seca los valores máximos se dan para un contenido de 2.5% de AE en las tres mezclas. No así en la condición saturada donde a mayor contenido de AE, crecen también los valores de M_R promedios, excepto en el caso de la Mezcla Tipo C, cuyos valores son muy similares para los tres contenidos.
- Se observan diferencias de valores M_R para los distintos contenidos de AE, así como valores máximos en torno al 2.5%. Esta observación no es tan obvia para la condición saturada.
- De manera general, el ensayo de M_R no exige a la probeta a solicitaciones extremas de fallas o no es un ensayo en el que se pueda evaluar al máximo las bondades de ambos agentes estabilizadores, siendo que el ensayo aplica cargas repetidas para un comportamiento elástico o deformación recuperable. Bajo esta exigencia, las mezclas con menor contenido (1.25%) de AE, tienen un menor desempeño en casi todos los casos, evidenciado por curvas con tendencias y valores menores de M_R .

Figura 4-14: Gráfico de resultados M_R vs. Theta θ ($3\sigma_0 + \sigma_d$) secos y saturados en las 3 Granulometrías



- Compárese las diferencias entre los valores dados en condiciones secas frente a las obtenidas en condiciones saturadas, estas no generan diferencias importantes como se da en otros ensayos mecánicos, inclusive en un caso los valores de M_R de la mezcla A (menos finos) en la condición saturada son mayores a la condición seca.
- Una observación importante; cuando existen diferencias significativas de densidades máximas en las probetas pesadas (curadas), estas se deben rehacer, de manera a no generar resultados con criterios y condiciones de ensayo distintas.

Corte Directo (CD)

Los resultados de los ensayos de Corte Directo se resumen en la Figura 4-15, detallan en la Tabla 4-5 y en la Figura 4-16 se grafican las respectivas tendencias. Considerando que el ensayo no está normalizado para este tipo de material, tanto en su proceso de fabricación y de ensayo, esto se describe en el Capítulo 3. Se pretende evaluar mecánicamente a estas mezclas considerando el comportamiento en el sector fino (Pasante #N°8 = 9.52 mm).

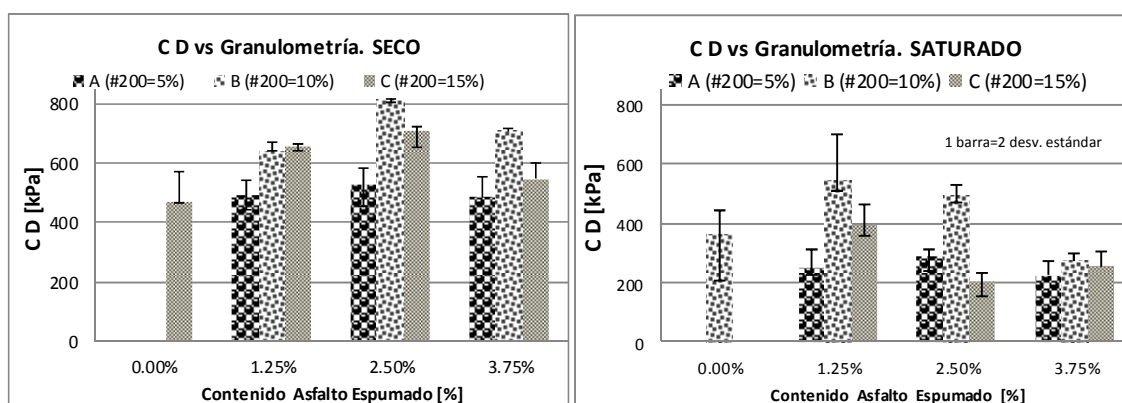


Figura 4-15: Promedio de valores CD: (a) Secas y (b) Saturadas

Se realizan las siguientes observaciones:

- De manera general, las mezclas Tipo B y C tuvieron tendencias con máximos en torno al 2.5% de AE. Diferente es el caso de la Mezcla A cuyos resultados muestran diferencias marginales. Como era de esperar la Mezcla A tuvo un menor desempeño, siendo la de menor contenido de finos (5%) y mayor contenido de vacíos, reflejadas en densidades y valores de CD menores.
- Los máximos valores de CD se obtienen en la mezcla Tipo B, para las dos condiciones de ensayo, secas y saturadas, en el primer caso con 817 kPa (17% mayor al de 3.75% y 22% mayor al de 1.25%) para un contenido de 2.5% de AE y en el segundo con 546 kPa (10% mayor al de 2.5% de AE, 50% mayor al de 3.75% y 34% mayor al de 0% de AE) para 1.25% de AE.
- También se ejecutaron ensayos en mezclas sin AE (solo con 1% de cemento), con valores de 362 kPa en la mezcla B (saturada) y 472 kPa en mezcla C (seca), cuyas diferencias respecto al mayor valor CD respectivo (con filler activo y AE) en ambos casos es del 34% menor para ambas mezclas evaluadas. Dicha observación, abre la discusión sobre la resistencia al corte que aporta el AE y el cemento. Nótese que la mezcla B, sin AE (saturada), es mayor a la que contiene 3.75% de AE, no así frente a los otros dos contenidos. En base a esto se fabricaron probetas únicamente con AE, sin filler, cuyos valores de se discuten a continuación.
- En estos ensayos se tienen máximos en torno al 2.5% de AE y curvas cuyas tendencias muestran sensibilización ante los distintos contenidos de AE. La variación respecto a los distintos contenidos de asfalto se discute en un análisis de varianza de los resultados.

Tabla 4-5: Resultados de ensayos CD s/Granulometría y %AE

Figura 4-16: Gráfico de resultados CD secos y saturados según cada granulometría

Escuela de Ingeniería - PUC																
ENSAYO DE CORTE DIRECTO (CD)																
Cilíndrico Encamisado. Marshall		Φ: 97,5mm		h: 25mm		Comp.: Proctor M.		Muestras: 3 x condición de ensayo								
% AE	Granulometría															
	Pasante #200	A					B					C				
		5% finos					10% finos					15% finos				
		Condición de Ensayo	CD Promedio [kPa]	Desv. Estánd. [kPa]	Coef. Varia. [%]	RS [%]	Densidad Seca [kg/m3]	CD Promedio [kPa]	Desv. Estánd. [kPa]	Coef. Varia. [%]	RS [%]	Densidad Seca [kg/m3]	CD Promedio [kPa]	Desv. Estánd. [kPa]	Coef. Varia. [%]	RS [%]
0%	Seco	-	-	-	50%	-	-	-	85%	-	-	472.1	99.8	21%	60%	-
	Saturado	-	-	-		-	361.9	82		23%	-	-	-	-		
1.25%	Seco	496.4	48	10%	50%	2.045	640.5	32	5%	85%	2.078	658.4	7.0	1%	60%	2.050
	Saturado	247.5	68	27%		2.005	545.7	156	29%		2.104	393.6	69.9	18%		2.185
2.50%	Seco	527.5	55	10%	55%	2.003	817.1	0	0%	60%	2.065	708.7	13.8	2%	28%	2.020
	Saturado	290.6	22	8%		2.015	492.5	37	8%		2.137	201.9	32.8	16%		2.125
3.75%	Seco	486.2	71	15%	47%	1.938	709.3	11	2%	39%	2.039	546.3	56.8	10%	47%	1.991
	Saturado	226.8	48	21%		1.932	274.9	21	8%		2.129	254.7	50.7	20%		2.070

Granulometría A: Seco vs Saturado (Pasante #200: 5%)

Contenido Asfalto Espumado [%]	CD [kPa] Saturado	CD [kPa] Seco
0.00%	250	500
1.25%	260	510
2.50%	290	540
3.75%	230	490

Granulometría B: Seco vs Saturado (Pasante #200: 10%)

Contenido Asfalto Espumado [%]	CD [kPa] Saturado	CD [kPa] Seco
0.00%	360	470
1.25%	550	650
2.50%	500	810
3.75%	280	710

Granulometría C: Seco vs Saturado (Pasante #200: 15%)

Contenido Asfalto Espumado [%]	CD [kPa] Saturado	CD [kPa] Seco
0.00%	400	470
1.25%	400	660
2.50%	200	710
3.75%	250	540

Caso Mezclas con “solo AE”

La variabilidad en los valores de CD para los distintos contenidos de AE fue medida en mezclas sin filler activo, “solo AE”. Los resultados de estos ensayos se resumen en la Figura 4-17. Si bien, se realizaron varios ensayos (4 probetas) por cada contenido de AE, también se realizó el análisis de varianza de estos resultados.

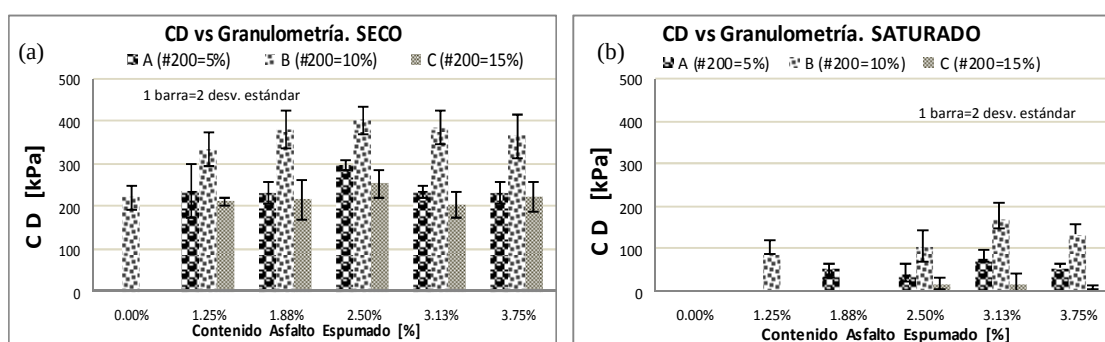


Figura 4-17: Valores de CD en mezclas “solo AE”. Secos y Saturados

- Nótese el efecto del agua en la saturación de este tipo de probetas, las cuales son fuertemente afectadas en su condición saturada (disgregan, deshacen o dañan), en especial en aquellos cuyo contenidos de AE son menores (1.25%-1.875).
- Cualquiera sea el caso, las mezclas B tuvieron mejores desempeños frente a las otras dos mezclas. Generándose a su vez valores de CD máximos en torno al contenido de 2.5%, y en la condición saturada estas resultaron menos perjudicadas.
- Las mezclas con “solo AE”, arrojan valores inferiores a las mezclas que tienen ambos estabilizadores (AE y cemento). Considerando la condición saturada, la mezcla “solo AE” disminuye considerablemente su valor respecto a las secas, y entre ellas las diferencias son marginales.

Tabla 4-6: Resultados de ensayos CD s/Granulometría y %AE

Figura 4-18: Gráfico de resultados CD secos y saturados según cada granulometría

Escuela de Ingeniería - PUC																
ENSAYO DE CORTE DIRECTO (CD). Mezclas con "solo Asfalto" (sin cemento)																
Molde:	Cilindrico CD	Φ: 101,5mm		h: 24mm				Golpes: 50				Cantidad de Probetas:		3 x condición		
% AE	Granulometría															
	Pasante #200	A					B					C				
		5% finos					10% finos					15% finos				
		Condición de Ensayo	CD Promedio [kPa]	Desv. Estánd. [kPa]	Coef. Varia. [%]	RS [%]	Energía [J]	CD Promedio [kPa]	Desv. Estánd. [kPa]	Coef. Varia. [%]	RS [%]	Energía [J]	CD Promedio [kPa]	Desv. Estánd. [kPa]	Coef. Varia. [%]	RS [%]
0%	Seco						220.0	29	13%		0.9476					
	Saturado						0.0	0	0%	0%	0					
1.25%	Seco	235.8	64	27%	0%	0.949	332.1	39	12%	26%	2.394	210.0	11.6	6%	0%	0.657
	Saturado	0.0	0	0%		0.000	87.6	32	37%		0.500	0.0	0.0	0%		0.000
1.88%	Seco	231.0	28	12%	24%	0.776	378.9	45	12%	0%	2.963	214.0	45.0	21%	0%	0.658
	Saturado	55.0	9	17%		0.194			0%		0.000	0.0	0.0	0%		0.000
2.50%	Seco	296.1	12	4%	14%	1.153	400.4	33	8%	27%	3.078	253.0	32.4	13%	7%	0.926
	Saturado	41.0	21	51%		0.169	107.2	34	32%		0.611	18.0	15.9	88%		0.076
3.13%	Seco	234.0	15	7%	34%	0.777	385.0	38	10%	44%	2.989	203.0	32.4	16%	9%	0.657
	Saturado	80.0	18	22%		0.575	170.6	37	22%		0.973	18.7	21.9	117%		0.010
3.75%	Seco	231.0	27	12%	24%	0.777	365.5	51	14%	36%	2.995	221.0	36.1	16%	5%	0.671
	Saturado	55.0	9	17%		0.322	132.7	23	18%		0.757	10.0	4.0	40%		0.073

C D. Granulometría A: Seco vs Saturado
(Mezcla "Solo AE" Pasante #200: 5%)

Contenido Asfalto Espumado [%]	ITS Saturado [kPa]	ITS Seco [kPa]
0.00%	0	0
1.25%	10	240
2.50%	40	280
3.75%	60	230

C D. Granulometría B: Seco vs Saturado
(Mezcla "Solo AE" Pasante #200: 10%)

Contenido Asfalto Espumado [%]	ITS Saturado [kPa]	ITS Seco [kPa]
0.00%	0	220
1.25%	80	340
2.50%	100	400
3.75%	130	370

C D. Granulometría C: Seco vs Saturado
(Mezcla "Solo AE" Pasante #200: 15%)

Contenido Asfalto Espumado [%]	ITS Saturado [kPa]	ITS Seco [kPa]
0.00%	0	0
1.25%	10	210
2.50%	20	250
3.75%	10	220

Fatiga por Tracción Indirecta (ITFS)

Los resultados ITFS se muestran en la Tabla 4-7 y Figura 4-19, realizándose ensayos únicamente en las mezclas con Granulometría B (Pasante #200: 10 %), con 3 pruebas por tipo de mezcla, ensayadas en condiciones secas, obteniéndose un valor promedio representativo.

Tabla 4-7: Resultados de Ensayos ITFS. Granulometría B, secas

% AE	N° Ciclos Promedio	Des. Estándar	Variabilidad	ITFT Referencial	Pendiente últimos 1000 ciclos
1.25	5,375	436	8%	57%	0.012%
2.50	9,455	2,314	24%	100%	0.003%
3.75	7,775	1,957	25%	82%	0.015%

ITFS Referencial: porcentaje respecto al máximo obtenido

El ensayo ITFS, aplica un valor de tensión (ITS) controlada, en este caso se utilizó el valor de 240 kPa y definió un modo de falla para la cual el ensayo se detiene cuando la probeta haya cedido en la longitud del diámetro horizontal en un 65% a su deformación inicial o de acondicionamiento. Se utiliza la norma (British Standard, 2012). El valor de 240 kPa representaría un valor en torno al 30% del valor ITS obtenido en diferentes pruebas y sería un estado de tensión (stress ratio) razonable a la cual pudiese estar normalmente sometido una capa de material reciclado en la estructura del pavimento.

En la Figura 4-19 se observa a modo de ejemplo tendencias según los resultados obtenidos, donde las mezclas con contenidos de 2.5% de AE resisten un mayor número de ciclos: 9.455 ciclos (100%). Sin embargo las mezclas con 3.75% resistieron: 7.775 ciclos, siendo un 18% menor a la mezcla con 2.5% de AE. Igualmente la mezcla 1.25% resistió 5.375 ciclos, 43% menor a las mezclas con 2.5% de AE, siendo en todos los casos la de menor resistencia mecánica.

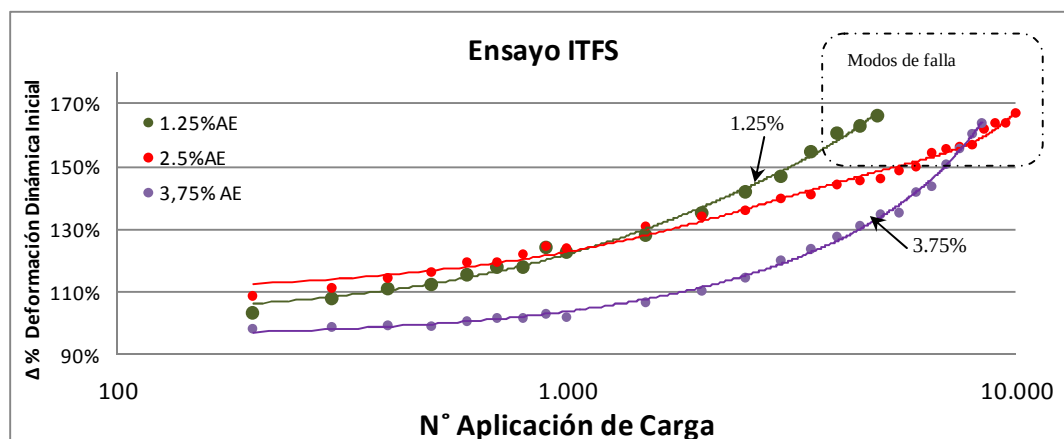


Figura 4-19: Tendencias de valores ITFT. Granulometría B/Secos

Nótese la tendencia de las curvas al final del ensayo, estas definen la los modos de falla del ensayo. En la Tabla 4-7 se indican los valores de las pendientes de las curvas determinados por los últimos 1000 ciclos antes de la falla. La curva con 2.5% de AE, además de resistir un mayor número de ciclos de carga, define una pendiente de curva menor (0.003%) finalizando el ensayo, frente a la curva definida por la mezcla 3.75% cuya pendiente es mayor (0.015%). Dicha diferencia de pendientes puede interpretarse con modos de fallas diferentes, específicamente la probeta 3.75% tiene una mayor fluencia o se deforma más en torno al número de ciclos de falla, sin embargo la mezcla con 2.5% define una falla más consistente o menos brusca que la mezclas con 3.75%. Estas diferencias de falla pueden atribuirse al efecto del contenido del AE en las mezclas, por lo que el ensayo puede inducir a medir mejor dichos contenidos.

Rigidez o Módulo Elástico por Tracción Indirecta (ITMS)

Los resultados ITMS se muestran en la Tabla 4-8, cuyas pruebas se realizaron únicamente en mezclas con la Granulometría B, en probetas secas y saturadas. Las tendencias obtenidas están graficadas en la Figura 4-20.

Tabla 4-8: Resultados de ensayos ITMS en mezclas con Granulometría B

% AE	Granulometría				
	Pasante #200	B			
		10%			
	Condición de Ensayo	ITMS Promedio [MPa]	Desv. Estánd. [MPa]	Coef. Varia. [%]	RS [%]
1.25%	Seco	4248	353	8%	50%
	Saturado	2128	75	6%	
2.50%	Seco	4544	907	3%	62%
	Saturado	2809	76	7%	
3.75%	Seco	4116	752	5%	63%
	Saturado	2573	221	4%	

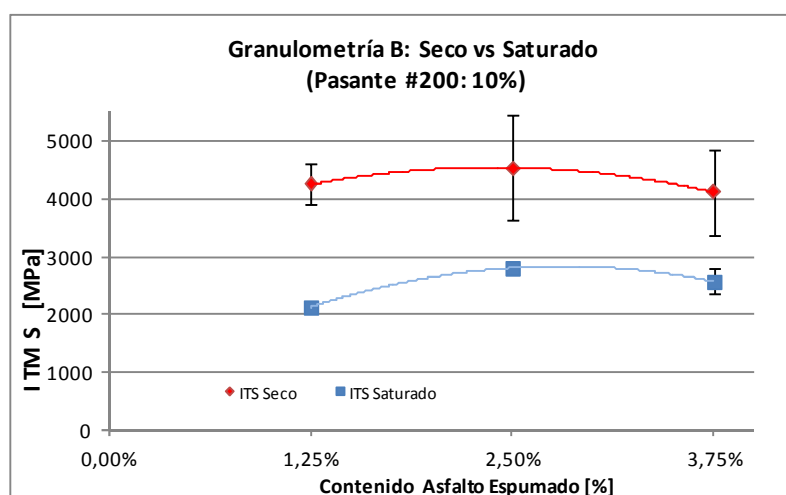


Figura 4-20: Tendencia de resultados en el ensayo ITMS. Granulometría B

Se observan tendencias con máximos en torno al contenido de 2.5% de AE, pero con una variabilidad mayor (valores dispersos) respecto a al promedio. Nótese además, las diferencias marginales entre los valores promedios para cada contenido de asfalto, marginal en algunos casos, especialmente en la condición seca, siendo el mayor ITMS: 4544 kPa para un 2.5% de AE, 7% mayor (4248/4544) al de 1.25% de AE y 9% mayor (4116/4544) al de 3.75% de AE. Sin embargo en la condición saturada las diferencias son mayores en casi todos los casos, siendo el máximo ITMS: 2809 kPa para un 2.5%

de AE, 24% mayor (2128/2809) al de 1.25% de AE y 8% mayor (2573/2809) al de 3.75% de AE. Además se observa una variabilidad menor frente a la condición de seca.

Respecto a los valores RS (Resistencia Retenida), los resultados son más consistentes (mayores porcentajes) corresponden a las mezclas con 2.5% de AE, con una RS: 62% y a la mezcla con 3.75% de AE con una RS: 63%.

4.1.3. Análisis estadístico de los resultados en ensayos mecánicos

La evaluación a los resultados de ensayos mediante un análisis estadístico pretende observar el grado de sensibilización ante los distintos contenidos de asfalto, identificando entre las pruebas tradicionales y la prueba nueva de Corte Directo, cuál de ellas muestra mayor significancia frente a los distintos contenidos de AE adoptados y granulometrías definidas. Para ello se realizó análisis de varianza (ANOVA) para determinar si existe diferencias significativas ante a los cambios en el contenido de asfalto para cada prueba de laboratorio. Las pruebas de ANOVA se realizaron para cada contenido de asfalto y tipo de ensayo. Se calculó un promedio del valor "f" de cada ensayo obtenido de los resultados de los 3 contenidos de asfalto (1.25%, 2.5% y 3.75%).

Los resultados del análisis de varianza muestran que el ensayo UCS son los de mayor significancias estadística ante los cambios en el contenido de asfalto, siendo más sensible a esta variable. La prueba con menos sensibilización ante los cambios en los contenidos de asfalto fueron las pruebas CD. Las pruebas de fatiga (ITFS) y módulo por tracción indirecta (ITMS) no se discuten, dado que fueron realizadas solo para la mezcla Tipo B (10% finos). Resumen de resultados se muestra en la Tabla 4-9.

Tabla 4-9: Resultados promedio del análisis de varianza de los ensayos

Prueba	Condición	Contenido de Filler Activo	"f" promedio
ITS Tracción Indirecta	Seco	1	43
	Saturado	1	5.23
	Seco	0	22.48
	Saturado	0	19.3
UCS Compresión Simple No Confinada	Seco	1	24.82
	Saturado	1	59.41
CD Corte Directo	Seco	1	17.5
	Saturado	1	6.72
	Seco	0	1.81
ITMS * Módulo por Tracción indirecta	Seco	1	0.28
	Saturado	1	11.89
ITFS * Fatiga por Tracción indirecta	Seco	1	2.48

* No se realizaron ensayos en las 3 granulometrías, igualmente se incluye el análisis de varianza

5. DISCUSION

La discusión se genera en base a los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio, así como una interpretación de la relación que pueda darse entre la evaluación mecánica respectiva y las sollicitaciones de estos materiales en terreno. Se compara la influencia de los contenidos de AE y filler activo, analizando las tendencias en cada tipo de ensayo.

5.1. Discusión sobre resultados de laboratorio

5.1.1. Ensayos Tradicionales

En laboratorio en general se utilizaron tres contenidos de asfalto (1.25%, 2.50% y 3.75%) combinados con tres tipos de granulometrías (Pasante#200: 5%, 10% y 15%), esperando un óptimo de AE en torno al 2.50% según la experiencia en Chile.

En el caso de los ensayos ITS se obtuvieron tendencias contrarias a dicha suposición en todas las mezclas ensayadas. Buscando evitar discrepancias en torno al óptimo, se utilizó una tasa de variación del 1.25% entre los tres contenidos de AE, el cual se considera tasa de adición alta, frente al normal de 0.5% utilizado en los diseños de mezclas localmente.

En la Figura 5-1 se muestran tendencias y variaciones de valores ITS y energía disipada para los tres contenidos de AE en la Granulometría B (similar en A y C). Si bien existen valores ITS máximos, en algunos casos la diferencia entre estos valores es marginal, especialmente en los ITS saturados, donde los valores son pocos sensibles ante los cambios de contenidos de AE. La evaluación respecto al contenido de finos del material muestra en la Granulometría B (Pasante #200=10%) mejores valores ITS, lo cual es consistente con la literatura y guías de diseño de asfalto espumado (Asphalt Academy, 2009), considerando que es la granulometría ideal respecto al contenido de finos, tanto en el ensayo Proctor (densidad máxima seca), como en las densidades obtenidas luego de secar las probetas, tal como menciona el Capítulo 4.

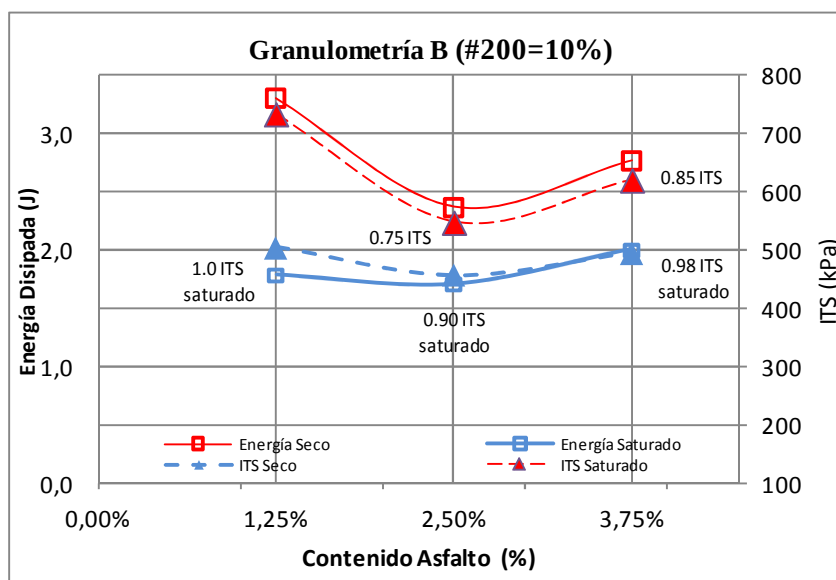


Figura 5-1: Resumen de resultados ITS y energía disipada. Granulometría B

Los valores de energía disipada obtenidos en los ensayos ITS tampoco marcan tendencias claras en esta investigación, se observan similares tendencias a las de resistencia ITS, por lo que medir deformaciones (compresión vertical) en el ensayo ITS, si bien, es un método más de evaluación mecánica, este debe seguir siendo investigado, quizá un buen aporte en este caso podría darse al comparar valores ITS máximos para dos contenidos de AE similares (Ej.: 2% y 2.5%) con los valores de energía. La propiedad de una mayor deformación sin llegar a la falla en estas mezclas podría repercutir en deformaciones o ahuellamientos en pistas tratadas con AE sin agrietamientos. Resultados de energía se muestran en la Sección 4.1.1 (Figura 4-3).

En la Figura 5-2 (a) se muestran tendencias de resultados para la mezcla Tipos B, con asfalto y cemento, en la Figura 5-2 (b) los resultados de ensayos con mezclas “Solo AE” (sin cemento). Comparando los valores ITS entre ambos tipos de mezclas, nótese la diferencia de tendencias entre ambas, resaltando primeramente que la presencia del cemento esconde el efecto del AE, puesto que en las mezclas “solo AE” alcanzan un

valor máximo el 2.5% de AE, contrarias a las mezclas con ambos estabilizadores cuyo máximo se da para el mínimo contenido de asfalto.

Otra observación interesante es la susceptibilidad de las mezclas (solo AE) al agua, dado por valores ITS muy bajos o marginales, lo que confirma que la adición del filler activo (cemento) es necesaria.

En las mezclas “solo AE”, los valores ITS ascienden en la medida que aumenta el contenido de AE, mostrando un máximo de 379 kPa para un contenido de 3.75% de AE y un mínimo de 328 kPa para un contenido de 1.25% de AE, siendo 17% menor en resistencia, lo cual puede considerarse como una diferencia marginal.

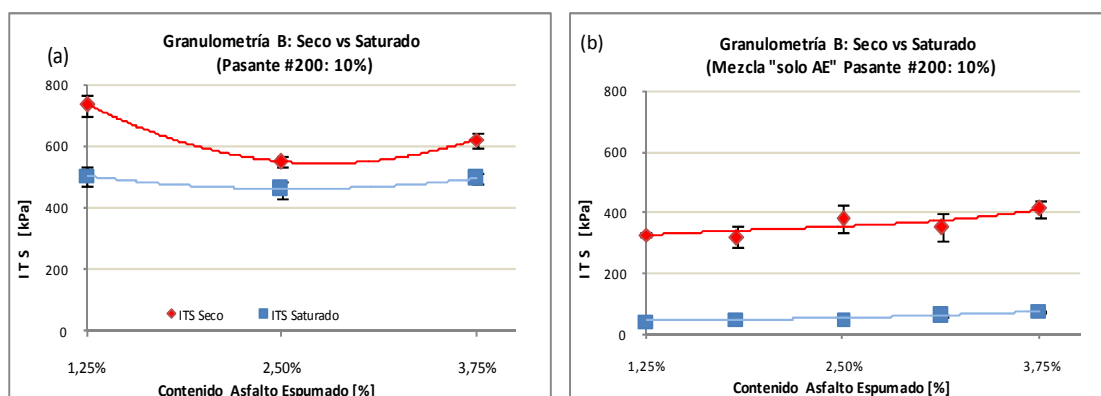


Figura 5-2: Tendencias de resultados ITS para mezclas (a) con asfalto y cemento y (b) “solo Asfalto”

Ensayos ITS, caso diseño mezclas con materiales del Norte de Chile

Se participó y ejecutó casos prácticos de diseño en mezclas con materiales del norte de Chile mencionado en la Sección 3.3, donde se realizaron ensayos ITS con los porcentajes de 1%, 1.5%, 2%, 2.5%, 3% y 3.5% de AE comúnmente utilizados; adicionalmente al diseño tradicional se prepararon en estos mismos materiales mezclas con “solo AE (3%)” y “solo Cemento (1%)”. Los resultados ITS marcaron máximos

para un 3% de AE, y como ejemplo de datos obtenidos en estos tipos de mezclas se muestra en la Figura 5-3 la relación carga/deformación en la prueba ITS.

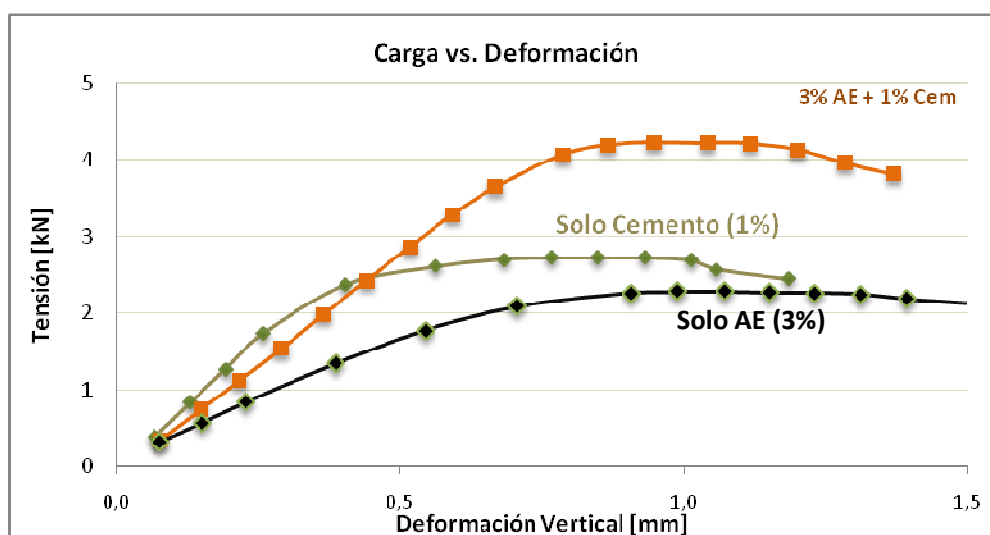


Figura 5-3: Datos en la prueba ITS, mezclas con: ambos estabilizadores combinados, “solo Cemento” y “solo AE”.

Observando las pendientes en las curvas carga-deformación, la capacidad de resistir carga hasta la rotura (pendiente en la curva de la Figura 5-3 en la mezclas “solo Cemento” es mayor frente a la mezcla “solo AE”, interpretándose que el efecto de 1% de cemento es el de aumentar la resistencia en las mezclas y el del AE aumentar la capacidad de deformación.

Los valores obtenidos en dicho diseño se muestran Figura 5-4(a), tanto valores ITS con ambos estabilizadores combinados que muestran mayores valores frente a aquellas que utilizan “solo Asfalto” o “solo Cemento”, y que no muestran necesariamente proporcionalidad. Sin embargo, obsérvese únicamente los valores de energía disipada (calculado simple del área bajo la curva tensión-deformación, Figura 5-4b), donde las mezclas “solo AE” son levemente superiores a las mezclas “solo Cemento”. En el cálculo de energía disipada en estas mezclas, el cemento no necesariamente muestra un

mayor valor (J), y el asfalto compite con el cemento respecto a la capacidad de resistir y deformar (ductilidad), esto se describió en la Sección 4.1/Figura 4-4.

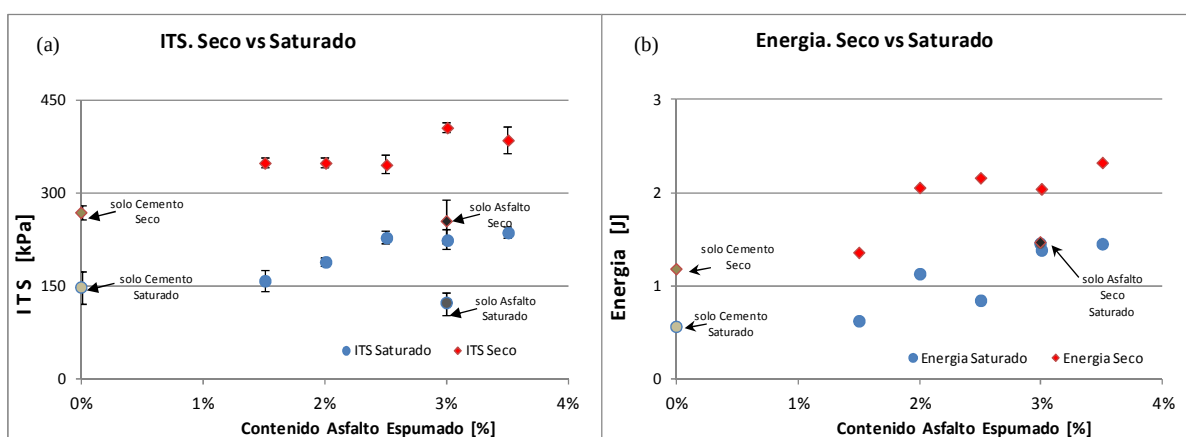


Figura 5-4: Resultados en la prueba ITS en mezclas con materiales del norte de Chile (a) Valores ITS, (b) Energía disipada

Otras observaciones a los ensayos tradicionales

En las pruebas UCS (Figura 5-5), se observan tendencias contrarias a las pruebas ITS, donde estas sí mostraron valores máximos en torno al 2.5% de AE en las mezclas del Tipo B considerada óptima (#200=10%).

Se observa que, en la condición saturada en la medida que aumenta el contenido de AE los valores UCS también tienden a aumentar. Comparando valores entre las pruebas ITS-UCS en las mezclas con Granulometría B, las tendencias son opuestas, el ITS disminuye con el aumento del contenido de AE.

Respecto a la susceptibilidad al agua dada por acción de saturar las probetas, se obtuvieron rangos de disminución en los valores RS (Resistencia retenida: ITS saturado/ITS seco) entre el 15%-35% en los ensayos ITS, y entre 25%-45% en los ensayos UCS, considerando las mismas mezclas granulométricas y con iguales contenidos de asfalto, mostrando que los ensayos UCS son más sensibles a la saturación (24 hs en agua) para las mezclas adoptadas.

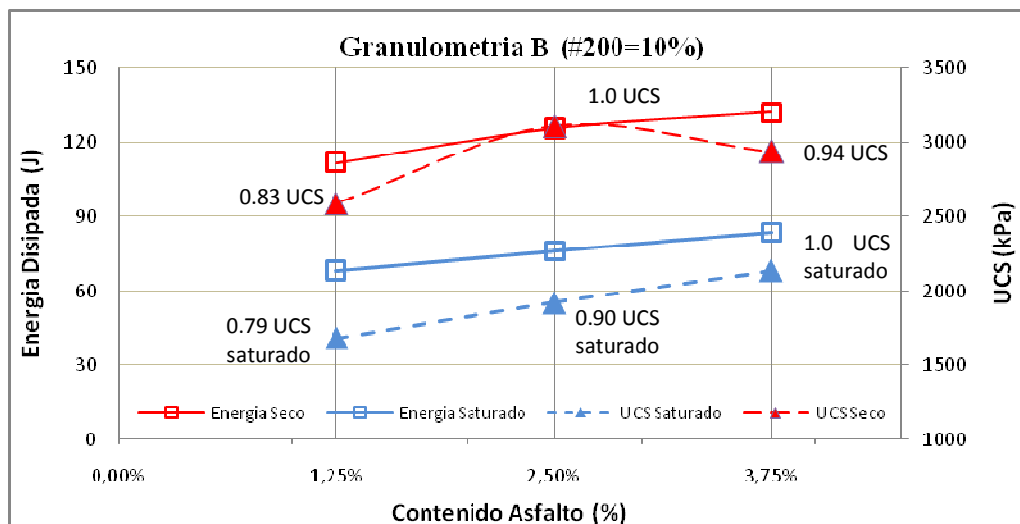


Figura 5-5: Resumen de resultados UCS, energía/UCS vs contenido de AE

El aporte (propiedades mecánicas) de estos ensayos tradicionales al diseño de mezclas podría discutirse, pero se identifican algunos ellos según los resultados ITS/UCS en estos materiales como:

- **Granulometrías (mejores o peores) de materiales tratados:** valores ITS y UCS mostraron mayores valores en mezclas con la granulometría intermedia (B: Pasante #200=100%), cuyo valores densidad seca máxima son mayores. Dichos resultados se resumen en la Sección 4.1.1. El hecho que existan cambios de granulometrías en terreno puede ser detectado por estos ensayos
- **Problemas o efectos ante la presencia de humedad en estos materiales (RS: resistencia retenida):** la sensibilidad al agua mediante el sometiendo de probetas a saturación se refleja en los valores de los ensayos tradicionales. Específicamente, la disminución en los porcentajes de RS varían hasta un 35% en los ensayos ITS y hasta 45% en los ensayos UCS para estas mezclas utilizadas, las cuales se encuentran dentro de la faja recomendada de trabajo (Sección 2.3.2).

- **Presencia o no de los agentes estabilizadores (AE y filler activo):** la ausencia de uno de los dos estabilizadores pueden ser detectadas por estos ensayos. Remítase a los resultados de ensayos cuyas mezclas fueron hechas de manera independiente (Figura 5-4). En terreno pueden identificarse malas aplicaciones o ausencia de algún estabilizador, siempre que se analicen granulometrías similares.
- **Disponer de criterio mínimo de resistencia mecánica en estos materiales (ejemplo ITS: 300 kPa / UCS: 800 kPa):** el rango de valores obtenido define aquellos materiales con mejores y peores propiedades mecánicas. Si bien, los peores pueden subestimar al proyecto, estos pueden usarse como exigencia mínima a cumplir en cualquier proyecto que implique la repetición masiva de ensayos en los respectivos controles de calidad.

5.1.2. Ensayos Complementarios

Siendo cuatro los ensayos complementarios o no tradicionales:

- CD: corte directo o cizalla.
- M_R : módulo resiliente triaxial.
- ITFS: fatiga por tracción indirecta.
- ITMS: rigidez o módulo dinámico por tracción indirecta

Se discute cada uno en base a resultados y tendencias según la variación dada en los cambios de contenidos de AE y porcentajes de finos. Estas pruebas generalmente se limitan en su ejecución según se cuente o no con la disponibilidad de equipos, en el caso de Chile, algunos han sido pocos o nada ejecutados. El ensayo CD es una prueba mecánica nueva para estos materiales, tanto para Chile, como cualquier otra investigación a la que se pudo acceder.

El ensayo de Corte Directo (CD) exige a la probeta a esfuerzos de cizalla, en este caso se evaluó únicamente al material fino de las mezclas que pasa el #3/8" (9.52 mm). Este

ensayo permitió identificar principalmente la propiedad de cohesión que aporta el cemento y/o asfalto en la matriz fina del material.

La primera discusión es que el ensayo evalúa al material únicamente en el sector fino. Esto se restringe principalmente por la necesidad de cumplir con la relación tamaño máximo del árido/altura del molde (9.52 mm/25.4 mm), la cual es relativamente coherente o aceptada, siendo el tamaño máximo del árido menor al tercio del espesor del molde. El resumen de resultados y tendencias para la Granulometría B se muestran en la Figura 5-6 (Ver detalle Sección 4.1.2 y Anexo C-Resultados Corte Directo).

Si bien se observan mejores tendencias dado por curvas de máximos consistentes (AE: 2.5%), en estos ensayos las diferencias no necesariamente son obvias, siendo en algunos casos marginales. En todos los casos se ensayaron 4 muestras para la obtención de un valor representativo.

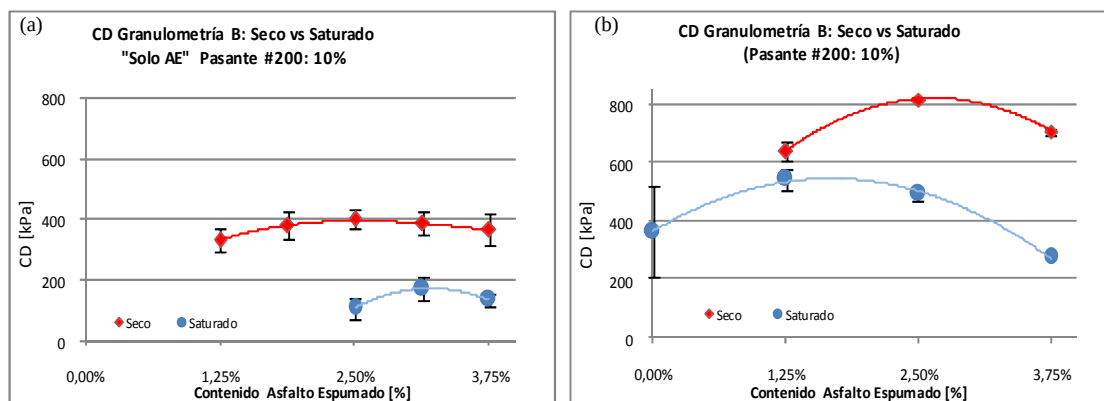


Figura 5-6: Resumen de resultados Corte Directo para la Granulometría B: (a) mezclas solo Asfalto y (b) mezclas con Cemento y Asfalto

La falta de tendencias claras en los ensayos tradicionales busco ser discutida comparándolos con los ensayos complementarios, enfocando principalmente el rol del AE. Con esta propuesta, se realizaron mezclas que evalúen únicamente al AE y ver la sensibilización ante el contenido AE en los mismos. Un caso, fueron los ensayos ITS e

CD realizados en estas mezclas sin cemento, con distintos contenidos de AE. Resultados de esta comparación se resumen en la Figura 5-7.

En la condición seca, la tendencia ITS es la de aumentar en la medida que aumenta el contenido de AE, sin embargo, el ensayo CD define un máximo valor para un contenido de 2.5% de AE, pero con una diferencia marginal frente a los otros contenidos. En el caso de probetas saturadas (24 hs), los valores mecánicos se ven altamente afectados por el agua, al punto que, en los especímenes CD con un contenido de 2.5% de AE no fue posible ejecutar ensayos debido a que las muestras se disgregaban o estaban muy dañadas. Por segunda vez se demuestra la necesidad de que estas mezclas dispongan de cemento cuando sean sometidas a condiciones de alta humedad, sobre todo considerando el factor durabilidad de la matriz fina. También muestra que el asfalto puede disminuir la agresión del agua en la medida que aumenta su contenido.

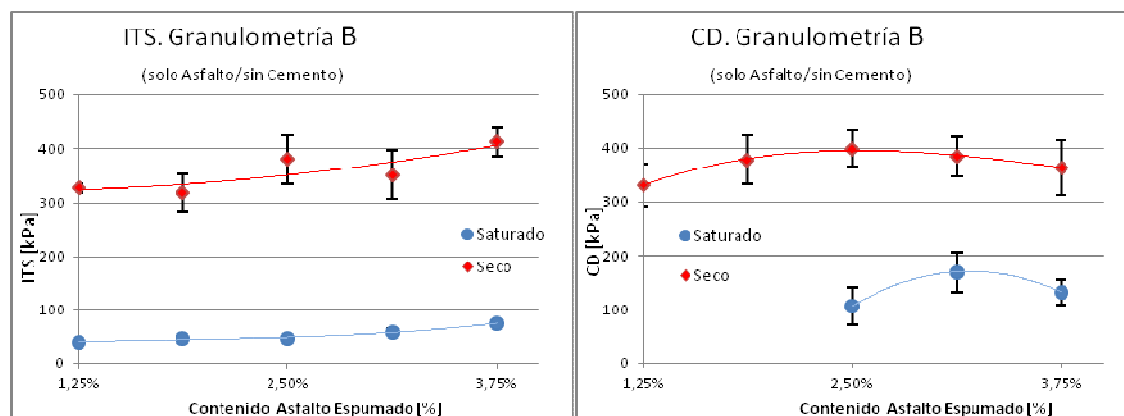


Figura 5-7: Resultados de Ensayos ITS (a) y CD (b), en mezclas sin cemento, “solo AE”

Si bien, en el ensayo de CD se mide el valor C (cohesión) del mastic (definido en la Sección 2.3 y representado en la Figura 5-8), este no evalúa al material como estructura en sí. Dicho de otra manera, no se incluyen agregados gruesos que forman el denominado esqueleto de la capa de material granular reciclado.

El ensayo de CD en mezclas con los estabilizadores de manera independiente, muestra que los valores de cohesión no necesariamente son gobernadas por el asfalto, resaltando que la fuerza resistente a la cizalla antes de la rotura está influida importantemente por el cemento, cuyo valores CD son relevantes frente a los del AE. Esto se observa en la Figura 4-12 de la Sección 4.1.2.



Figura 5-8: Material muestreado de proyecto en el Norte de Chile. Representación de mastic

Los ensayos de M_R (módulo resiliente triaxial) en la condición seca también marcaron máximos en torno a un contenido de 2.5% de AE en las tres mezclas, siendo diferentes y menos sensibles en la condición saturada. Considerando que estos ensayos son no-destructivos, el haber ensayado las mismas probetas a diferentes edades (0.5 año y 1.5 años), mostró resultados diferentes en función del tiempo de curado. Por ejemplo: a la Edad 1 (0.5 año), las mezclas en casi todos los casos mostraron máximos para un contenido de 1.25% de AE y una diferencia importante entre resultados en las mismas mezclas ensayadas en condiciones secas y saturadas, diferente es caso para los resultados en la Edad 2.

Los resultados de M_R promedio representados en Figura 5-10 compara resultados en condiciones secas y saturadas en la Edad 2, mostrando que la mezcla C, con mayor contenido de finos (#200: 15%) arroja los mejores valores frente a las otras dos mezclas.

En la condición saturada se da la tendencia que para un mayor contenido de AE, mayores valores M_R promedio, resaltando el aporte del AE en las mezclas saturadas.

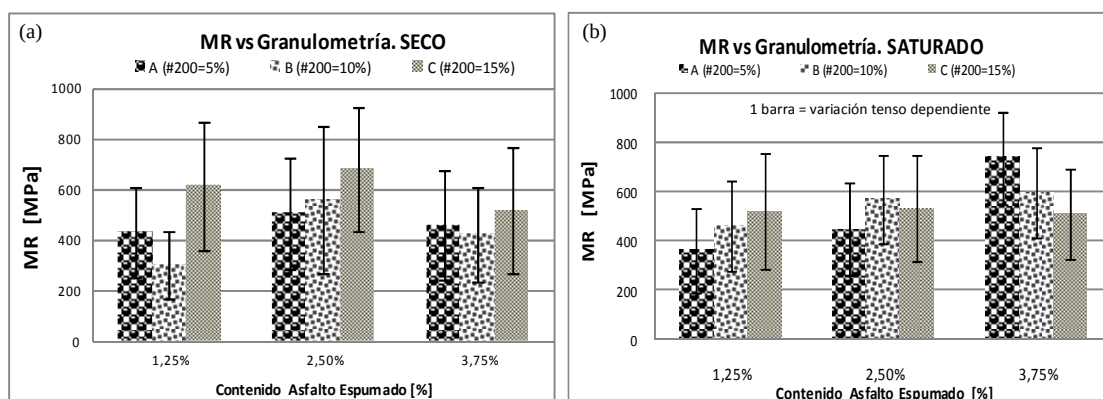


Figura 5-9: Módulo Resiliente promedio de los tres tipos de mezclas

La diferencia marginal entre resultados de ensayos secos y saturados para la Edad 2, son contrarias a las tendencias de los otros ensayos mecánicos, donde los resultados muestran disminuciones importantes entre resultados secos y saturados. Dicha observación realiza a los ensayos de M_R respecto al contenido de AE y su aporte en la evaluación mecánica ya fue discutido por otros investigadores, dichas observaciones mencionan que estos ensayos no someten necesariamente a la probeta a un estado de tracción, o no exigen esfuerzos bajo estados de tensiones que puedan darse en el pavimento, siendo esta una de las principales propiedades (resistencia a la tracción) del AE en la matriz fina, finalizando que los ensayos M_R no necesariamente pueden medir y evaluar estas propiedades en estas mezclas.

Los ensayos ITFS (Fatiga Tracción Indirecta), también mostrando mayores valores para un contenido de 2.5% de AE. Una reciente investigación realizada en Chile menciona que el sometimiento de las probetas a cargas repetidas bajo tracción indirecta controlada puede mejorar el diseño estructural (Halles et al, 2012).

El cuestionamiento al ensayo ITFS se da principalmente en la alta variabilidad en los resultados, dado quizás por la aplicación de una carga repetida que asume un

comportamiento lineal elástico respecto a la tensión indirecta controlada, el cual no es puramente controlado. Así también la colocación o disposición de las probetas en el ensayo, que podría influir en la alta variabilidad, atendiendo posibles aplicaciones de carga de manera inapropiada; por ejemplo: cargas sobre un árido grueso, en el cual la distribución de tensiones se modifica ante la aplicación puntual (distribución no uniforme).

Obsérvese que el modo de falla está definido por las pendientes en las curvas, donde la mezcla con un mayor (3.75%) contenido de AE muestra una mayor fluencia (inclinación más brusca), frente a la dada en la mezcla con un 2.5% de AE, cuya falla es más consistente cediendo menos ante la aplicación límite de cargas repetidas cercana a la falla.

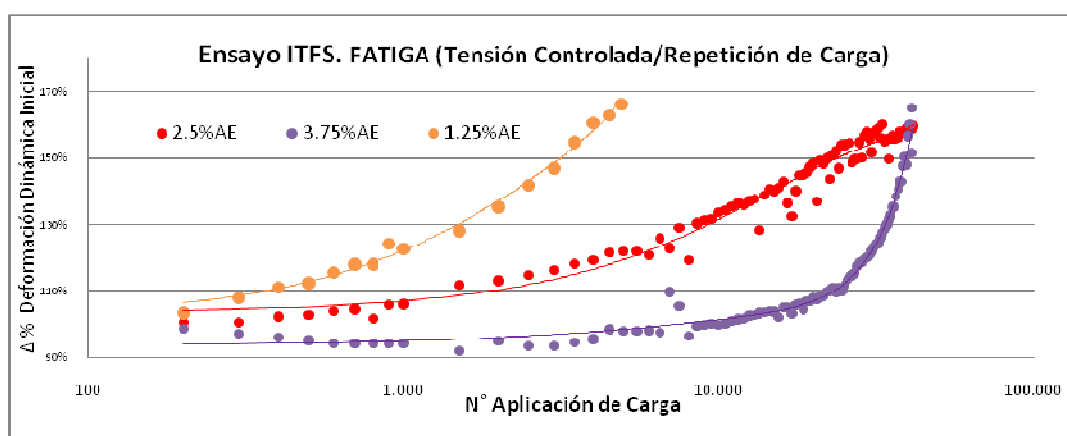


Figura 5-10: Resultado de ensayo ITFS para la Granulometría B

5.1.3. Análisis según tendencias y variabilidad dado por el contenido de AE

Los resultados obtenidos en los distintos ensayos mecánicos definen tendencias de valores. Dicha tendencia o variación según los contenidos de AE en cada mezcla se analiza en gráficos de porcentajes que representan valores mecánicos referenciales.

Estos se muestran en las Figura 5-11(a),(b) y (c), para la condición seca.

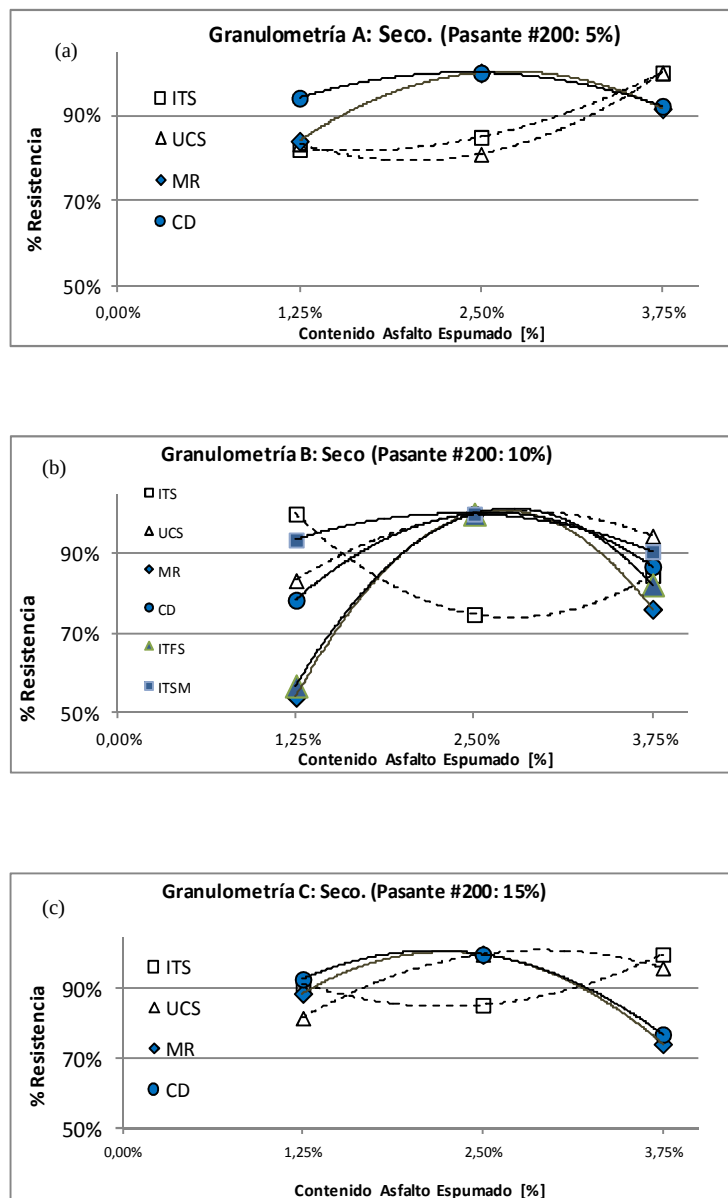


Figura 5-11: Tendencias de resultados según “resistencia referencial” en cada ensayo mecánico para las tres granulometrías en condición seca

Considérese que se esperaban valores mecánicos máximos en torno al 2.5% de AE según la experiencia en Chile, dicha suposición no se da en algunos casos, sobre todo en los ensayos tradicionales y mayormente en los ensayos ITS. Nótese las tendencias y diferencias respecto al valor referencial de resistencia (% Resistencia) dado en los

ensayos complementarios, cuyas tendencias son mejores a los tradicionales. Dichas diferencias definen la variación dada respecto al AE.

Entre los ensayos tradicionales, las pruebas UCS marcan mejores curvas que las pruebas ITS, esto se muestra en el análisis de varianza de ensayos según los distintos contenidos de AE del Capítulo 4, considere además que normalmente en Chile los ensayos UCS no se ocupan para estos materiales. Estas observaciones no son tan evidentes en las tendencias obtenidas en la condición saturada, donde en muchos casos estas se contradicen, sean ensayos tradicionales o complementarios. Las tendencias en ambas condiciones (secas y saturadas) según las tres mezclas se detallan en el Anexo H: Resumen y Tendencias de Resultados.

5.1.4. Análisis del aporte de los ensayos mecánicos realizados

Basados en los resultados de ensayos se genera la Tabla 5-1, que califica a cada prueba según la sensibilización ante los distintos contenidos de AE en las mezclas, recomendándolo o no, además se definen los rangos de valores obtenidos y la variabilidad observada.

Se debe considerar además el análisis de varianza ANOVA mencionado en el capítulo anterior, que identifica valores estadísticos representativos de cada ensayos según los tres contenidos de AE adoptados (1.25%, 2.5% y 3.75%). Las variaciones de densidades en las mezclas con las mismas granulometrías según estos tres contenidos de asfalto muestran resultados que en la medida que se incorpora mayor contenido de AE, la densidad seca máxima obtenida es menor. Esto se repite en todos los casos, con diferencias marginales en algunos casos.

Tabla 5-1: Resumen de ensayos ejecutados y recomendación respecto a la sensibilización según el contenido de AE, rango de valores y calificación según la variabilidad del ensayo

Ensayo Mecánico	Sensibilización ante % AE	Unidad de Medida	Rango de Valores		Variabilidad promedio
			Seco	Saturado	
ITS	No recomendado	kPa	545-735	385-510	ITS
UCS	Recomendado	kPa	1.915-3.115	1.075-2.140	UCS
M_R	No recomendado	MPa	420-720	410-630	M_R
ITFS	Recomendado	N° ciclos vs. Tensión controlada	4.000 ciclos/240kpa	50.000 ciclos/240kpa	ITFS
CD	Recomendado	kPa	470-820	200-550	CD

En el desarrollo de la investigación (revisión de literatura y trabajo en laboratorio) y en base a los resultados se genera recomendaciones según los diferentes efectos o propiedades mecánicas que puedan ser evaluados, resumidos en la Tabla 5-2.

Tabla 5-2: Resumen s/propiedad mecánica evaluada en los ensayos de laboratorio

Propiedad (ingeniería) de la Mezcla	Ensayo en Laboratorio -Prueba Mecánica				
	ITS	UCS	M_R	ITFS	CD
Elección/Evaluación Granulométrica	↑	↑	↓	N/E	↑
Susceptibilidad a la Humedad (Resistencia Retenida)	↑	↑	↔	N/E	↑
Evaluación en condición Saturada	↔	↑	↓	N/E	↑
Evaluación Resistencia Mecánica s/esfuerzo aplicado	↔	↔	↔	↑	↑
Evaluación/Relación del Módulo Elástico	↔	↓	↑	↑	↔
Optimización en el contenido de AE	↔	↔	↔	↑	↑

↑: recomendada, ↔: podría aplicarse, ↓: no recomendada, N/E: no estudiado

5.2. Discusión sobre el estado del arte y la práctica

Considerando que en Chile el método para el diseño mezclas de pavimentos con asfalto espumado (AE) adopta la propuesta Sudafricana publicada en el Año 2002 "Manual Técnico (TG2): Utilización y Diseño en materiales tratados con asfaltos" (Academia del Asfalto 2002); esta metodología fue generada mediante datos en ensayos obtenidos en laboratorio y pruebas reales en tramos de pavimentos con cargas aceleradas. Las directrices Sudafricanas clasificaron (Tabla 5-3 y Figura 5-12) las mezclas con AE en cuatro categorías (FB1, FB2, FB3 y FB4), en función de los valores de resistencia obtenidos de los ensayos de compresión simple no confinada (UCS) y tracción indirecta (ITS), que son las pruebas de laboratorio comúnmente realizadas en estos materiales.

El método menciona que los pavimentos con AE se comportan según dos fases separadas. La primera fase se inicia después de la construcción, cuando la capa está en una condición intacta, sin daños y proporciona resistencia a la fatiga, y termina cuando, después de la aplicación de varias cargas del tránsito pesado, la capa llega a un "estado de equivalencia granular". Este término, se usa para describir la pérdida del módulo elástico del material, y es comparable a los materiales granulares sólo respecto al módulo elástico, y no en la composición física de los materiales (Academia del Asfalto 2002).

Tabla 5-3: Clasificación TG2-2002, según ensayos UCS e ITS

Clasificación	UCS (kPa)	ITS (kPa)
FB1	1400-2000	300-500
FB2	1400-2000	100-300
FB3	700-1400	300-500
FB4	700-1400	100-300

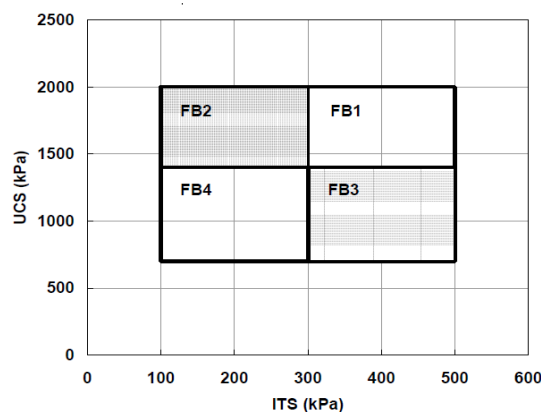


Figura 5-12: Matriz de resultados UCS-ITS que clasifica al material.
Long et al, 2004

De manera resumida, la diferencia entre estos dos estados (fase de fatiga eficaz y equivalencia granular) debe considerar las propiedades de los materiales, la respuesta del pavimento y el modelo de falla. En la fase de fatiga, se calculan los esfuerzos de tracción horizontal en la parte inferior de la capa, tanto por debajo y en el centro de los neumáticos mediante el uso de una simulación numérica lineal-elástica en la estructura del pavimento. En la fase granular equivalente, las tensiones principales mayores y menores se determinan en cuatro lugares de la estructura del pavimento: a un cuarto por debajo de la parte superior de la capa superficial y en el cuarto por encima de la parte inferior de la capa reciclada, tanto debajo y entre las cargas de las ruedas (Figura 5-13).

La metodología define ecuaciones (resultando N: repeticiones de cargas) en cada fase para el diseño estructural que arrojan directrices mediante modelos de rendimiento solamente para los materiales FB2 y FB3, ya que, sólo en estos dos tipos materiales se realizaron extensas pruebas en campo y laboratorio al momento de la publicación.

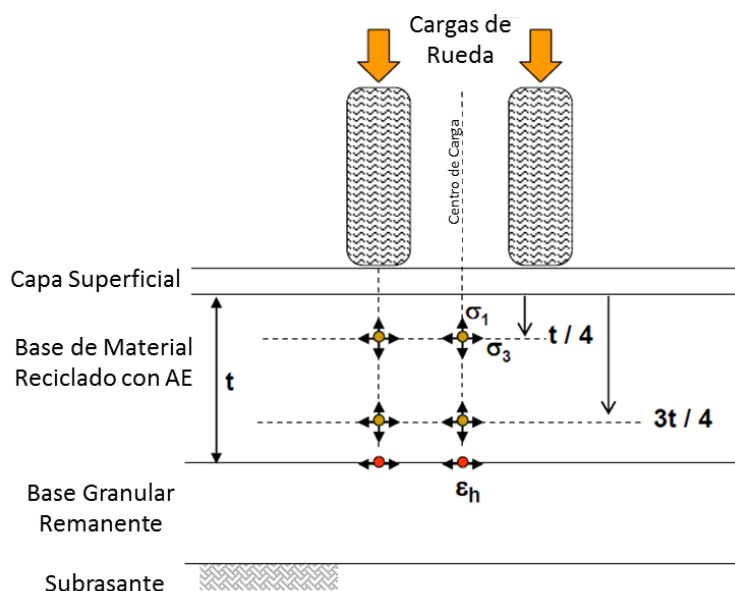


Figura 5-13: Representaciones de los puntos de análisis de tensiones según la fase del material reciclado con AE. González, 2009

La obtención de N en cada fase generó mucha incertidumbre e identificó limitaciones a la metodología, que si bien, es un buen aporte al estado de la práctica con el uso masivo de la metodología, muchos cuestionamientos fueron resaltados por observaciones hechas en los otros países como Australia, Nueva Zelanda y EEUU, quienes generaron sus propias metodologías de diseño.

La adopción realizada en Chile se discute y resalta a continuación en base a las siguientes observaciones:

- La primera observación a la adopción de dicha metodología (sudafricana) en Chile, es que **“no se tiene una relación potente entre los ensayos de laboratorio y rendimientos en tramos reales de pavimentos con AE”**. Por ejemplo la relación entre las cantidades de repeticiones de cargas y la condición de falla considerada en las pruebas sudafricanas que midieron pérdidas en la rigidez y deformaciones permanentes hasta 2 mm en la capa de material con AE en la primera fase (fatiga efectiva), y en la segunda fase se limitaba a una deformación permanente de 18mm.

- La segunda es que los ***ensayos tradicionales de laboratorio (UCS-ITS) fueron relacionados con la primera fase (ecuación de fatiga)*** que considera deformaciones horizontales por tracción en pruebas de flexibilidad medidas en ensayos de vigas sometidas a la flexión repetida en mezclas con AE, apoyadas en cuatro puntos hasta carga límite o de rotura. ***En la segunda fase (equivalencia granular)***, relacionan densidades relativas de los materiales con AE, deformaciones plásticas, utilizando una ecuación de estados de tensiones (ensayo triaxial monotónico) para materiales granulares y la razón cemento/asfalto.
- La tercera es que, al no disponer de valores ITS o UCS dentro de la clasificación definida (FB2-FB3), ***no se podría generar valores para el diseño estructural***. En todo caso la adopción no se ajusta a esta clasificación únicamente mediante valores de resistencia, sino ***además a los tipos y condiciones de los materiales de los tramos de pruebas sudafricanas, quizás son muy diferente a las condiciones y materiales chilenos (norte, centro y sur)***.

Finalmente, no se puede adoptar una metodología de diseño de mezcla o diseño estructural cuando no se tiene una correcta correlación entre los datos de entrada y los resultados de salida, además de una calibración mínima respecto a ciertos tipos materiales. Dicha afirmación pareciera obvia, pero no existe en la actualidad una metodología del todo válida que pudiese adoptarse o utilizarse.

En la versión más actualizada de la guía sudafricana (TG2-2009) la metodología de diseño cambia, definiendo varias etapas o niveles según la demanda de tránsito o categoría del camino, esto se desarrolló en la Sección 2.2 (Revisión de Literatura).

La amplia discusión sobre las mezclas tratadas con AE no termina, principalmente porque la generación de esfuerzos y deformaciones en estos materiales se vuelve menos predecible que en otros ya conocidos, fundamentalmente por dos factores combinados: la flexibilidad por la adición del bitumen y la rigidez por la adición del cemento (filler activo).

Discusiones según otras investigaciones

Dentro de todas las aceptaciones y cuestionamientos a la técnica las rehabilitación de pavimentos con AE, la misma ha ido ganando éxito, y algunos autores piensan que se debe a la aplicación de una ingeniería adecuada, junto con prácticas correctas de construcción (Collings et al, 2008). Collings y Jenkins (2012) mencionan: *“Se debe cuestionar la filosofía del diseño actual detrás de los tratamientos con AE, basados en datos de laboratorio y observaciones en campo, sin argumentos filosóficos”*.

Collings et al. (2012) añaden que la adición de un agente de estabilización asfáltico al material reciclado, proporcionando flexibilidad y durabilidad, además de ser un aporte al factor durabilidad debido a un menor mantenimiento y otras intervenciones cuyo costo durante uso del pavimento reciclado debería de ser menor, bajo un nivel aceptable de servicio durante la vida de diseño del pavimento, así como el mismo costo de la rehabilitación. El verdadero valor en los materiales tratados con asfalto, según estas investigaciones, recién está comenzando a recibir la atención que merece. A medida que aumenta su uso, la investigación va a seguir, lo que permite que la tecnología pueda expandirse, en tanto vaya ganando la confianza de los profesionales, junto con la mejor comprensión de la tecnología (Collings et al, 2012).

Otras investigaciones generan similares observaciones, con discusiones que cuestionan los ensayos mecánicos en laboratorio y su aporte real al diseño de mezclas y diseño estructural, es el caso de investigadores en:

- California (Fu et al, 2009): Pruebas de Módulo Resiliente normalmente utilizadas en materiales con AE son dependientes del estado de tensión, pero el estado de tensiones en terreno no puede ser totalmente caracterizado en las pruebas de laboratorio.
- Sudáfrica (Kim Jenkins, 2012): la propiedad de flexibilidad en estos materiales es muy importante, pero también es difícil de medir. El contenido de cemento versus el contenido de asfalto debe ser investigado y considerado.

- Australia (Leek y Jameson, 2011): que constantemente identifican enmiendas que pueden reflejar mejor el estado actual del diseño de mezclas con AE, estas están definida en el método de diseño propuesto por la Guía Técnica: Guide to Pavement Technology Part 4D: Stabilised Materials (Austroads 2006). Actualmente se encuentra en vigente la versión 2013.
- Nueva Zelanda (González, 2009; Browne et al, 2012): Hay muchas diferencias respecto al enfoque en las especificaciones, diseño de mezclas y el modelamiento de desempeños en estos pavimentos estabilizados con asfalto entre Australia, Sudáfrica y Nueva Zelanda, algunas sutiles y otras significativas. La distinción principal se da según los modos de fallas y la filosofía del modelamiento, algunos con criterios de desempeño (Nueva Zelanda: asfalto/fatiga) y otros sin criterios de desempeño (mecanicista).

5.3. Discusión sobre interpretación de ensayos

Considerando que el Capítulo 2 se generó una sección de modelo teórico que justifica la adopción de otros ensayos diferentes a los tradicionales, el análisis e interpretación de resultados puede ayudar a entender mejor las características mecánicas que definan el comportamiento del material en terreno bajo cargas del tránsito, en especial la del tránsito pesado. En la Figura 5-14 se hace referencia a los efectos de dichas cargas y su relación con los esfuerzos generados y ya mencionados en el Capítulo 2, cuya sollicitación de carga se transmite a las capas del pavimento por medio del contacto rueda-pavimento.

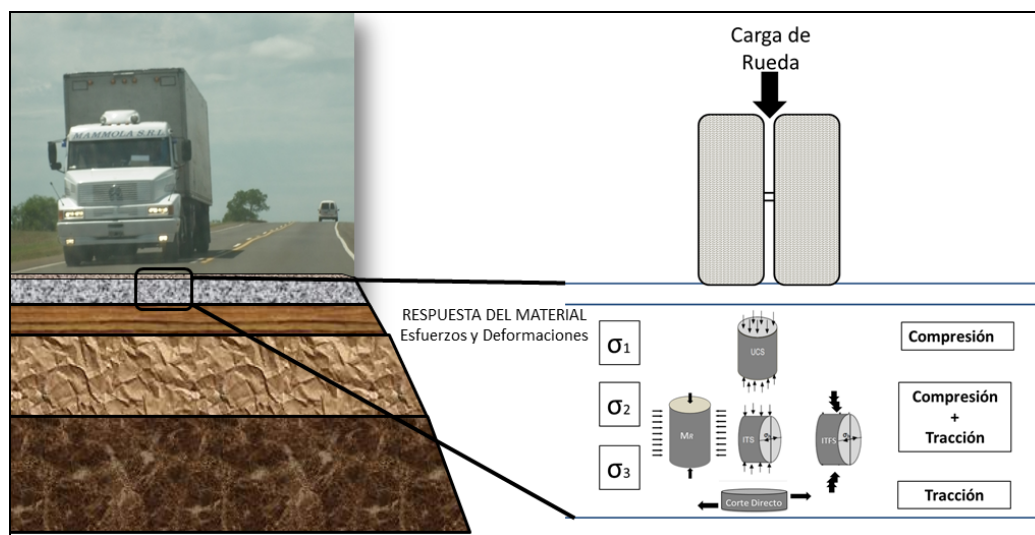


Figura 5-14: Carga en la estructura del pavimento e interpretación de esfuerzos mediante ensayos mecánicos

El hecho que el material reciclado sea una mezcla que forma parte de un pavimento flexible, hacen que los esfuerzos y deformaciones pudiesen ser distintos en función de la profundidad de análisis. La discusión sobre el diseño de mezclas adoptado en Chile se da principalmente porque el ensayo ITS no necesariamente considera estado de tensiones a la que pudiese estar sometido el pavimento. Tampoco considera las cargas a las que pudiese estar sometidos la estructura y menos aún, las condiciones del material de fundación o de apoyo de la capa reciclada.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La investigación presentada en esta tesis describe el trabajo experimental en mezclas de materiales (RAP-áridos) reciclados de pavimentos asfálticos de Chile y estabilizados con diferentes contenidos de asfalto espumado y cemento. El trabajo incluyó principalmente un análisis de laboratorio, partiendo de la caracterización de los materiales y ejecución de pruebas mecánicas que fueron separadas en dos grupos:

- a) Tradicionales (2 ensayos): el ensayo ITS comúnmente utilizado en Chile y el ensayo UCS normalmente ejecutado en materiales cementados y desarrolladas en otras investigaciones
- b) Complementarios (4 ensayos): tres pruebas (M_R -ITFS-ITMS) conocidas pero no comunes en Chile, cuyos usos se dan generalmente en estudios de investigaciones. Una prueba nueva (CD), que evalúa únicamente la cohesión.

El objetivo principal es recomendar nuevos ensayos para el diseño de mezclas que complemente a los ensayos tradicionales y permitan determinar con mayor precisión el contenido óptimo de asfalto. En base a los objetivos propuestos y el desarrollo de los demás capítulos, se realizan las siguientes conclusiones:

Ensayos Tradicionales

- Mediciones en los ensayos tradicionales de laboratorio (ITS y UCS) fueron realizadas, obteniéndose valores pocos sensibles respecto a los distintos contenidos de asfalto. En los ensayos ITS en la condición saturada se obtuvieron valores con diferencias marginales (curvas planas) entre los distintos contenidos de AE en caso todos los casos. Los máximos ITS secos, no necesariamente fueron máximos ITS saturados, observándose mucha inconsistencia. En las pruebas UCS se obtuvieron resultados más consistentes entre los valores máximos secos y saturados, dados para los mismos contenidos de AE, en casi todos los casos. También se demostró estadísticamente que los ensayos UCS sensibilizan mejor ante los distintos contenidos de asfalto.

- La variación granulométrica adoptada y definida por el Pasante#200 de 5%, 10% y 15% simula posibles diferencias en las trituraciones que puedan darse en terreno, y en general se obtuvieron valores de coeficientes de variabilidad bajos, frente los valores dados normalmente en el diseño de mezcla tradicional, justificado principalmente por el trabajo haber separado en tamaños los áridos y el RAP en el todo proceso previo, que permitió construir mismas granulometrías en cada fabricación de probetas, siendo este el primer aporte a la metodología del diseño de mezclas.
- Los ensayos ITS por sí solos no deberían de utilizarse para la obtención de valores óptimos de contenidos de AE, dado que la prueba no entrega resultados precisos y puede crear incertidumbre al diseñador, pudiendo sobreestimar o subestimar el aporte del AE en terreno.
- El ensayo ITS puede evaluar ciertas propiedades mecánicas en las diferentes mezclas, identificando: variaciones granulométricas, susceptibilidad al agua e identificación del uso o no de alguno de los agentes estabilizadores.
- Las tendencias poco claras respecto al contenido de AE dado en los ensayos tradicionales, hacen que su adopción en el diseño de mezclas deba replantearse o complementarse con otros tipos de ensayos, quizá no necesariamente mecánicos.
- Las pruebas ITS cuyos especímenes fueron fabricados con agentes estabilizadores de manera independiente (“solo AE” o “solo Cemento”) muestran resultados de resistencias donde los estabilizadores compiten entre sí cuando son ensayadas en condiciones secas, sin embargo, en condiciones saturadas las probetas (solo AE) con menores contenidos de AE son muy susceptibles a la humedad o fuertemente perjudicadas por el agua. El diseño de mezclas podría desarrollarse inicialmente con pruebas que evalúen únicamente a los contenidos de AE, de manera independiente y luego combinada con el filler activo.

- Contrariamente a la revisión de literatura, se observó mayores valores UCS ante el aumento del contenido de AE. En estos ensayos si se pudo obtener valores máximos entorno al 2.5% de AE esperado, aunque no en todos los casos.
- Las densidades de estas mezclas varían según el contenido de asfalto, a mayor contenido de asfalto inyectado menor densidad. Los resultados en la Granulometría B, considerada ideal dado por la densidad seca máxima del material y cuyo contenido de finos es intermedio (#200=10%), mostraron mejores resultados en ambos ensayos tradicionales ITS e UCS, demostrando que estas pruebas son capaces de evaluar la calidad en las composiciones granulométricas.

Ensayos Complementarios.

- Los ensayos complementarios mostraron mejores tendencias (en torno al 2.5%) que los ensayos tradicionales. En los ensayos M_R y CD se fabricaron probetas al igual que en los ensayos tradicionales según la matriz factorial. En los ensayos ITFS e ITMS, solo se realizaron utilizaron mezclas del Tipo B.
- En los ensayos de M_R se obtuvieron máximos en torno al 2.5% de AE, no en todos los casos y contrariamente a otros ensayos mecánicos, estos no mostraron susceptibilidad al agua o disminuciones evidentes en los resultados de ensayos en condiciones saturadas. Siendo un tipo de evaluación mecánica más, no se recomienda su uso para la optimización del contenido de AE en este tipo de materiales, coincidente con otros estudios.
- El ensayo ITFS (Resistencia a la Fatiga por Tracción Indirecta) en su forma de evaluación mecánica, mostro ser un muy bueno para reconocer al asfalto, dado por una falta o exceso del mismos, además marcan mejores tendencias en torno al 2.5% de AE, considerado óptimo. El modo de falla definido por las pendientes en las curvas

deformación versus número de ciclos de carga es una buena evaluación del efecto del AE. La cantidad de ensayos no permite ser concluyente. Se observó además, una alta variabilidad por la geometría de aplicación de cargas y suposición de un comportamiento lineal elástico.

- El ensayo de CD (Corte Directo) es una prueba no normada para este tipo de materiales, evaluando únicamente al material fino (Pasante#9.52 mm) y las tendencias obtenidas fueron mejores a los ensayos tradicionales, generando máximos entorno al 2.5% de AE. Los esfuerzos CD muestran que las mezclas “solo Cemento” compiten con las mezclas “solo AE” respecto al valor de cohesión. En las mezclas “solo AE”, se obtuvieron mayores valores CD con el aumento del contenido de AE, pero combinadamente los valores de cohesiones son aún mayores. Se concluye que la fuerza de unión que genera el cemento es relevante frente a la suposición que el AE pudiese ser más importante respecto a la cohesión.
- El ensayo ITMS, también marco tendencias en torno al 2.5% de AE en ambas condiciones de ensayo, pero se observó un alta variabilidad en los resultados obtenidos. La evaluación que asume un comportamiento elástico ante la aplicación de cargas puede considerarse conservadora. No hay una relación directa con el M_R .

Recomendaciones para futuras investigaciones

- El proceso de fabricación de probetas puede mejorarse bajo la intensión de simular mejor la compactación en terreno (rodillo liso o pata de cabra). Estas acciones se están adoptando otros países y está demostrado que estas muestran diferencias según el método, sea por impacto o por vibración. Ejemplo: martillo vibratorio versus martillo Proctor modificado.
- La reacción entre los aditivos (asfalto-cemento) y los materiales reciclados (RAP-Áridos) debe seguir estudiándose, quizá la metodología no necesariamente sea evaluar mecánicamente. Debe entenderse mejor la química o la microestructura.

- Podría ampliarse la ejecución de los mismos ensayos según la matriz factorial utilizada en esta investigación, con un mayor número de contenidos de AE y con otras variaciones que incluyan materiales de otras regiones de Chile. Igualmente pueden darse los casos como: diferentes en los tipos de asfalto, reciclados con un 100% de RAP o reciclados sobre reciclados, entre otros.
- Otras investigación pueden dedicarse a vincular el diseño de mezclas, valores de ensayos en el control de calidad de la construcción y evaluaciones de desempeño de los caminos tratados de manera a ir validando valores referenciales para el diseño estructural.
- Esta investigación no evaluó a estos materiales en el tiempo (evaluación mecánica en distintas edades), siendo otro punto interesante que debe investigarse, sobre todo bajo las distintas condiciones de esfuerzo y humedad en terreno.
- El estudio sobre el contenido del filler activo también debe profundizarse e investigarse, no adoptar únicamente el 1% de cemento. Entiéndase que son dos las posibles causas de generación de agrietamientos: reacción propia del cemento o el paso de carga repetida del tránsito pesado que muchas veces no son considerados.
- La ejecución de proyectos con AE en el Norte se encuentra en gran parte salvaguardado, puesto que ya se conoce la aplicación (aún falta el seguimiento) y en general se dispone de un material de fundación de soporte muy bueno, sin embargo la optimización respecto al contenido de AE y granulometría más conveniente aún no se afina.
- El alto deterioro de pavimentados asfálticos en Latinoamérica, hace necesario que cada región investigue en base a sus materiales locales, siendo el reciclado con AE, una alternativa recomendada. Ensayos a escala real o seguimientos de pistas tratadas deben realizarse.

BIBLIOGRAFIA

- Asphalt Academy. (2009). *Technical Guideline : Bitumen Stabilised Materials* (Second edi., pp. 1–148). Pretoria.
- Austrroads, G. (2013). *AP-T226-13 Austrroads Technical Report: Improved Design of Bituminous Stabilised Pavements* (p. 127). Sydney, Australia: March 2013.
- Browne, A., y Stabilizers, H. (2012). Foamed bitumen stabilisation in New Zealand – A performance review and comparison with Australian and South African design philosophy. In *25th ARRB Conference – Shaping the future: Linking policy, research and outcomes* (pp. 1–13). Perth, Australia.
- CIIV, González M., (2010). *Caminos Bsicos y Reciclado de Asfalto Espumado* (pp. 1–86).
- Collings, D., y Jenkins, K. (2012). Pavement Rehabilitation using Bitumen Stabilisation. State-of-the-art. In *23 rd Road Pavement Forum*. Tweedie, KZN.
- Collings, D., y Thompson, H. (2008). A critical appraisal of the performance of foamed bitumen and bitumen emulsion treated materials. In *Proceedings of the 9th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa (CAPSA'07)* (pp. 85–103). Salamanca, España.
- Collings, DC. (2001). Experiencias adquiridas durante 10 años en la rehabilitación de firmes, mediante el reciclado in-situ con cemento y combinaciones de cemento y agentes bituminosos estabilizadores. In *1er Simposio internacional sobre estabilización de explanadas y reciclado in situ de firmes con cemento* (pp. 85–103). Salamanca, España.
- F. Long, y Ventura, D. (2004). *Laboratory Testing for the HVS Sections on the N7 (TR11/1), Contract Report CR-2003/56* (Vol. 7).
- Frobel, T., y Hallett, J. (2008). Foamed Bitumen Stabilisation in New Zealand - Projects, Do's and Don'ts, Performance. In *Proceedings of the Recycling & Stabilisation Conference* (pp. 1–31). Auckland, New Zeland.
- Fu, P. (2009). *Micromechanics for Foamed Asphalt Stabilized Materials*. University of California, Davis.
- Fu, P., Harvey, J., Jones, D., y Chao, Y. (2008). Understanding Internal Structure Characteristics of Foamed Asphalt Mixes with Fracture Face Image Analyses. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2057(1), 20–27. doi:10.3141/2057-03
- Fu, P., Jones, D., Harvey, J., y Bukhari, S. (2008). Dry and Soaked Laboratory Tests for Foamed Asphalt Mixes. *Journal of the Asphalt Paving Technologists*, 77(Association of Asphalt Paving Technologists), 71–106.

- Fu, P., Steven, B. D., Jones, D., Harvey, J. T., y Ave, O. S. (2009). Relating Laboratory Foamed Asphalt Mix Resilient Modulus Tests to Field Measurements. *Road Materials and Pavements Design*, 10(1), 155–185.10.155-185
- Garnica, P., Gómez, J. A., & Martinez, J. A. S. (2002). *Mecánica de materiales para pavimentos* (pp. 1–234). Mexico.
- González, A, y Cubrinovski, M. (2011). Strength and Deformational Characteristics of Foamed Bitumen Mixes under Suboptimal Conditions. *Journal of Transportation Engineering*, 137(January), 1–10. Retrieved from [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000185](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000185)
- González, A., Cubrinovski, M., Pidwerbesky, B., y Alabaster, D. (2012). Desempeño de pavimentos estabilizado con asfalto espumado en una prueba de pavimentos a escala real y carga acelerada. *Revista Ingeniería de Construcción*, 27(2), 5–17.
- González, A., (2009). *An experimental study of the deformational and performance characteristics of foamed bitumen stabilised pavements*. University of Canterbury.
- Halles, F., & Thenoux, G. (2010). Determinación de las propiedades de desempeño en mezclas recicladas con asfalto espumado y cemento o cal como filler activo.
- Halles, F., Thenoux, G., y González, A. (2012). Evolución de la rigidez de los materiales granulares estabilizados con asfalto espumado. In *10 PROVIAL* (pp. 1–11). Santiago.
- Jenkins, K., Long, F. M., y Ebels, L. J. (2007). Foamed bitumen mixes = shear performance? *International Journal of Pavement Engineering*, 8(2), 85–98. doi:10.1080/10298430601149718
- Jenkins, K., (2009). TG2 Revision Bitumen Stabilised Materials Mix & Structural Desig. In *Recycling Seminar Wirtgen Macchine* (p. 66). Milan, Italy.
- Jenkins, K., (2012). Research of BSMs Influence on their Design. In *Road Pavements Forum* (p. 28). Tweedie.
- Jenkins, K. (2000). *Mix Design Considerations for Cold and Half-Warm Bituminous Mixes with Emphasis on Foamed Bitumen*, PhD dissertation. University of Stellenbosch, South Africa.
- Jones, D., Fu, P., Harvey, J., y Halles, F. (2008). *Full-Depth Pavement Reclamation with Foamed Asphalt: Final Report* (pp. 1–293).
- Jooste, F., Long, F., y Hefer, A. (2007). *A Method for Consistent Classification of Materials for Pavement Rehabilitation Design Technical Memorandum* (Vol. 1000).
- Kim, Y., Lee, H., & Heitzman, M. (2008). Laboratory Evaluation of Cold In-place Recycling Mixtures using Foamed Asphalt Based on Dynamic Modulus and Repeated

Dynamic Load Tests. In *CD-ROM: Transportation Research Board Annual Meeting*. Washington, D.C.

Leek, C., y Jameson, G. (2011). *AUSTROADS Technical Report: Review of Foamed Bitumen Stabilisation Mix Design Methods* (pp. 1–47). Sydney: Austroads Ltd.

Long, F., y Theyse, H. (2002a). *Second Level Analysis of the HVS Data from Road P243 /1, Confidential Contract Report CR-2002/23*. CSIR (p. 38). Pretoria, South Africa.

Long, F., y Theyse, H. (2002b). *Laboratory Testing on Foamed Bitumen and Cement Treated Material from the HVS Test Sections on Road P243/1* (pp. 1–51). Pretoria, South Africa.

MOP-Chile. (2012). *Manual de Carreteras. Especificaciones Técnicas Generales de Construcción. Volumen N° 5* (2012th ed., pp. 1–668).

Saleh, M. F. (2007). Effect of rheology on the bitumen foamability and mechanical properties of foam bitumen stabilised mixes. *International Journal of Pavement Engineering*, 8(2), 99–110. doi:10.1080/10298430601149650

Thenoux, G. (2011). *Tecnología del Asfalto Espumado. Curso de Caminos de Bajo Volumen de Transito*. PUC. Santiago de Chile.

Thenoux, G., González, A., y Dowling, R. (2007). Energy consumption comparison for different asphalt pavements rehabilitation techniques used in Chile. *Resources, Conservation and Recycling*, 49(4), 325–339. doi:10.1016/j.resconrec.2006.02.005

Thenoux, G., González, A., y Jamet, A. (2003). Primer Proyecto de Reciclado en Chile. *Revista Ingeniería de Construcción*, 18(3), 148–156.

Thenoux, G., Gonzalez, A., y Jamet A., (2003). Aspectos constructivos del primer proyecto de reciclado en frío in-situ con asfalto espumado en Chile. *Revista Ingeniería de Construcción*, 18, 148–156.

Theyse, H., Long, F., Harvey, J. T., & Monismith, C. L. (2004). *Discussion of Deep In-Situ Recycling (DISR). Davis and Berkeley, CA: University of California Pavement Research Center (TM-UCB-PRC-2004-6)* (pp. 1–26).

Wirtgen, G. (2012). *Wirtgen Cold Recycling Technology* (1 edition ., pp. 1–370). Windhagen, Germany.

ANEXOS

ANEXO A: DISCUSIÓN SOBRE LA CONTEXTUALIZACIÓN LABORATORIO-SOLICITACIONES EN TERRENO

El primer proyecto de reciclado de pavimento asfáltico se desarrolló en el Año 2002 (Thenoux et al, 2003), mientras que en Sudáfrica al experiencia se inicia en el año 1991 (Collings, 2001), siendo estos los principales líderes en la aplicación de la técnica, además de otros países que también siguen estudiando estos materiales y a su vez aumentando los kilómetros de pavimentos tratados con AE.

Siempre en el contexto de discusión, se hace mención a la aplicabilidad de la técnica en terreno, especialmente en ciertas zonas de Chile, cuya relación con los estudios de laboratorio no siempre pueden ser satisfechas o cubiertas. Muchos sectores con pavimentos deteriorados tienen la necesidad de una rehabilitación, los cuales muchas veces no se realizan por un desconocimiento del producto o miedo a un posible mal desempeño, pero los esfuerzos sobre el conocimiento de estos materiales justamente deben iniciarse con investigaciones en laboratorio que busquen aportar conocimiento sobre el producto, y que realmente sea de provecho a lo largo del ciclo de vida del proyecto, en este caso, materiales reciclados de pavimentos asfálticos deteriorados con la técnica de asfalto espumado.

Siendo el Norte de Chile el sector donde actualmente (únicamente) se desarrollan reciclados con AE, como aporte y dentro de un enfoque de discusión se menciona la necesidad de investigación en Chile para los otros sectores (centro y sur), cuyas condiciones de medioambientales son diferentes. Esta observación se representa en la Tabla siguiente.

Independiente a los tipos de ensayos realizados, se pudo observar en terreno el desarrollo y control de ejecución de un Proyecto de reciclado de un pavimento asfáltico, específicamente una rehabilitación en el norte de Chile, cuyo procedimiento y aplicación de demostró que se tiene una amplia conformidad sobre todo un entendimiento de las

ventajas de liberar al tránsito a temprana edad, la reutilización del material/pavimento existente, entre otros, pero también se admite que se debe seguir discutiendo respecto al producto entregado. Estas observaciones se describen en el Anexo Visita a Terreno.

Zona de Chile	Antecedente de Aplicación	Conocimiento de los materiales	Aplicabilidad
 Norte Centro Sur	SI. Varios años de aplicación. En la actualidad se ejecutan más de 100 km/año.	SI. La capacidad de soporte de la subrasante es alta. Ausencia de agua. Se sabe que el producto sirve	SI. La técnica es conocida por el mandate y constructor.
	SI. Angol (húmedo)* /Copiapo (semi seco)**	SI. *Con malas y **buenas experiencias respecto a la aplicación. Se reconoció variabilidad del material y presencia de humedad a largo de la Traza	SI Variaciones del material a tratar deben preverse. Drenajes y tratamientos ante presencia de agua
	NO Existen antecedentes con otras estabilizaciones (ej. estabilización con cemento)	NO Estabilizaciones con asfalto deben realizarse y prever la presencia de suelos arcillosos. La humedad y/o saturación de suelo son relevantes	NO/SI Sin tratamientos de drenaje o de los materiales húmedos no puede aplicarse. Se necesitan buenos estudios de proyecto.

Dentro de todas las aceptaciones y cuestionamientos a la técnica las rehabilitación de pavimentos con AE, la misma ha ido ganando éxito, y algunos autores piensan que se debe a la aplicación de una ingeniería adecuada, junto con prácticas correctas de construcción (Collings et al, 2008). Collings y Jenkins (2012) mencionan: “*Se debe cuestionar la filosofía del diseño actual detrás de los tratamientos con AE, basados en datos de laboratorio y observaciones en campo, sin argumentos filosóficos*”.

Collings et al. (2012) añaden, que la adición de un agente de estabilización asfáltico mejora el rendimiento del material reciclado, proporcionando flexibilidad y durabilidad. Donde el aporte al factor durabilidad se debe a un menor mantenimiento y otras intervenciones, debido a que el costo durante la vida del pavimento reciclado debería de ser menor, bajo un nivel aceptable de servicio durante la vida de diseño del pavimento, así como el mismo costo de la rehabilitación.

El verdadero valor en los materiales tratados con asfalto, según estas investigaciones, recién está comenzando a recibir la atención que merece (Collings et al, 2012). A medida que aumenta su uso, la investigación va a seguir, lo que permite que la tecnología pueda expandirse, en la medida que vaya ganado la confianza de los profesionales, junto con la mejor comprensión de la tecnología(Collings et al, 2012).

ANEXO B VISITA A TERRENO

Obra:	Reposición pavimento Ruta 5 (etapa 2) Tramo DM 1781,000 al 1801,000 . Comuna de Pozo Almonte. REGION DE TARAPACA.
--------------	--

FECHA: Octubre 2012

GENERALIDADES

Se describe ordenadamente observaciones al proceso constructivo observado. Igualmente se acompañó y ejecutaron los respectivos controles de calidad, principalmente los ensayos (ITS) en muestras de terreno, las cuales difieren del diseño de mezclas realizado en laboratorio, cuyas diferencias son evidentes y es uno de los objetivos de esta investigación identificarlas. Si bien la obra emplazada se encuentra en zona norte y desértica (sin agua), se observaron muchos puntos de variabilidad, dado en el tipo granulometría o espesor de capa y en los cambios de temperatura (mañana frescas/tardes calurosas), donde el asfalto inyectado y temperatura de áridos son diferentes. El equipo ocupado está liderado por la maquina recicladora (WR 2400), cuyo ancho de trabajo es de 2,4m. El diseño (DICTUC S.A.) de mezclas reciclada resulto según las siguientes características:

Contenido óptimo de asfalto:	2,5%
Contenido cemento:	1%
Contenido de agua de compactación:	5,1%

El desempeño de pistas liberadas al tránsito (liviano/pesado) es una forma de evaluar el tratamiento material reciclado, pero esta conformidad muchas veces no puede ser bien reflejada en los ensayos tradicionales en laboratorio, cuyos resultados no reflejan necesariamente valores claros, por más que se cumplan los mínimos exigidos según las especificaciones.

OBSERVACIONES.

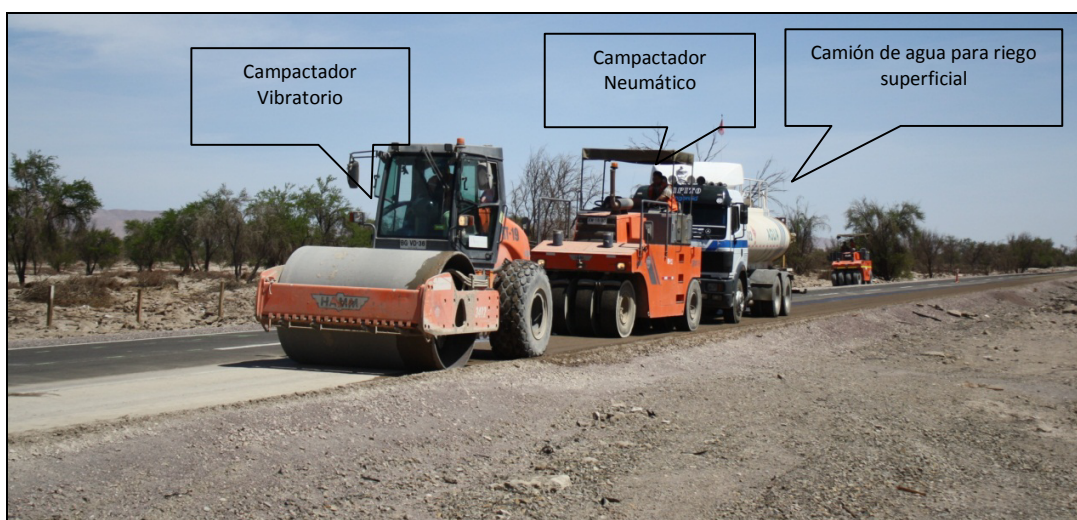
1. **Proceso constructivo:** Siendo el ancho del tambor de trituración/mezclado es de 2,4m, este genera 4 cortes (fajas) de trabajo las cuales cubren los 7m de las dos pistas (3,5m) y 40 cm de cada berma, dándose tres pequeños traslapos (material triturado dos veces). El reciclado incluye parte de la berma sobre la cual no se extiende cemento y tampoco se inyecta AE. Los cortes promedian una longitud de 900m trabajo, y normalmente se desarrollan dos cortes/día. El pavimento carece de berma, por lo que el proyecto conformara una nueva berma tratada con la técnica, además se prevé fresar o regularizar la superficie reciclada y el material sobrante utilizarlo para la conformar la berma.



2. **Regularidad en el Desempeño del Tren Reciclador:** La constancia de trabajo del tren reciclador está liderada por la máquina recicladora, la cual se considera muy consistente, pero dependiente de la capacidad y consumo del camión de asfalto, cuyo vaciamiento normalmente define la longitud de corte. Si bien el camión proveedor de asfalto define la longitud de reciclado, la pausa o recambio se da por el camión proveedor de agua, cuyo consumo entiéndase es mayor. Bajo este esquema de trabajo, el cálculo de longitud de trabajo podría variar no muy significativamente, pero si debe preverse la cantidad de cemento extendido de manera que cubrir al posible variación de longitud. Se hace muy relevante la planificación y organización, no solo en la capacidad de los equipos, sino además en la exigencia y desempeño del personal en las distintas funciones.



3. Proceso de conformación y compactación del material reciclado. Las huellas dejadas la rueda de la maquina recicladora son evidentes luego de la trituración y mezcla respectiva. Posterior al paso del reciclador interviene la motoniveladora la cual conforma y regulariza el espesor de material reciclado, si bien este también deja huellas en su paso lo ideal es que esta se apoye en material no tratado o ya compactado. Este proceso depende principalmente del manejo del operador y en su caso de las observaciones del inspector de pista que permite detectar puntos que deban reprocesarse u orearse. Se observa la necesidad de disponer de un buen operador de la motoniveladora.

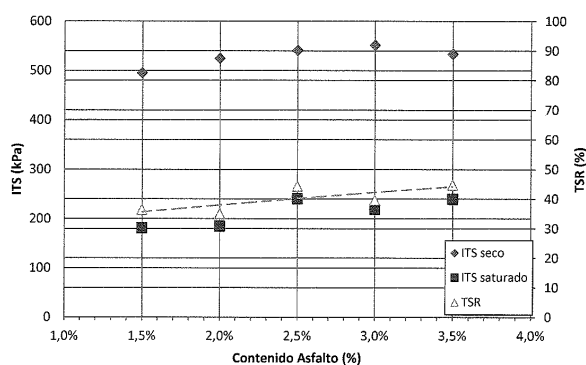


La compactación la lidera el compactador vibratorio (en este caso liso), el cual en algunos casos puede encontrar puntos de apoyo o falta de uniformidad de compactación en el ancho de tambor vibratorio, lo que a veces genera fajas de material con compactación deficiente. Dicha observación puede corregirse en parte por el paso del compactador neumático que actúa inmediatamente finalizadas las pasadas del compactador liso, pero este actúa más bien dejando la superficie sellada. Inmediatamente se procede a regar la superficie y posterior liberación al tránsito.

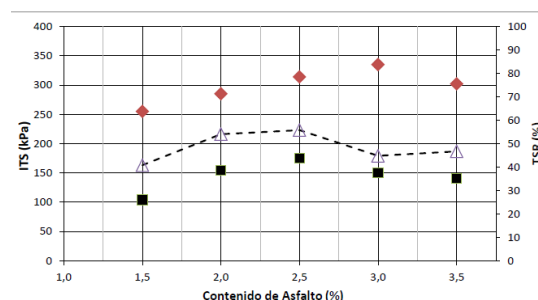
4. **Reutilización de exceso de material tratado como berma.** De manera a obtener la nivelación según topografía del material reciclado se prevé fresar el exceso, considerando que el mismo se encuentra aproximadamente 2cm sobre de la cota definitiva de la capa reciclada, dicho exceso se ocupara como parte de la nueva berma a conformar y compactar nuevamente. Se evidencia irregularidades superficiales o ahuellamiento (ruedas maquina) en la superficie del material reciclado, el cual deberá ser corregido.



5. **Variación ITS Diseño vs ITS Terreno:** Esta observación afirma la inconsistencia entre el diseño de mezcla que se desarrolla y las muestras en terreno, o en su caso puede identificarse variaciones de las condiciones, siendo un punto a estudiar. No obstante la tendencia hacia el contenido óptimo de asfalto se mantiene, y podría cuestionarse que los valores considerando la diferencia marginal entre los distintos porcentajes es alta.



ITS Diseño de Mezcla (previo a la construcción)



ITS Pistas en construcción

6. **Variaciones de Temperatura:** Considerando el clima (desértico) de la región, la variación de temperatura, en la mañana relativamente frescas, versus tardes calurosas, la condición del bitumen estabilizador varia, observándose en la tarde un material reciclado con un asfalto mucho más activo o blando al tacto. Esto podría resultar en valores diferentes en pistas según el momento ejecución, el cual debería de estudiarse. Dicha inspección se muestra en las figuras siguientes.



7. **Reutilización de exceso de material tratado como berma.** Considerando el clima (desértico) de la región, la variación de temperatura, en la mañana relativamente frescas, versus tardes calurosas, la condición del bitumen estabilizador varia, observándose en la tarde un material reciclado con un asfalto mucho más activo o blando al tacto. Esto podría resultar en valores diferentes en pistas según el momento ejecución, el cual debería de estudiarse. Dicha inspección se muestra en las figuras siguientes.

Conclusiones y Recomendaciones

- Se destaca la predisposición del constructor en estudiar al material reciclado, desde dos enfoques principalmente: entender al mejor a producto reciclado y buscar procedimientos constructivos más efectivos.
- El primer control de calidad externo al ejecutor, es el paso del tránsito pesado que permite evaluar empírica y rápidamente el desempeño de pistas terminadas.
- Las pistas liberadas tienen la conformidad en el desempeño ante cargas, esta debe ser mejor interpretada en laboratorio mediante ensayos mecánicos más validos que los tradicionales.
- La calidad en la terminación de pistas, si bien puede ser corregida, debería de ser ajustada o mejorada mediante procesos más eficientes, sobre todo cuando se tenga superficies de rodados con nulo aporte estructural (tratamientos superficiales, lechadas, etc.)
- Si bien existe un proyecto ejecutado en el sur de Chile y considerando las ventajas que ofrecer este tipo de rehabilitación, deberían de abordarse estudios en situaciones distintas al norte de Chile (ausencia de agua). La técnica podría extenderse a otros casos de rehabilitación, con el estudio y cuidado correspondiente.

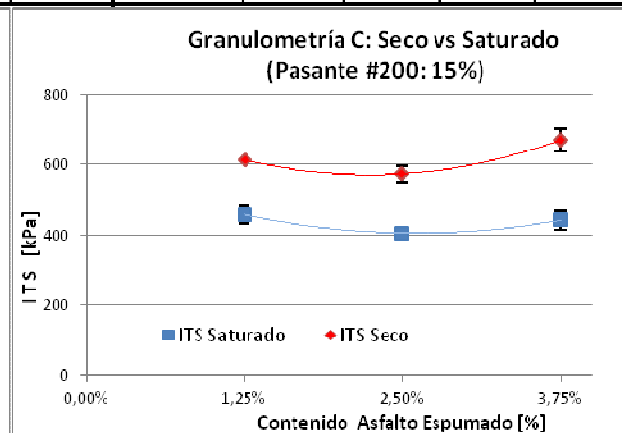
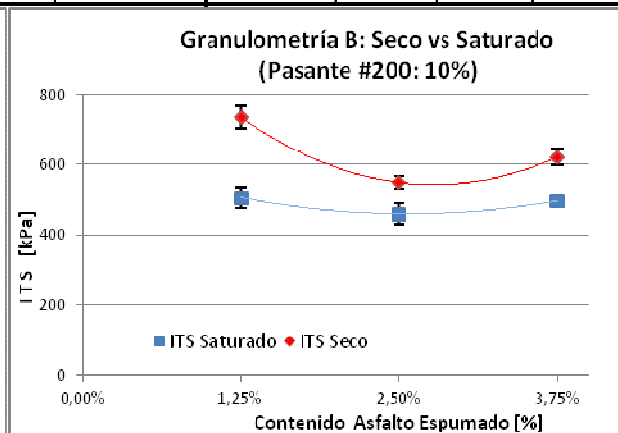
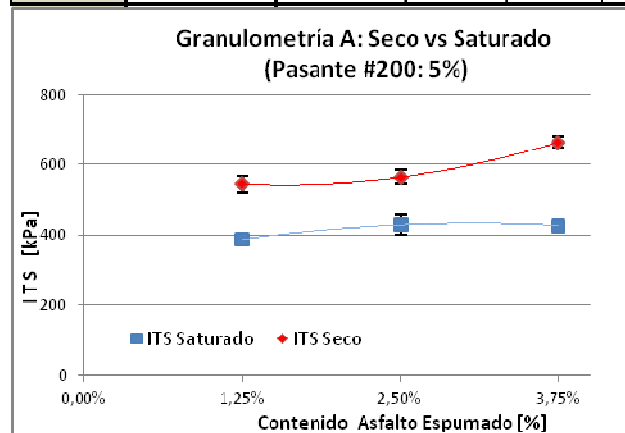


FERNANDO PANIAGUA
Estudiante de Magister en Ingeniería
Pontificia Universidad Católica, de Chile

ANEXO C: RESULTADOS ENSAYO DE TRACCION INDIRECTA (ITS)

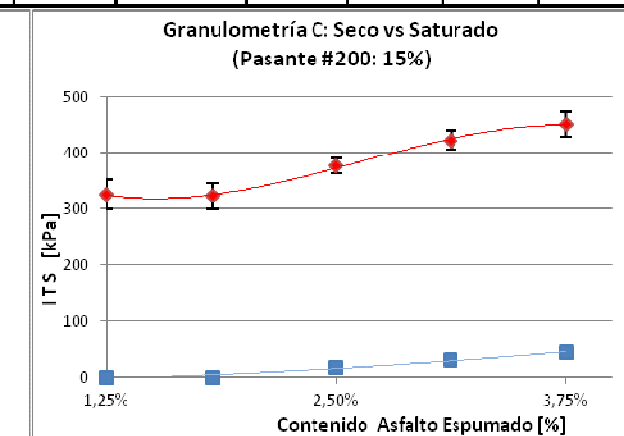
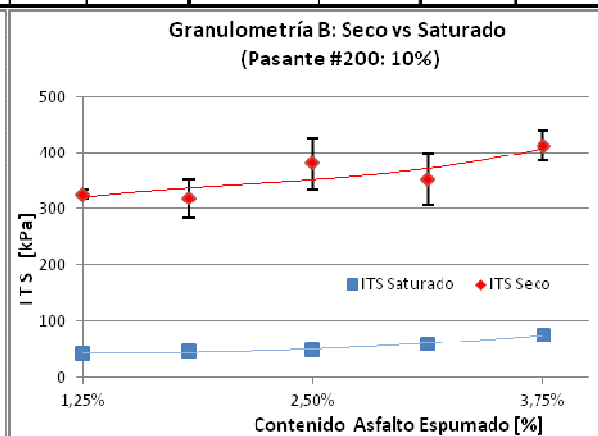
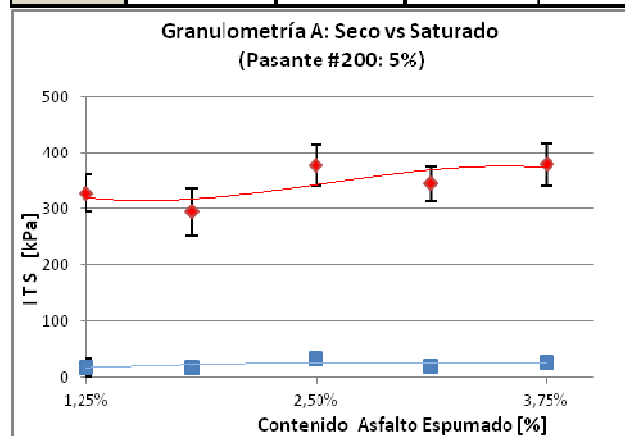
Escuela de Ingeniería - PUC							
ENSAYO DE TRACCION INDIRECTA (ITS)							
Molde:	Cilíndrico Marshall	Φ:	101,5mm	h:	63,5mm	Golpes:	75x2 Caras
Cantidad de Probetas:						4 x condición	

% AE	Granulometría															
	Pasante #200	A					B					C				
		5%					10%					15%				
	Condición de Ensayo	ITS Promedio [kPa]	Desv. Estánd. [kPa]	Coef. Varia. [%]	RS [%]	Energía [J]	ITS Promedio [kPa]	Desv. Estánd. [kPa]	Coef. Varia. [%]	RS [%]	Energía [J]	ITS Promedio [kPa]	Desv. Estánd. [kPa]	Coef. Varia. [%]	RS [%]	Energía [J]
1.25%	Seco	545.1	23	4%	71%	2.3	734.5	32	4%	69%	3.3	614.4	23.0	4%	75%	2.6
	Saturado	387.2	8	2%			505.4	32	6%		1.8	458.0	24.7	5%		1.6
2.50%	Seco	564.1	20	3%	76%	2.5	549.3	18	3%	84%	2.4	573.9	31.8	6%	71%	2.5
	Saturado	428.4	29	7%		1.6	458.9	30	7%		1.7	405.3	14.8	4%		1.4
3.75%	Seco	664.5	17	3%	64%	3.0	621.5	23	5%	80%	2.8	671.3	3.3	0%	66%	2.9
	Saturado	426.8	10	2%		1.7	496.0	18	4%		2.0	442.3	26.6	6%		1.8



Escuela de Ingeniería - PUC									
ENSAYO DE TRACCION INDIRECTA (ITS). Mezcla "solo AE".									
Molde:	Cilíndrico Marshall	Φ:	101,5mm	h:	63,5mm	Golpes:	75x2 Caras	Cantidad de Probetas:	3 x condición

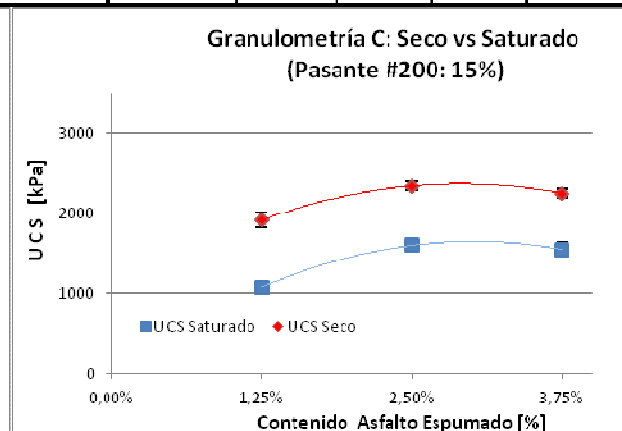
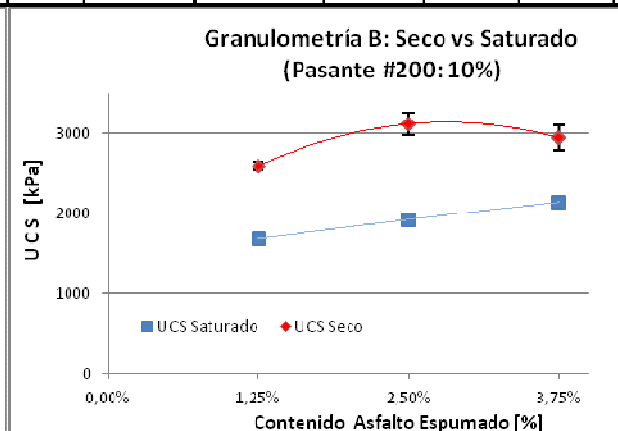
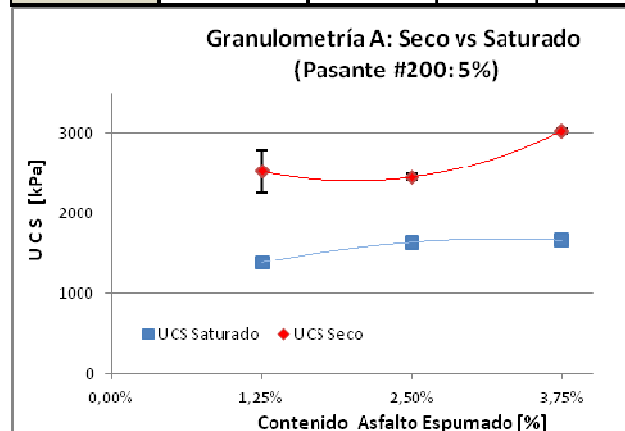
% AE	Granulome tría															
	Pasante #200	A					B					C				
		5%					10%					15%				
	Condición de Ensayo	ITS Promedio [kPa]	Desv. Estánd. [kPa]	Coef. Varia. [%]	RS [%]	Energía [J]	ITS Promedio [kPa]	Desv. Estánd. [kPa]	Coef. Varia. [%]	RS [%]	Energía [J]	ITS Promedio [kPa]	Desv. Estánd. [kPa]	Coef. Varia. [%]	RS [%]	Energía [J]
1.25%	Seco	328.0	32.9	10%	5%	0.97	327.0	8	3%	13%	0.92	326.0	26.9	8%	0%	0.97
	Saturado	18.0	15.7	87%		0.05	41.0	7	18%		0.21	0.0	0.0	0%		0.00
1.88%	Seco	295.0	41.7	14%	6%	1.36	318.4	35	11%	15%	1.65	323.0	23.3	7%	0%	0.88
	Saturado	18.0	3.5	19%		0.05	46.9	1	2%		0.18	0.0	0.0	0%		0.00
2.50%	Seco	378.0	35.9	9%	9%	1.18	380.6	45	12%	13%	2.05	377.0	13.5	4%	5%	1.02
	Saturado	33.0	4.5	14%		0.11	47.8	2	4%		0.28	18.0	6.6	37%		0.05
3.13%	Seco	345.0	30.0	9%	6%	1.32	352.3	46	13%	17%	1.48	422.0	16.9	4%	7%	1.32
	Saturado	20.0	9.5	48%		0.09	60.0	5	9%		0.44	30.0	8.2	27%		0.09
3.75%	Seco	379.0	37.2	10%	7%	1.43	413.4	27	6%	18%	2.02	450.0	21.6	5%	10%	1.56
	Saturado	26.0	3.0	12%		0.11	75.3	5	7%		0.42	44.0	2.5	6%		0.17



ANEXO D: RESULTADOS ENSAYO DE COMPRESION SIMPLE NO CONFINADA (UCS)

Escuela de Ingeniería - PUC															
ENSAYO DE COMPRESION SIMPLE NO CONFINADA (UCS)															
Molde:	Cilíndrico		Φ:	100 mm		h:	120mm		Golpes:	25 en 5 Capas		Cantidad de Probetas:	3 x condición curado		

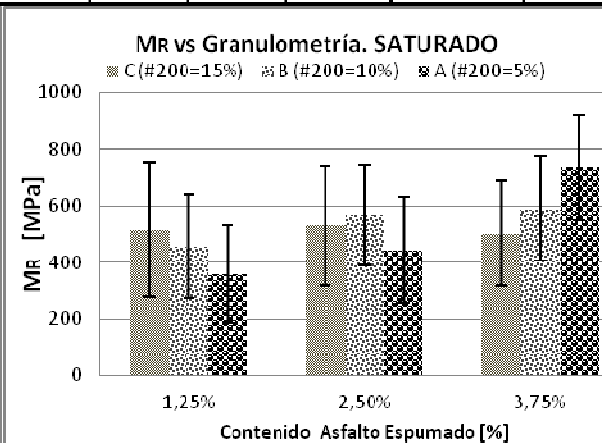
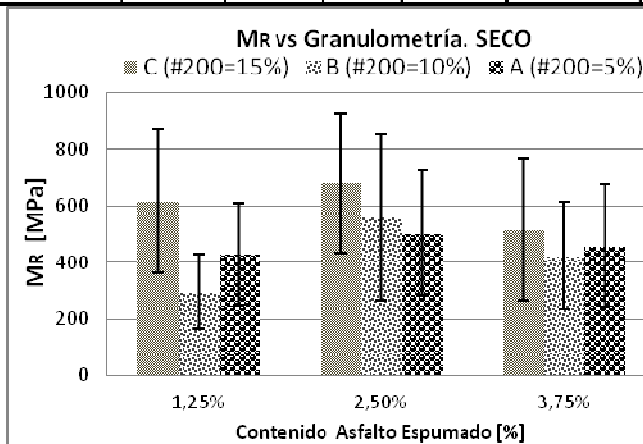
% AE	Granulometría															
	Pasante #200	A					B					C				
		5%					10%					15%				
	Condición de Ensayo	UCS Promedio [kPa]	Desv. Estánd. [kPa]	Coef. Varia. [%]	RS [%]	Energía [J]	UCS Promedio [kPa]	Desv. Estánd. [kPa]	Coef. Varia. [%]	RS [%]	Energía [J]	UCS Promedio [kPa]	Desv. Estánd. [kPa]	Coef. Varia. [%]	RS [%]	Energía [J]
1.25%	Seco	2522.3	258	10%	55%	105	2591.9	52	5%	65%	112	1915.0	92	5%	56%	78
	Saturado	1384.0	47	3%		57	1684.5	13	6%		68	1078.4	61	6%		42
2.50%	Seco	2449.1	37	2%	67%	85	3111.8	140	2%	62%	126	2342.0	56	2%	68%	85
	Saturado	1641.2	72	4%		57	1922.2	56	4%		76	1599.0	68	4%		46
3.75%	Seco	3025.2	34	1%	55%	137	2939.9	155	2%	73%	132	2251.1	49	2%	69%	98
	Saturado	1664.1	49	3%		72	2137.8	45	6%		84	1551.2	87	6%		71



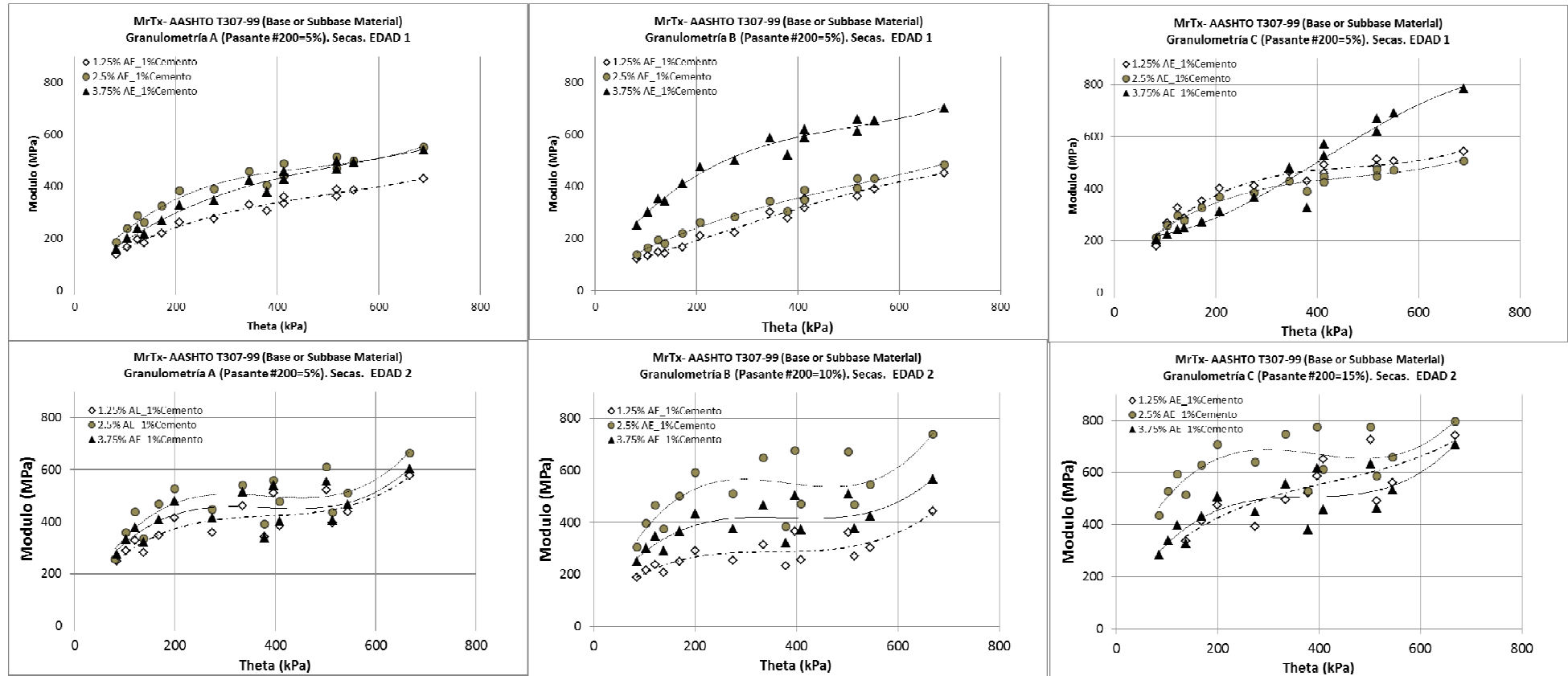
ANEXO E: RESULTADOS ENSAYO DE MODULO RESILIENTE TRIAXIAL (MRTX)

Escuela de Ingeniería - PUC							
ENSAYO DE MODULO RESILIENTE TRIAXIAL (MrTx)							
Molde:	Cilíndrico Marshall	Φ: 101,5mm	h: 200 mm	Golpes:	55x5 Caras	Cantidad de Probetas:	2 x condición

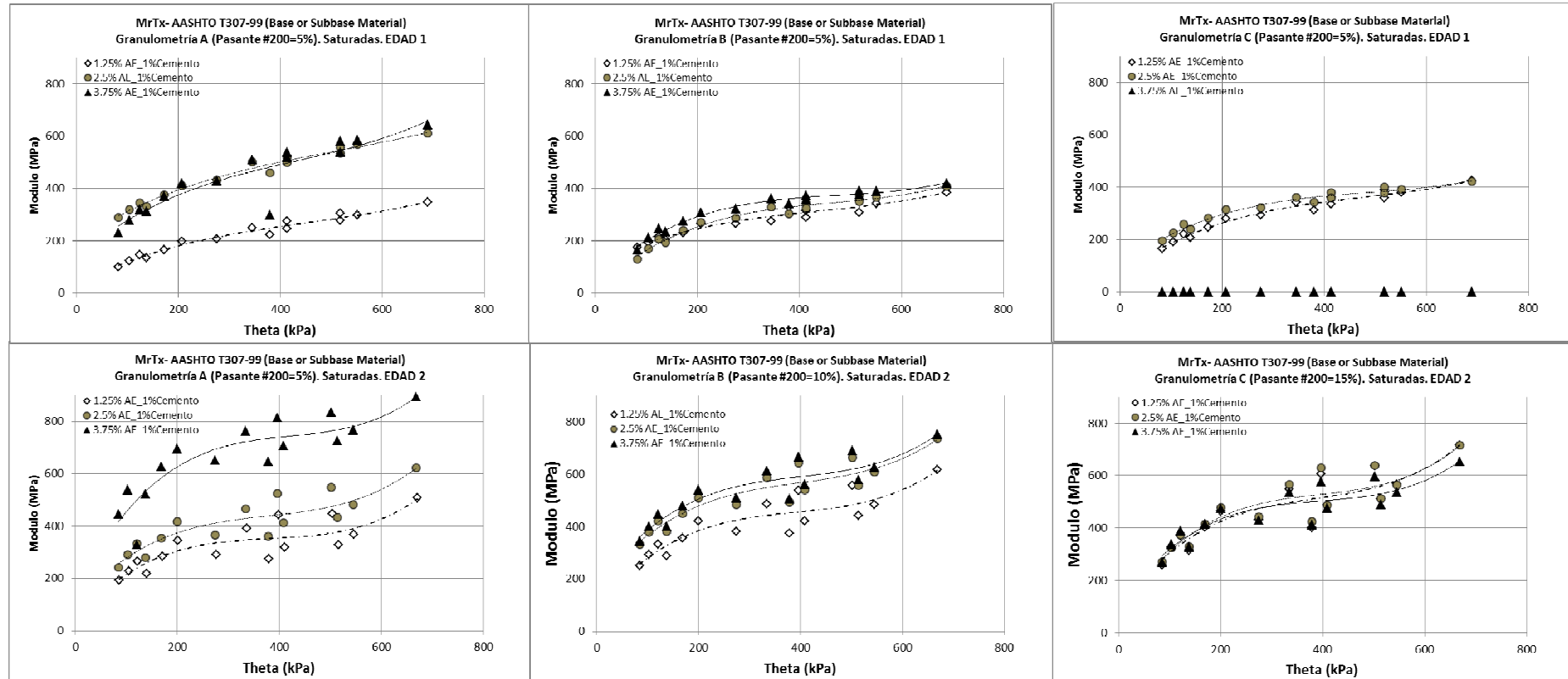
% AE	Granulometría															
	Pasante #200	A					B					C				
		5% finos					10% finos					15% finos				
	Condición de Ensayo	MR Promedio [MPa]	Desv. Estánd. [kPa]	Coef. Varia. [%]	RS [%]	Energía [J]	MR Promedio [MPa]	Desv. Estánd. [kPa]	Coef. Varia. [%]	RS [%]	Energía [J]	MR Promedio [MPa]	Desv. Estánd. [kPa]	Coef. Varia. [%]	RS [%]	Energía [J]
1.25%	Seco	429.5	179		84%		297.1	133		155%		616.2	253.2		84%	
	Saturado	360.3	171				459.7	182				517.4	236.9			
2.50%	Seco	504.1	219		88%		560.0	291		102%		681.0	247.2		78%	
	Saturado	445.5	187				569.0	180				531.1	213.2			
3.75%	Seco	460.1	218		160%		424.0	189		139%		517.1	251.8		97%	
	Saturado	735.2	189				591.2	185				503.4	184.8			



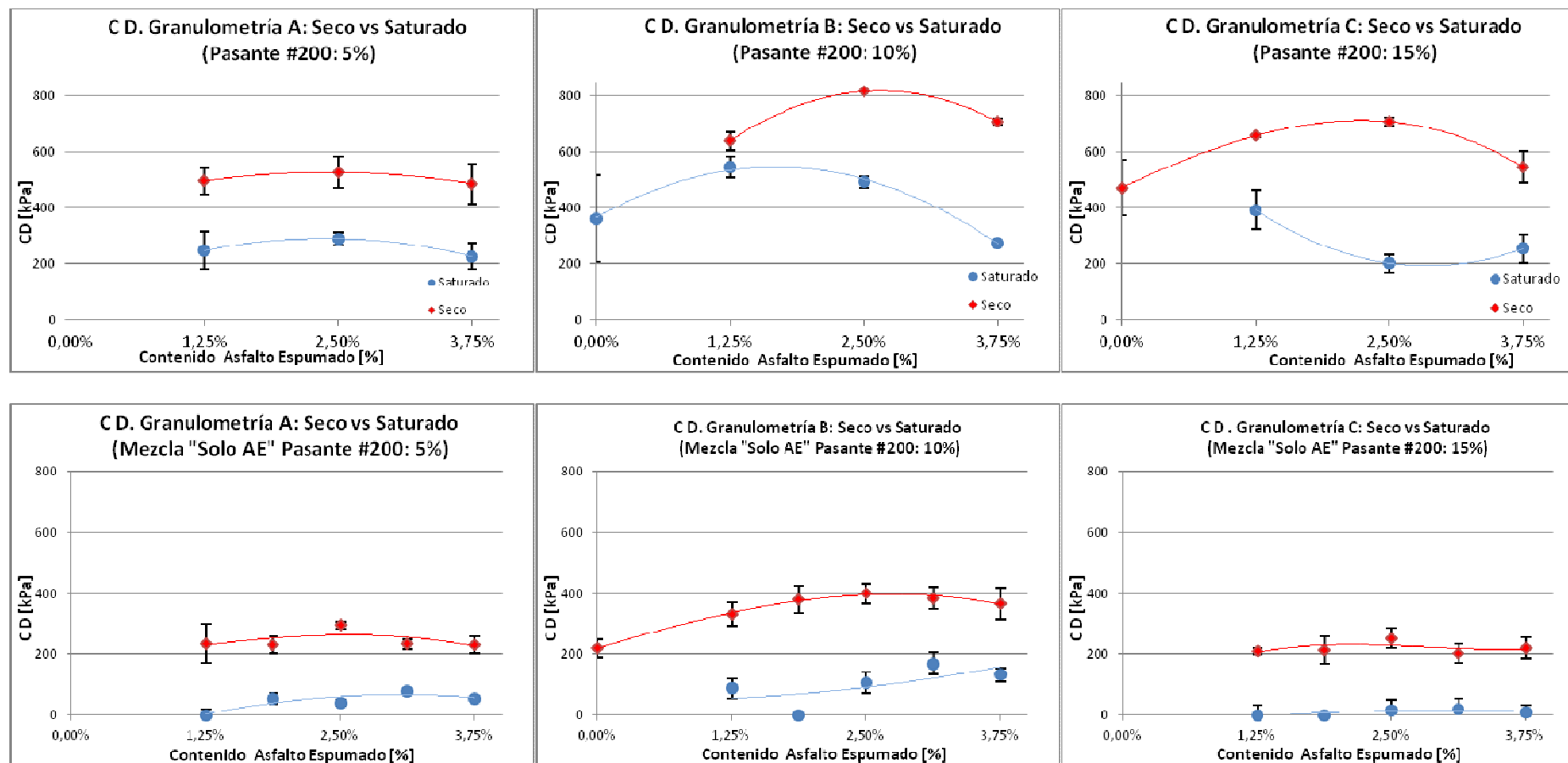
GRAFICOS MrTx SEGÚN TIPO DE MEZCLA ENSAYADAS EN CONDICIONES SECAS



GRAFICOS MrTx SEGÚN TIPO DE MEZCLA ENSAYADAS EN CONDICIONES SATURADAS

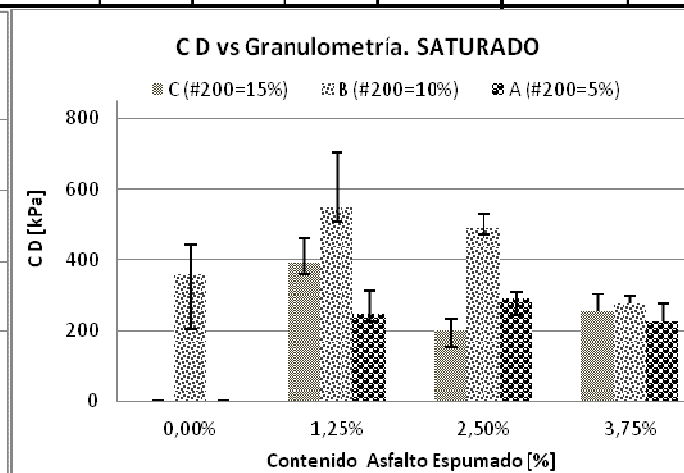
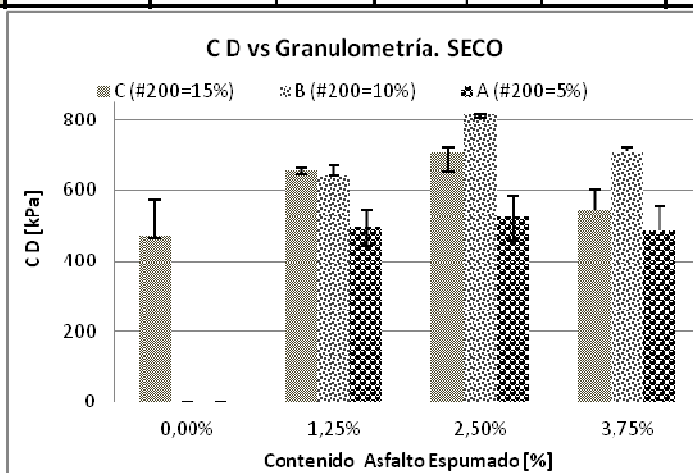


ANEXO F: RESULTADOS ENSAYO DE CORTE DIRECTO (CD)



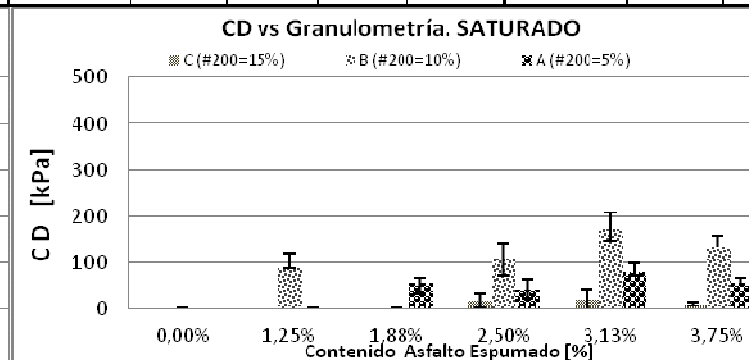
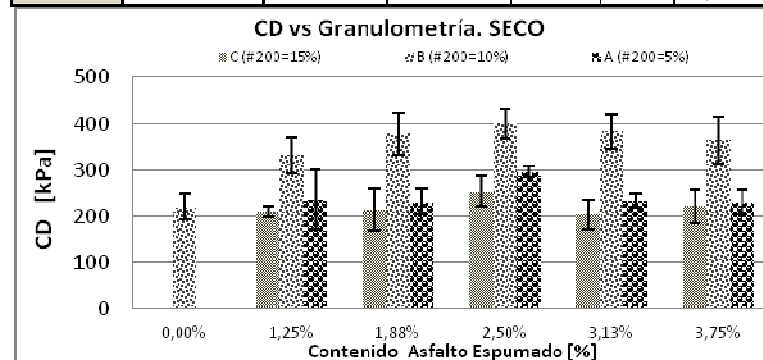
Escuela de Ingeniería - PUC							
ENSAYO DE CORTE DIRECTO (CD)							
Cilíndrico Encamisado. Marshall	Φ: 97,5mm	h: 25mm	Comp.: Proctor M.		Muestras: 3 x condición de ensayo		

% AE	Pasante #200	Granulometría														
		A					B					C				
		5%					10%					15%				
		CD Promedio [kPa]	Desv. Estánd. [kPa]	Coef. Varia. [%]	RS [%]	Densidad Seca [kg/m3]	CD Promedio [kPa]	Desv. Estánd. [kPa]	Coef. Varia. [%]	RS [%]	Densidad Seca [kg/m3]	CD Promedio [kPa]	Desv. Estánd. [kPa]	Coef. Varia. [%]	RS [%]	Densidad Seca [kg/m3]
0%	Seco											472.1	99.8	21%		
	Saturado						361.9	82	23%							
1.25%	Seco	496.4	48	10%	50%	2.045	640.5	32	5%	85%	2.078	658.4	7.0	1%	60%	2.050
	Saturado	247.5	68	27%		2.005	545.7	156	29%		2.104	393.6	69.9	18%		2.185
2.50%	Seco	527.5	55	10%	55%	2.003	817.1	0	0%	60%	2.065	708.7	13.8	2%	28%	2.020
	Saturado	290.6	22	8%		2.015	492.5	37	8%		2.137	201.9	32.8	16%		2.125
3.75%	Seco	486.2	71	15%	47%	1.938	709.3	11	2%	39%	2.039	546.3	56.8	10%	47%	1.991
	Saturado	226.8	48	21%		1.932	274.9	21	8%		2.129	254.7	50.7	20%		2.070



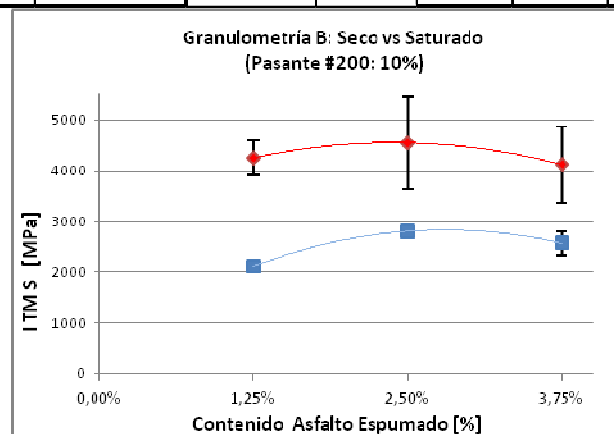
Escuela de Ingeniería - PUC									
ENSAYO DE CORTE DIRECTO (CD). Mezclas con solo Asfalto (sin cemento)									
Molde:	Cilíndrico DST	Φ:	101,5mm	h:	24mm	Golpes:	50	Cantidad de Probetas:	3 x condición

% AE	Granulometría															
	Pasante #200	A					B					C				
		5% finos					10% finos					15% finos				
		Condición de Ensayo	DSS Promedio [kPa]	Desv. Estánd. [kPa]	Coef. Varia. [%]	RS [%]	Energía [J]	DSS Promedio [kPa]	Desv. Estánd. [kPa]	Coef. Varia. [%]	RS [%]	Energía [J]	DSS Promedio [kPa]	Desv. Estánd. [kPa]	Coef. Varia. [%]	RS [%]
0%	Seco						220,0	29	13%	0%	0,9476					
	Saturado						0,0	0	0%		0					
1,25%	Seco	235,8	64	27%	0%	0,949	332,1	39	12%	26%	2,394	210,0	11,6	6%	0%	0,657
	Saturado	0,0	0	0%		0,000	87,6	32	37%		0,500	0,0	0,0	0%		0,000
1,88%	Seco	231,0	28	12%	24%	0,776	378,9	45	12%	0%	2,963	214,0	45,0	21%	0%	0,658
	Saturado	55,0	9	17%		0,194			0%		0,000	0,0	0,0	0%		0,000
2,50%	Seco	296,1	12	4%	14%	1,153	400,4	33	8%	27%	3,078	253,0	32,4	13%	7%	0,926
	Saturado	41,0	21	51%		0,169	107,2	34	32%		0,611	18,0	15,9	88%		0,076
3,13%	Seco	234,0	15	7%	34%	0,777	385,0	38	10%	44%	2,989	203,0	32,4	16%	9%	0,657
	Saturado	80,0	18	22%		0,575	170,6	37	22%		0,973	18,7	21,9	117%		0,010
3,75%	Seco	231,0	27	12%	24%	0,777	365,5	51	14%	36%	2,995	221,0	36,1	16%	5%	0,671
	Saturado	55,0	9	17%		0,322	132,7	23	18%		0,757	10,0	4,0	40%		0,073



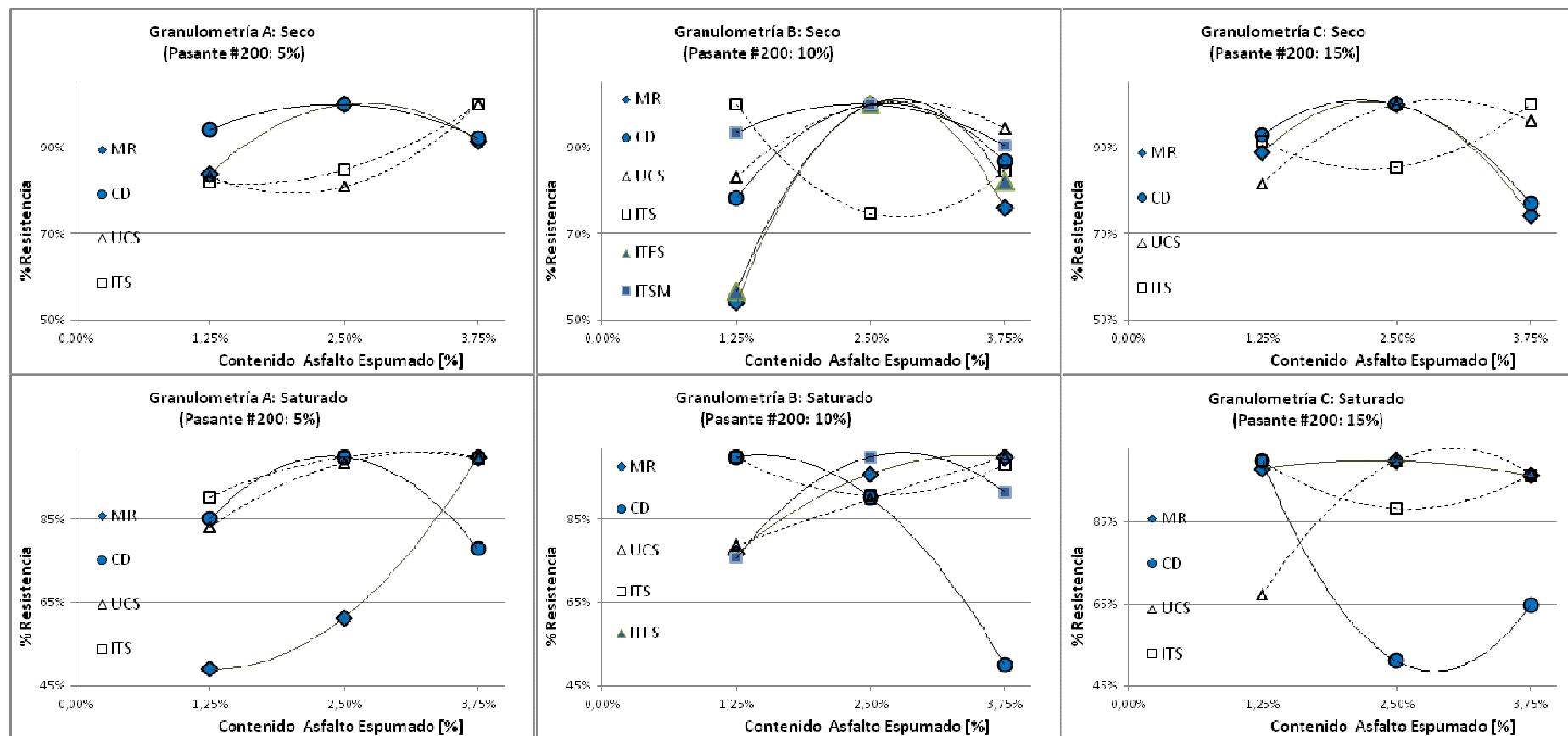
ANEXO G: RESULTADOS ENSAYO DE RIGIDEZ O MODULO ELASTICO POR TRACCION INDIRECTA (ITMS)

Escuela de Ingeniería - PUC																
ENSAYO DE MODULO ELASTICO POR TRACCION INDIRECTA (ITMS)																
Molde:	Cilíndrico Marshall	Φ:	101,5mm		h:	63,5mm		Golpes:	75x2 Caras		Cantidad de Probetas:		4 x condición			
% AE	Granulometría															
	Pasante #200	A					B					C				
		5%					10%					15%				
	Condición de Ensayo	ITMS Promedio [kPa]	Desv. Estánd. [MPa]	Coef. Varia. [%]	RS [%]	Energía [J]	ITMS Promedio [MPa]	Desv. Estánd. [MPa]	Coef. Varia. [%]	RS [%]	Energía [J]	ITMS Promedio [MPa]	Desv. Estánd. [MPa]	Coef. Varia. [%]	RS [%]	Energía [J]
	1.25%	Seco					4247.8	353	8%	50%						
Saturado						2128.3	75	6%								
2.50%	Seco						4543.8	907	3%	62%						
	Saturado						2808.8	76	7%							
3.75%	Seco						4116.0	752	5%	63%						
	Saturado						2573.3	221	4%							



ANEXO H: RESUMEN Y TENDENCIAS DE RESULTADOS

Escuela de Ingeniería - PUC														
RESUMEN DE GENERAL DE ENSAYOS EN MEZCLAS CON AE.														
Valor Referencial respecto a resultados obtenidos			A (#200=5%)				B (#200=10%)				C (#200=15%)			
			Seco		Saturado		Seco		Saturado		Seco		Saturado	
Ensayo de Laboratorio	Unidad	% de AE	Resistencia Mecánica	% Resistencia	Resistencia Mecánica	% Resistencia	Resistencia Mecánica	% Resistencia	Resistencia Mecánica	% Resistencia	Resistencia Mecánica	% Resistencia	Resistencia Mecánica	% Resistencia
ITS (Tracción indirecta)	[kPa]	0%	0.0	0%	0.0	0%	0.0	0%	0.0	0%	0.0	0%	0.0	0%
		1.25%	545.1	82%	387.2	90%	734.5	100%	505.4	100%	614.4	92%	458.0	100%
		2.50%	564.1	85%	428.4	100%	549.3	75%	458.9	91%	573.9	85%	405.3	88%
		3.75%	664.5	100%	426.8	100%	621.5	85%	496.0	98%	671.3	100%	442.3	97%
UCS (Compresión simple no confinada)	[kPa]	0%	0.0	0%	0.0	0%	0.0	0%	0.0	0%	0.0	0%	0.0	0%
		1.25%	2522.3	83%	1384.0	83%	2591.9	83%	1684.5	79%	1915.0	82%	1078.4	67%
		2.50%	2449.1	81%	1641.2	99%	3111.8	100%	1922.2	90%	2342.0	100%	1599.0	100%
		3.75%	3025.2	100%	1664.1	100%	2939.9	94%	2137.8	100%	2251.1	96%	1551.2	97%
M _R (Modulo Resiliente Triaxial)	[MPa Tenso dependiente]	0%	0	0%	0	0%		0%		0%		0%		0%
		1.25%	392.9	84%	326.4	49%	278.9	54%	416.4	77%	565.0	89%	468.6	98%
		2.50%	467.7	100%	408.1	62%	516.4	100%	519.2	96%	636.1	100%	477.5	100%
		3.75%	428.4	92%	663.3	100%	393.0	76%	541.2	100%	473.0	74%	460.3	96%
ITFS (Fatiga por Tracción Indirecta)	[N° Ciclos /Deformación Definida]	0%					0	0%						
		1.25%					5,375	57%						
		2.50%					9,455	100%						
		3.75%					7,775	82%						
CD (Corte Directo)	[kPa]	0%	0.0	0%	0.0	0%	0.0	0%	361.9	66%	472.1	67%	0.0	0%
		1.25%	496.4	94%	247.5	85%	640.5	78%	545.7	100%	658.4	93%	393.6	100%
		2.50%	527.5	100%	290.6	100%	817.1	100%	492.5	90%	708.7	100%	201.9	51%
		3.75%	486.2	92%	226.8	78%	709.3	87%	274.9	50%	546.3	77%	254.7	65%
ITSM (Modulo Elástico por Tracción Indirecta)	[MPa]	0%	0.0	0%	0.0	0%	0.0	0%	0.0	0%	0.0	0%	0.0	0%
		1.25%					4248	93%	2128	76%				
		2.50%					4544	100%	2809	100%				
		3.75%					4116	91%	2573	92%				



ANEXO I: PROPUESTA DE DISEÑO DE MEZCLAS

Propuesta para el diseño de mezclas

En base al trabajo desarrollado en laboratorio y una recopilación de datos dados por la experiencia en Chile, tanto en laboratorio, como en terreno (Ver Anexo Visita a Proyecto de Reciclado/Norte de Chile), se desarrolló un Esquema de abordaje al Diseño de Mezclas como muestra la Figura siguiente para materiales tratados con AE.

La propuesta debe cuestionada y retroalimentada de manera a validarla y en su caso disminuir pasos, siempre que exista una sinergia entre los datos de resultados obtenidos en laboratorio con su respectivo análisis y evaluaciones que puedan realizarse en terreno basados en desempeños. Sí, no se discute y analiza la mencionada propuesta mediante esta interacción laboratorio-desempeño en terreno, está no tendría razón de aplicación. La propuesta se divide en cuatro pasos:

- Pasos preliminares (caracterización del material a reciclar y uso de estabilizadores)
- Evaluación mecánica con ensayos tradicionales (ITS o UCS)
- Evaluación mecánica con ensayos complementarios (ITFS, MrTx, PdTx o CD)
- Post diseño (evaluación de desempeño en pistas tratadas)

Si bien la propuesta de diseño no abarca únicamente un trabajo en laboratorio previo a la ejecución en terreno, la necesidad de ir validando el mismo diseño previo a la ejecución debe realizarse vinculantemente a las evaluaciones en terreno.

Esquema propuesto para el diseño de mezclas de pavimentos asfálticos reciclados con AE

