

UNIVERSIDAD DE VALPARAÍSO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



Utilización de la Escoria de Cobre de CODELCO
Ventanas como Agregado para los Sellos de Alta
Fricción Implementado en Pavimentos Rígidos y
Flexibles.

Por

Guillermo Andrés Contreras Cuadro.

Trabajo de título para optar al Grado de Licenciado en
Ciencias de la Ingeniería y Título de Ingeniero Civil.

Profesor Guía: Guillermo Daniel Brante Lara.
Noviembre, 2020

Agradecimientos

Mis agradecimientos a todos aquellos que formaron parte de este trabajo de investigación. En primer lugar, a mis padres y familia, por estas siempre brindándome su apoyo y cariño. En segundo lugar, al profesor Guillermo Brante Lara, quien fue apoyo fundamental en todo el proceso de este trabajo, entregando su gran experiencia, dedicación y confianza como profesor guía.

Agradezco también a los miembros del Laboratorio Regional de Vialidad de Valparaíso, quienes estuvieron conmigo a lo largo de toda esta investigación. En especial quiero agradecer a Don Daniel por el tiempo, dedicación y amabilidad que siempre entregó, también a Don Carlos Pérez por los consejos sobre mi investigación, y a don Pepe por todo el respeto y confianza que siempre mostraba.

Agradecer también a la empresa Ágora y a todos los profesionales donde realicé mi práctica profesional, por brindar su conocimiento y experiencia. Agradecer a los miembros de la oficina del Proyecto Viña III por el apoyo incondicional y por incentivar me siempre a ser mejor persona. También agradecer a la empresa Aires del Sur, principalmente a don Cesar Rebolledo quien fue la persona que con toda amabilidad facilitó los recursos relacionados con los sellos de alta fricción.

Quiero agradecer también a las personas que sin conocerme me ayudaron en esta investigación. A mis amigos y compañeros de universidad con los que sufrí momentos difíciles y estresantes, pero con su compañía esos malos momentos se convertían en risas y diversión. Siempre recordaré esas tardes de estudio, las pichangas con los profesores, las juntas planificadas, los chistes del V.T, la seriedad del B.A y la solidaridad de todos los profesores y compañeros de la Universidad.

El paso por esta Universidad ha sido una etapa de gran crecimiento personal, emocional y profesional, donde conocí durante el trayecto a grandes personas. A Todos ellos agradecer enormemente.

Índice General

1. Capítulo I.....	2
1.1. Introducción.....	2
2. Capítulo II.....	4
2.1. Objetivo General.....	4
2.2. Objetivos Específicos.....	4
2.3. Alcances.....	5
2.4. Metodología.....	5
3. Capítulo III.....	7
3.1. Empresa CODELCO.....	7
3.1.1. División Ventanas.....	7
3.2. Escoria de Cobre.....	9
3.2.1. Producción del Cobre y de la Escoria.....	9
3.2.2. Composición de la Escoria de Cobre.....	10
3.2.3. Clasificación de las Escorias de Cobre.....	12
3.2.4. Usos Actuales de la Escoria de Cobre.....	13
3.3. Evaluación Ambiental de las Escorias de Cobre.....	15
3.3.1. Tipo de Análisis.....	16
3.3.2. Normativas Chilenas de Regulación de Residuos Tóxicos.....	18
3.3.3. Resultados Internacionales del TCLP en Escorias de Cobre.....	19
3.3.4. Comparaciones y Comentarios de la Evaluación Ambiental.....	22
4. Capítulo IV.....	24
4.1. Áridos del Aconcagua.....	24
4.1.1. Ubicación.....	24
4.1.2. Obtención del Árido.....	24
4.1.3. Tipos de Áridos.....	26
4.1.4. Características y Propiedades de un Árido con Granulometría entre 1,3- 3,5 [mm].....	28
5. Capítulo V.....	29
5.1. Sellos de Alta Fricción.....	29
5.1.1. Historia.....	29
5.1.2. Definición de los Sellos de Alta Fricción.....	29
5.1.3. Componentes de un Sello de Alta Fricción.....	30
5.2. Propiedades Mecánicas y Químicas de los SSAF.....	37
5.2.1. Fricción y Resistencia al Deslizamiento.....	37
5.2.2. Adherencia (Neumático- Pavimento).....	40

5.3.	Desempeño de los SSAF Utilizando Bauxita Calcinada.....	46
5.4.	Usos Nacionales e Internacionales de los SSAF.....	50
5.4.1.	Usos Históricos.....	50
5.4.2.	Usos Modernos.....	50
5.4.3.	Usos en Chile.....	51
6.	Capítulo VI.....	53
6.1.	Caracterización de la Bauxita Calcinada, Árido del Aconcagua y Escoria de Cobre como Agregados Pétreos para SSAF.....	53
6.1.1.	Granulometría y Bandas de trabajo.....	53
6.1.2.	Densidad Real, Neta y Absorción de Agua.....	55
6.1.3.	Densidad Aparente.....	59
6.1.4.	Índice de Lajas.....	60
6.1.5.	Desgaste.....	61
6.1.6.	Resumen General de los Ensayos.....	66
7.	Capítulo VII.....	67
7.1.	Evaluación de los Sellos de Alta Fricción Usando Escoria de Cobre.....	67
7.1.1.	Campo de Aplicación.....	69
7.2.	Emulsiones Asfálticas.....	69
7.2.1.	Emulsión Asfáltica Catiónica de Quiebre Rápido Tradicional (CRS-2).....	69
7.2.2.	Emulsión Asfáltica Catiónica de Quiebre Rápido Elastomérica (CRS-2E).....	70
7.3.	Dosificación del Árido y Ligante Asfáltico para Tratamientos Superficiales.....	71
7.4.	Dosificación entre Resina de Poliuretano y Agregado Pétreo.....	74
7.5.	Ensayes Evaluativos.....	75
7.5.1.	Ensayo Rueda Cargada.....	75
7.5.2.	Ensayo Abrasión Medio Húmedo.....	81
7.6.	Evaluación de la Micro y Macro Textura de la Escoria de Cobre y los otros Agregados.....	89
7.6.1.	Determinación de la Resistencia al Deslizamiento Utilizando el Péndulo Británico.....	89
7.6.2.	Determinación de la Macro Textura Utilizando el Círculo de Arena.....	96
7.6.3.	Cálculo del Índice de Fricción Internacional (IFI).....	100
8.	CAPITULO VIII.....	104
	Conclusiones y Comentarios.....	104
	Referencias.....	107
	Anexos.....	111
	Anexo Capítulo V.....	111
	A.5. Experimento 1 Realizado por [4].....	111
	B.5 Experimento 2.....	112
	C.5 Experimento 3.....	113

Anexos Capítulo VI.	114
A.6- Granulometría	114
B.6- Densidad Real, Neta y Absorción de agua.	115
C.6- Densidad Aparente Suelta.	119
D.6- Índice de Lajas.	120
E.6- Desgaste.	121
Anexo Capítulo VII.	125
A.7. Dosificación Componentes de la Resina de Poliuretano.	125
B.7. Resultados Numéricos del Ensayo de Rueda Cargada.	125
C.7. Resultados Numéricos del Ensayo de Abrasión en Medio Húmedo y Seco.	126
D.7. Corrección del Valor BPN por Temperatura del Agua según Volumen 8 del Manual de Carreteras.	129
E.7. Micro Textura Medida con el Péndulo Británico.	130
F.7. Macro Textura Medida con el Método del Círculo de Arena.	133
G.7 Cálculos de Curvas IFI.	135

Lista de Figuras

Figura 3.1- Vista General de Codelco División Ventanas.	8
Figura 3.2- A) Fayalita, B) Magnetita.	11
Figura 3.3- A) Escoria de Cobre Granallada, B) Escoria de Cobre de Botadero y C) Escoria de Cobre Expandida.	12
Figura 3.4- Instrumento Utilizado para Realizar Análisis de Fluorescencia de Rayos X.	17
Figura 3.5- Instrumento Utilizado para Realizar Test de Toxicidad por Lixiviación.	17
Figura 3.6- Ubicación del Humedal Campiche en las cercanías del Botadero de Escoria de Cobre.	23
Figura 4.1- Proyección del Río Aconcagua.	24
Figura 4.2- A) Acopio y carga de los áridos del Aconcagua B) Proceso de chancado y Tamizado.	25
Figura 4.3- Ubicación de seis empresas dedicadas a la extracción de áridos.	26
Figura 4.4- Agregado Pétreo del Aconcagua, con tamaño de partículas entre 1,3 -4 [mm].	28
Figura 5.1- a) Bauxita de Guyana, b) Bauxita del Estado de Arkansas, c) Bauxita del Estado de Georgia,	31
Figura 5.2- Forma de la Bauxita Calcinada Chancada.	32
Figura 5.3- Compuestos: A (Isocianatos) y B (Polioles).	34
Figura 5.4- Diagrama de Fuerzas ejercidas por un Vehículo durante las Curvas.	39
Figura 5.5- Fuerzas de Adhesión e Histéresis producidas entre la Rueda y la Superficie. Fuente [39]	41
Figura 5.6- Mecanismos de Pérdida de Adherencia a: 1) Velocidades Bajas, 2) Velocidades Moderadas y 3) Altas Velocidades. Fuente [40].	41
Figura 5.7- Zonas de contacto entre la Rueda y el Pavimento bajo efectos de la Velocidad. Fuente [38].	42
Figura 5.8- Micro textura y Macro textura de los Áridos Aplicados en Pavimentos. Fuente "MC-Volumen 6"	43
Figura 5.9- Resistencia al Deslizamiento vs Velocidad de Circulación de distintas Combinaciones de Textura. Fuente [37].	44
Figura 5.10- Combinaciones de Micro Textura y Macro Textura de una Superficie [41].	44
Figura 5.11- a) Ejemplo de una Superficie Pulida de Asfalto, b) Ejemplo de una Superficie Pulida de Hormigón. Fuente [43].	45
Figura 5.12- Resistencia al Deslizamiento vs Pasos de Rueda del Experimento 1.	47
Figura 5.13- Profundidad de Textura vs Pasos de Rueda del Experimento 1.	47
Figura 5.14- Resistencia al Deslizamiento vs Pasos de Rueda del Experimento 2.	48
Figura 5.15- Profundidad de Textura vs Pasos de Rueda del Experimento 2.	48
Figura 5.16- Resistencia al Deslizamiento vs Pasos de Rueda del Experimento 3.	49
Figura 5.17- Profundidad de Textura vs Pasos de Rueda del Experimento 3.	49
Figura 5.18- Distancias de Frenado y Velocidad de Impacto de un Automóvil con ABS a 90 Km/hr. Fuente ColorVial.	51
Figura 5.19- A) Camino "La Pólvora", Valparaíso. B) Avenida Borgoño, Viña del Mar. C) Cruces Peatonales, Quilpué. D) Plaza de Peajes, Ruta 68.	52
Figura 6.1- Banda Granulométrica completa de la Bauxita Calcinada obtenida en Laboratorio.	54
Figura 6.2- Densidades Reales y Netas de los Agregados Pétreos "Gruesos".	56
Figura 6.3- Densidades Reales y Netas del Agregado Pétreo "Fino".	58
Figura 6.4- Porcentajes de Desgaste de los Agregados sometidos a la Máquina de los Ángeles.	62
Figura 6.5- A) Compactación de Capas Usando Varilla (25 golpes), B) Equipo de Impacto (15 golpes).	65
Figura 7.1- Esquema de Ensayos para los Agregados Pétreos y SSAF.	68

Figura 7.2- A) Proporción en Gramos de los Componentes A-B de las Resinas de Poliuretanos; B) Cantidad de Colorante Suministrada; C) Mezcla Final de la Resina de Poliuretano.	74
Figura 7.3- Máquina de Ensayo Rueda Cargada.....	75
Figura 7.4- Imprimación de Probetas Rueda Cargada.	76
Figura 7.5- Aplicación de los Ligantes sobre Probetas de Maderas Imprimadas.....	77
Figura 7.6- Aplicación del Agregado sobre los Ligantes.....	77
Figura 7.7- A) Curado de Probetas con Resina de Poliuretano; B) Curado de Probetas con Emulsiones CRS-2 y CRS-2E.....	77
Figura 7.8- Gráfico de Resultados del Ensayo de Rueda Cargada.	79
Figura 7.9- Problema producido por Exudación de las Emulsiones Asfálticas de Quiebre Rápido.	80
Figura 7.10- Resultado Final de las Probetas posterior al Ensayo de Rueda Cargada.	80
Figura 7.11- Máquina de Abrasión en Medio Húmedo.	81
Figura 7.12- Imprimación de Probetas Circulares para Ensayo de Abrasión.	82
Figura 7.13- Aplicación de las Dosis de Ligantes sobre Probetas Circulares destinadas a la Abrasión.	83
Figura 7.14- Aplicación de Agregados sobre Probetas destinadas a la Abrasión.....	83
Figura 7.15- Curado de Probetas destinadas al Ensayo de Abrasión.	83
Figura 7.16- Gráficos de los Resultados más relevantes del Ensayo de Abrasión en Condiciones Secas Usando los diferentes Ligantes.....	85
Figura 7.17- Probetas Confeccionadas con Escoria de Cobre y con los tres Ligantes, Sometidas al Ensayo en Condiciones Secas.	85
Figura 7.18- Gráfico de Resultados del Ensayo de Abrasión en Condiciones Húmedas.....	86
Figura 7.19- Condiciones de las Probetas posterior al Ensayo de Abrasión en Condiciones Húmedas.	87
Figura 7.20- Fenómeno de Contracción de las Emulsiones denominado "Stripping".	87
Figura 7.21- Comparación de Resultados del Ensayo de Abrasión en Condiciones Húmedas y Secas para los tres Ligantes en conjunto con los tres Agregados Utilizados.	88
Figura 7.22- Instrumento: "Péndulo Británico".	89
Figura 7.23- A) Probetas para Ensayo de Rueda Cargada y B) Abrasión en Medio Húmedo.....	91
Figura 7.24- Mediciones de Resistencia al Deslizamiento en Probetas Ensayadas en la Rueda de Carga.....	92
Figura 7.25- Falla Presentada en algunas Probetas, debido a la falta de Adherencia y Ahuellamiento.	93
Figura 7.26- Resistencia al Deslizamiento en Probetas Sometidas a Abrasión en Medio Húmedo.	94
Figura 7.27- Resistencia al Deslizamiento en Probetas Sometidas a Abrasión en Medio Seco.....	95
Figura 7.28- Desgaste excesivo de Gomas Utilizadas en la Máquina de Abrasión.	95
Figura 7.29- Instrumento para Medir la Macro Textura (Circulo de Arena).	96
Figura 7.30- Profundidad de Textura (Macro Textura) de Probetas Sometidas a Abrasión en Medio Húmedo.	98
Figura 7.31- Profundidad de Textura (Macro Textura) de Probetas Sometidas a Abrasión en Medio Seco.	99
Figura 7.32- Curvas IFI de Probetas de Abrasión en Condiciones Húmedas.	102
Figura 7.33- Curvas IFI Probetas de Abrasión en Condiciones Secas.....	102

Lista de Tablas

Tabla 3.1- Fórmula Química y Concentración de los Óxidos Presentes en la Escoria de Cobre. Fuente [13].	10
Tabla 3.2- Características Físicas de la Escoria de Cobre. Fuente [13].	10
Tabla 3.3- Concentraciones de los Elementos y Óxidos Presentes en la EC de Ventanas. Fuente [14].	11
Tabla 3.4- Adaptación Tabla de Concentraciones de Sustancias Peligrosas (Metales Pesados). Fuente [19].	18
Tabla 3.5- Concentraciones de MP en Muestras de Escoria de Cobre gastadas posterior al TCPL. Fuente [22].	20
Tabla 3.6- Concentraciones de MP en Muestras Obtenidas de Escorias de Cobre, Sedimentos Superficiales y superficie del suelo cercanos al Botadero. Fuente [23].	21
Tabla 4.1- Tipos de Áridos Producidos cerca del Río Aconcagua. Fuente Áridos BOCO.	27
Tabla 4.2- Propiedades del Árido del Aconcagua Proveniente de Asfalcom con Granulometría entre 1,3- 3,5 mm Determinadas en Laboratorio.	28
Tabla 5.1- Características de la Bauxita. Fuente [30].	31
Tabla 5.2- Características y composición Química de las Bauxitas Calcinadas de Guyana y China.	32
Tabla 5.3- Precios comerciales de las BC, A. Aconcagua y Esc. de Cobre Ventanas.	33
Tabla 5.4- Propiedades de las Resinas de Poliuretano Usadas en Chile y España. Fuente "Color Vial Chile SL".	35
Tabla 5.5- Características de un Tratamiento Pigmentado en SSAF. Fuente "Color Vial Chile SL".	36
Tabla 5.6- Características de los Componentes LeesonGrip.	36
Tabla 5.7- Especificaciones Técnicas de las Resinas Certificadas de LeesonGrip y Geveko Markings.	37
Tabla 5.8- Características de las BC provenientes de China y Guyana. Adaptación Fuente [4].	46
Tabla 6.1- Granulometría de la Bauxita Calcinada.	53
Tabla 6.2- Densidades Reales, Netas y Absorción de los Agregados Pétreos Integrales.	58
Tabla 6.3- Cantidades de agregados utilizadas en el ensayo.	59
Tabla 6.4- Resultados promedios de la Densidad Aparente Suelta de los tres Agregados.	59
Tabla 6.5- Valores adaptados para la fracción en estudio.	60
Tabla 6.6- Resultados del Índice de Lajas para la fracción adaptada de los tres Agregados.	61
Tabla 6.7- Requerimientos según el grado de la muestra para el ensayo de Desgaste de los Ángeles. Fuente [5].	62
Tabla 6.8- Clasificación de los Agregados según el Desgaste obtenido en el Ensayo de los Ángeles.	63
Tabla 6.9- Índice de Trituración máximo exigido para diferentes usos. Fuente [1].	64
Tabla 6.10- Índice de Trituración de las muestras ensayadas.	65
Tabla 6.11- Resumen de los Ensayos de Caracterización de los Agregados.	66
Tabla 7.1- Características Técnicas de la Emulsión CRS-2. Fuente [43].	70
Tabla 7.2- Características Técnicas de la Emulsión CRS-2 Elastomerica. Fuente [44].	71
Tabla 7.3- Factor de Desperdicio Utilizado para Dosificación de TSS.	72
Tabla 7.4- Factor de Tránsito Utilizado para Dosificación de TSS.	72
Tabla 7.5- Principales Valores de la Dosificación del Árido y del Ligante para SSAF.	73
Tabla 7.6- Pérdida de Agregado producto del Ensayo de Rueda Cargada.	79
Tabla 7.7- Dosis de Agregados y Ligantes para Confección de Probetas Circulares de Abrasión en Medio Húmedo.	84

Tabla 7.8- Porcentaje de Pérdida de Agregado para 1000 y 2000 pasadas de Rueda en la Máquina de Rueda Cargada.	92
Tabla 7.9- Resultados de Abrasión en probetas sometidas a abrasión en un medio húmedo y seco.	93
Tabla 7.10- Ejemplo de Límites para Micro y Macro Textura. Fuente [48].	103

Resumen

La escoria de cobre es denominada un desecho minero en las industrias y empresas dedicadas a la extracción de cobre en Chile, dicho material es el resultado final de los procesos pirometalúrgico, generándose aproximadamente 2,2 a 3 toneladas de escoria por cada tonelada de cobre, los cuales son depositados y acumulados durante años [1]. El escaso uso de este subproducto ha incentivado a diversos estudios su posible aplicación para el diseño de caminos, carreteras y otras obras viales con el objetivo de disminuir la sobre explotación de áridos naturales y de esta manera ayudar a cuidar y conservar el medio ambiente. Estas acciones han motivado a estudiar a la escoria de cobre, y de esta manera lograr incorporarla como agregado pétreo en sellos de alta fricción.

El estudio de la escoria de cobre como agregado pétreo consistió en emular la granulometría del material usado por excelencia en los sellos de alta fricción denominado "*bauxita calcinada*". Con la granulometría definida, se procedió a realizar ensayos de caracterización, determinando las densidades, índices de lajas, desgaste y absorción de los tres agregados pétreos evaluados (escoria de cobre, bauxita calcinada y gravilla del Aconcagua), de esta manera se logró observar si la escoria de cobre poseía características similares a la bauxita o sus parámetros se asemejaban más a la gravilla del río Aconcagua.

En los análisis realizados a la escoria de cobre junto a los otros dos agregados, se confeccionaron sellos de alta fricción usando tres tipos de ligantes, emulsiones asfálticas de quiebre rápido tradicional y elastomérica, y resinas de poliuretanos. De estos sellos se determinó el ligante con mejor desempeño ante ensayos de desgaste y abrasión.

Dentro de los parámetros más relevantes a medir en los sellos de alta fricción se encuentra la macro textura y micro textura. En los análisis realizados en los distintos sellos, principalmente en aquellos confeccionados con escoria de cobre, se logró apreciar un comportamiento semejante a lo impuesto por la bauxita calcinada en la mayoría de los ensayos empleados, entregando resultados para la resistencia al deslizamiento y profundidad de textura aceptables.

En base a los resultados, se recomienda utilizar la escoria de cobre para este tipo de solución, puesto que es un material con grandes facultades, además el uso de este ayudaría en gran medida a disminuir la explotación de recursos naturales tales como los áridos y piedra bauxita cuya obtención y tratamiento de calcinación eleva considerablemente su valor comercial. Además, se reduciría las grandes cantidades de escoria de los botaderos al considerarlo como subproducto, mitigando de alguna manera el impacto ambiental que genera su almacenamiento.

Palabras Claves: escoria de cobre, bauxita calcinada, micro textura, macro textura, resistencia al deslizamiento, abrasión.

1. Capítulo I

1.1. Introducción.

La Comisión Nacional de Seguridad de Tránsito, denominada CONASET es un centro de datos donde se encuentra información estadística descriptiva de la red vial del país. En esta se encuentran aquellos registros relacionados con los accidentes de tránsito ocurridos en los diferentes años dentro de las distintas regiones. La información proporcionada abarca todo tipo de clasificación, desde las causas de los siniestros hasta el mes y día donde ocurrieron. Algunas de las causas importantes están los accidentes por volcamiento, colisión y choques entre otros. Registrándose en el año 2019 una cantidad de 88.983 siniestros a nivel nacional, dentro de estos el 88% fueron causados por choques, colisiones y volcamientos. Al poner énfasis en las cifras registradas en la región de Valparaíso, estas muestran un porcentaje del 11% con respecto al total de siniestros a nivel país, en donde la cantidad de lesionados acapara el 11% y la cifra de fallecidos el 9% [2].

Estos accidentes son causados por diferentes factores, dentro de los cuales se encuentran, la morfología de los sectores, el clima de cada región, el nivel de tránsito y la falta de concentración al volante de los conductores. La mayoría de estos, perjudican en cierta manera la calidad, desempeño y vida útil de los pavimentos, puesto que en climas lluviosos la adherencia entre la calzada y el vehículo disminuyen, aumentando el riesgo de accidente, al igual que el nivel de tránsito y la morfología de los caminos, estos dos factores alternan las características friccionales de los pavimentos, desgastándolo, y provocando accidentes, más aún si la morfología de la ruta es una curva [2].

Con el objetivo de mejorar la calidad de la red vial en Chile, aumentando la seguridad, conformidad de los conductores, y disminuyendo la tasa de accidentes, el Ministerio de Obras Públicas (MOP) ha implementado en estos últimos años la aplicación de los sellos de alta fricción, dedicando un acápite en el Manual de Carretera Volumen 5. Estos sellos provenientes de Europa (Reino Unido) han sido creados con el propósito de otorgar a los pavimentos cualidades friccionales que permitan un aumento en la adherencia entre los neumáticos y la calzada bajo condiciones adversas. Esta tecnología se compone de dos materiales, la bauxita calcinada y la resina de poliuretano, ambas proporcionan un producto duradero y eficiente.

En esta memoria de título se verificará el correcto funcionamiento de la escoria de cobre, residuo ambiental no peligroso que se obtiene del proceso final de la fundición de concentrado de cobre. Este residuo se evaluará como agregado pétreo con el objetivo de comprobar su uso en los sellos de alta fricción y saber si representa una alternativa sustentable en el mejoramiento de caminos para la Región de Valparaíso.

Debido a que la escoria de cobre se encuentra en el acopio de Ventanas, se espera que en caso de resultar factible el uso de este material, su utilización sea destinada al mejoramiento principalmente de las comunas de la Región de Valparaíso. Además, se entregarán información con respecto al impacto ambiental que posiblemente tenga el acopio de este material. Por lo que, se mostraran algunos estudios realizados a nivel internacional, los cuales indican las concentraciones de metales pesados que conforman a la escoria de cobre y cuáles son sus efectos al entorno, también se hablará del compromiso que tiene Codelco con la protección del medio ambiente en Ventanas según su reporte de sustentabilidad.

Para estudiar este residuo se trabajará principalmente en base a los requisitos definidos por el Volumen 5 del Manual de Carreteras para SSAF [3] y el Volumen 8 para todos los ensayos de esta memoria [4], verificando cada uno estos y comparando los valores más relevantes. Para realizar esta comparación se utilizará el agregado usado por defecto, denominado "*bauxita calcinada*", y además un árido proveniente del río Aconcagua. Sumado a esto, se verificará de manera visual y mediante simulaciones de tránsito a escala de laboratorio el correcto funcionamiento de las muestras, utilizando para estos tres tipos de ligante; a) Resina de poliuretano, b) Emulsión CRS2 de quiebre rápido, c) Emulsión CRS 2 elastómera de quiebre rápido. El aditivo que logre el mejor desempeño de estas simulaciones será utilizado para confeccionar las muestras definitivas, de las cuales se medirá la resistencia al deslizamiento (micro textura) y profundidad de textura (macro textura), empleando los métodos del péndulo británico y círculo de arena respectivamente. Finalmente se clasificarán estos sellos creados con los diferentes agregados mediante las curvas del índice de fricción internacional (IFI).

2. Capítulo II

2.1. Objetivo General.

Investigar el uso de la escoria de cobre proveniente de los procesos de CODELCO Ventanas como agregado pétreo en la composición del sello de alta fricción para pavimentos rígidos y flexibles, por medio de estudios de laboratorio comparativos entre el sello de alta fricción tradicional que utiliza bauxita y el sello de alta fricción modificado incorporando la escoria de cobre. Se realizarán análisis físicos y químicos para ambos casos y además ensayos de laboratorio que permitan indicar si dicho subproducto es recomendable como alternativa en los sellos de alta fricción, con la intención de entregar un producto menos invasivo para el entorno, a un menor costo y seguro para las personas.

2.2. Objetivos Específicos.

- Analizar las componentes de la escoria de cobre como agregado pétreo para el sello de alta fricción según los requisitos que dispone el Manual de Carretera Volumen 5 [3].
- Realizar ensayos de desgaste y desempeño para el agregado pétreo, con el fin de cumplir con algunas normativas británicas BBA/HAPAS [5].
- Evaluar y analizar el comportamiento del sello de alta fricción utilizando el agregado de escoria de cobre, compararlo con un sello de alta fricción compuesto por bauxita y otro con árido del Aconcagua [6]- [7].
- Realizar los ensayos de laboratorio pertinentes a lo estipulado en el Manual de Carretera Volumen 8 [4] para caracterizar a los agregados y analizar el desempeño ante ensayos de desgaste y abrasión.
- Se mostrarán alternativas para el caso que este material no cumpla con los requerimientos, y se especificará la aplicación más adecuada para éste y bajo cuales condiciones es factible utilizarlo en Chile.

2.3. Alcances.

- Los áridos de escoria de cobre utilizados se obtendrán de centros de acopio de CODELCO División Ventanas.
- Los ligantes a utilizar corresponderán a emulsiones catiónica CRS-2 y CRS2 elastomérica de quiebre rápido, mientras que el árido del río Aconcagua será de la planta Asfalcom de Con- Con.
- Los materiales correspondientes a bauxita calcinada y resina de poliuretano de 2 componentes serán aquellas facilitadas por la empresa “*Aires del Sur*”, entidad que trabaja con este tipo de sellos.
- Debido a que los equipos utilizados para someter las muestras se encuentran solo en Universidades o instituciones nacionales e internacionales específicas, se optará a modo de ejercicio académico utilizar instrumentos y equipos de ensayos conocidos para obtener resultados que permitan la comparación entre los agregados estudiados.

2.4. Metodología.

El Capítulo III se basará principalmente en la historia de Codelco Ventanas y los diferentes procesos que se llevan a cabo dentro de la empresa, de los cuales surge la Escoria de cobre. Se describirá la composición física y química de este residuo, la clasificación que posee según el tiempo de enfriamiento y los distintos usos nacionales e internacionales que se le otorga. Dentro de este capítulo también se realizará una breve descripción de los ensayos realizados para una evaluación ambiental.

En el Capítulo IV se describirán los procesos de extracción de los áridos provenientes del río Aconcagua, y algunas de las empresas de empréstito dedicadas a dicha labor. Además, se describirán algunas características de los diferentes tipos de áridos y su uso en lo que respecta a la fabricación de hormigones y asfaltos. Finalizando con una breve descripción de las propiedades de un árido con granulometría específica.

La historia de los SSAF, la descripción de los componentes que los conforman y los parámetros más relevantes se mencionarán en el Capítulo V del presente informe. Adicionalmente, se mostrarán las propiedades físicas y químicas que otorgan los SSAF a un pavimento, enfocándose en la resistencia al deslizamiento, adherencia y fricción. En esta sección también se podrá apreciar los resultados de algunos estudios de desempeño, en donde el agregado utilizado es Bauxita calcinada de Guyana y de China.

Para realizar la caracterización de los agregados que se utilizarán, se presentarán los diferentes ensayos descritos en el Manual de Carretera Volumen 8, donde los principales parámetros a evaluar son: a) densidades, b) índice de laja, c) desgaste de los agregados, d) adherencia y e) desempeño. Todos estos ensayos y sus procedimientos tendrán lugar en el Capítulo VI.

En el Capítulo VII se tendrá como objetivo la evaluación de la escoria de cobre como material pétreo. En primera instancia se realizará la comparación de probetas confeccionadas con tres ligantes diferentes y serán sometidas a la máquina de abrasión en medio húmedo y rueda cargada. De la combinación de estas tres sustancias se evaluará la de mejor desempeño, para finalmente confeccionar probetas únicas con dicho ligante y lograr medir la macro y micro textura utilizando el péndulo británico y el círculo de arena tal como se indica en el Manual de Carretera Volumen 8 para sellos de alta fricción.

Finalmente, en el Capítulo VIII se concluirán los resultados obtenidos de estos ensayos y se mencionarán algunos comentarios sobre el uso de estos materiales en la construcción de vías más seguras.

3. Capítulo III

3.1. Empresa CODELCO.

Codelco es una empresa del Estado de Chile. Lidera la producción mundial de cobre e impulsa el desarrollo del país. Sus reservas representan un 6% de las reservas globales de cobre.

El principal negocio es explorar, desarrollar y explotar recursos mineros, luego procesarlos para producir cobre refinado y subproductos, y así comercializarlos a clientes en todo el mundo.

Este trabajo se realiza a través de siete divisiones mineras: Chuquicamata, Ministro Hales, Radomiro Tomic, Gabriela Mistral, Salvador, Andina, El Teniente, además de la Fundición y Refinería **Ventanas**. La Casa Matriz se ubica en Santiago, desde donde se coordina la estrategia corporativa, desarrollada por un directorio formado por nueve integrantes y el presidente ejecutivo de la empresa.

Las ventas totales en 2019 alcanzaron los US\$ 12.525 millones, con el mercado asiático como principal destino, seguido por los mercados norteamericano, europeo y sudamericano.

Desde los orígenes en 1971 hasta 2019 se han generado excedentes por US\$116 mil millones para el Estado de Chile. Codelco posee activos por US\$40.345 millones y un patrimonio de US\$11.635 millones a diciembre de 2019 [8].

3.1.1. División Ventanas.

La División Ventanas es una fundición y refinería ubicada en la Región de Valparaíso, en la comuna de Puchuncaví, en donde se procesan los concentrados de cobre con el fin de producir principalmente ánodos y cátodos.

Su construcción comenzó a fines del 1959, para ser posteriormente inaugurada en 1964 por la Empresa Nacional de Minería (ENAMI), hasta que el año 2005 pasó a formar parte de la Corporación Nacional del Cobre (CODELCO). Se escogió este lugar para instalar esta División principalmente por la disponibilidad de agua existente, y por la cercanía con los puertos de Valparaíso y Quintero, lo que permitiría hacer más eficiente el embarque de los productos. La División Ventanas está encargada de tratar los concentrados provenientes de las Divisiones Andina, Teniente y una gran cantidad de pequeñas y medianas mineras agrupadas en ENAMI y existentes entre la IV y VI región, como parte del trato del traspaso de la división [9].

Como las instalaciones de esta división se encuentran en el borde costero, la zona de Ventanas posee un área importante en cuanto a biodiversidad. El principal impacto producido en esta zona corresponde al depósito de escoria de cobre, desecho proveniente de la actividad de fundición y que en el año 2018 llegó a una cifra de 243 mil toneladas [1].

La Figura 3.1 muestra una vista general de las instalaciones de Codelco División Ventanas. Ésta en los últimos años ha realizado diversas inversiones ambientales, con el propósito de disminuir sus emisiones al ambiente y hacer más sustentable sus operaciones.

Entre la carpeta de proyectos ya finalizados, se cuentan la edificación de un moderno centro de concentrado, la construcción de cerca de un kilómetro de cierres perimetrales, el aumento de captación de material particulado a través de un tercer campo de precipitador electrostático y un nuevo filtro de mangas del secador de concentrado, la alimentación de carga fría, entre otros [10].

Desde diciembre de 2016, Ventanas ha cumplido plenamente la normativa de emisiones del Decreto Supremo 28 del Ministerio de Medio Ambiente.

Durante 2019 la gestión se centró en modificar las prácticas operacionales para cumplir con el Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica para las comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví, emitido por la autoridad ambiental en diciembre de 2018.

Este centro de trabajo ha sido fuertemente fiscalizado y ha cumplido estrictamente tanto la norma de fundiciones que la rige, como el plan operacional aprobado por la autoridad, demostrando su estricto apego a todas las regulaciones [10].



Figura 3.1- Vista General de Codelco División Ventanas.

3.2. Escoria de Cobre.

La escoria de cobre (EC), es un residuo industrial perteneciente al grupo de las escorias no ferrosas y es generada durante el proceso de producción de ánodos de cobre. Las fundiciones primarias modernas generan entre 2,2 y 3 toneladas de escoria de cobre por cada tonelada de cobre producida [11].

Chile al ser un país de tradición minera, es uno de los principales productores de cobre, esto implica que anualmente genera una gran cantidad de escoria de cobre en sus fundiciones. Estas fundiciones generan escoria de cobre, las cuales han permanecido en los vertederos como depósitos abandonados desde entonces, causando efectos negativos en el paisaje (suelo y agua), y problemas económicos.

3.2.1. Producción del Cobre y de la Escoria.

La primera etapa del proceso de producción del cobre se inicia con la Exploración Geológica. En esta fase se pueden verificar los tipos de rocas presentes en el subsuelo y saber a ciencia cierta si existen minerales o no. El cobre se encuentra diseminado en ciertos sectores de la corteza terrestre y su ubicación está determinada por los distintos procesos geológicos que han ocurrido en la historia del planeta.

La segunda etapa es la extracción, este es el procedimiento mediante el cual se extrae el cobre de la Tierra. El objetivo principal es, por tanto, sacar el mineral del macizo rocoso para llevarlo de forma segura a la planta donde será separado de otros minerales y de esta manera obtener el cobre más puro. El mismo que después se vende en el mercado internacional.

En las etapas siguientes, el material extraído es sometido a un proceso de disminución de tamaño, conocido como chancado, para luego ser triturado al máximo, llegando a tener una granulometría de aproximadamente 0,18 milímetros.

Posteriormente, se separa el cobre sulfurado de otras sustancias para poder llegar a su máxima pureza. Esta vez, el material obtenido de la trituración es sumergido en enormes piscinas (llamadas celdas de flotación) en las que, gracias a la acción de reactivos, el cobre emerge a la superficie dentro de burbujas.

Después el cobre emergente es analizado con el objetivo de determinar la cantidad de cobre, hierro, azufre y sílice, además del porcentaje de humedad que presenta el material. Con la información recopilada, se procede a realizar el proceso de Fusión en hornos expuestos a 1200°C. Cuando el concentrado pasa a estado líquido, los elementos que lo componen se separan naturalmente según su peso. De esta forma, los minerales más livianos se quedan en la parte superior del fundido, mientras que el cobre, que es más pesado, se va al fondo. En esta fase, el material proveniente de la fusión es procesado mediante combinaciones químicas para separar aún más el cobre de la denominada "escoria" (residuos del proceso) y eliminar el oxígeno restante.

Finalmente, la última etapa del proceso productivo del cobre sulfurado es la electrorrefinación. En esta fase los ánodos, también conocidos como cobre blíster, obtenidos en la Fundición se transforman en cátodos de cobre de 99,99% de concentración, listos para ser comercializados en el mercado mundial [12].

3.2.2. Composición de la Escoria de Cobre.

La escoria de cobre se obtiene como material de desecho a partir del proceso pirometalúrgico. Durante la fundición del mineral concentrado de cobre se producen dos fases líquidas inmiscibles entre sí, las que se pueden clasificar como: a) mata rica en cobre (sulfuro) y b) la escoria (óxido). La mata pasa a procesos posteriores de conversión, mientras que la escoria fundida se descarga directamente o pasa a procesos de recuperación de cobre, logrando que tengan un porcentaje menor al 1% de cobre antes de ser descartadas [13], algunos de los óxidos más comunes que contiene la escoria en estos procesos se pueden apreciar en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1- Fórmula Química y Concentración de los Óxidos Presentes en la Escoria de Cobre. Fuente [13].

Tipo de Óxido	Fórmula Química	Concentración (%)
Óxidos de Hierro	FeO, Fe ₃ O ₄	30-40
Óxidos de Silicio	SiO ₂	35-40
Óxidos de aluminio	Al ₂ O ₃	Hasta 10
Óxido de Calcio	CaO	Hasta 10

La composición física y química de la escoria de cobre depende de la materia prima usada y de la tecnología empleada. Están constituidos tanto por fases vítreas como cristalinas. Las escorias se producen a partir de los 1600°C, al ser líquidas su estructura amorfa-cristalina dependerá de la forma de enfriamiento que esta tenga después de los procesos pirometalúrgicos.

- a) **Composición Física:** La escoria de cobre puede tener diferentes formaciones, las que van en directa relación a las propiedades físicas. Algunas de las características físicas que destacan a la escoria de cobre se muestran en la Tabla 3.2:

Tabla 3.2- Características Físicas de la Escoria de Cobre. Fuente [13].

Características	Descripción
Apariencia	<ul style="list-style-type: none"> • Color negro. • Textura lisa (provenientes del botadero) • Textura Porosa (Granalladas)
Forma de las Partículas	Irregulares con bordes agudos
Densidad	3160- 3870 [kg/m ³]
Absorción	0,15- 0,55 [%]
Dureza	4- 6 [Mohs]
Granulometría	Varía según su formación, desde 4"- 0,08 mm

- b) **Composición Cristaloquímica:** Las escorias de cobre, contienen un gran contenido de óxidos, también se caracteriza por contener altos contenidos de hierro, donde las principales especies componentes son la fayalita y magnetita, estos se aprecian en la Figura 3.2, además, podemos encontrar óxidos de calcio aluminio (CaAl₂O₄), silicato de cinc (Zn₂SiO₄), y óxidos de cobre hierro (CuFe₂O₄).

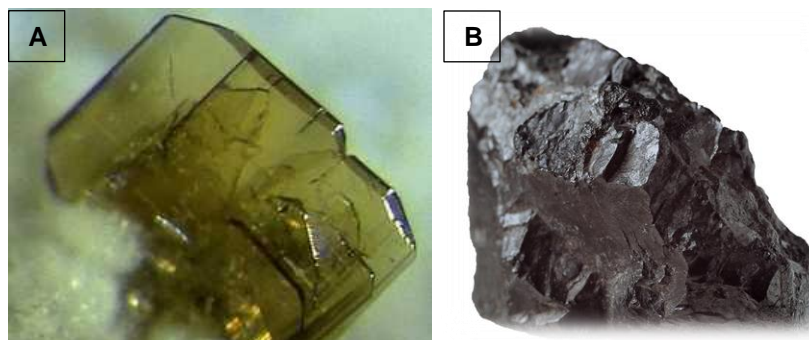


Figura 3.2- A) Fayalita, B) Magnetita.

Mediante fluorescencia de rayos X (FDX), es posible precisar los principales componentes de un material. Utilizando esta técnica se logran obtener las concentraciones de los elementos y óxidos presentes en una muestra de escoria de cobre de la Fundición Ventanas [14], tal como se muestra en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3- Concentraciones de los Elementos y Óxidos Presentes en la EC de Ventanas. Fuente [14].

Elementos	Concentración [%]	Óxidos	Concentración [%]
Fe	48,16	Fe ₂ O ₃	68,85
O	34,76	-.-	-.-
Si	8,92	SiO ₂	19,08
Zn	1,82	ZnO	2,26
Ca	1,48	CaO	2,07
Al	1,37	Al ₂ O ₃	2,59
Cu	0,86	CuO	1,08
Mg	0,57	MgO	0,95
Na	0,55	Na ₂ O	0,75
K	0,46	K ₂ O	0,55
S	0,29	SO ₃	0,73
Ti	0,18	TiO ₂	0,31
Pb	0,1	PbO ₂	0,12
Co	0,09	CoO	0,12
Ba	0,07	BaO	0,07
Mn	0,07	MnO ₂	0,11
Mo	0,06	MoO ₃	0,09
Cr	0,03	Cr ₂ O ₃	0,05
Sb	0,03	Sb ₂ O ₅	0,04
Ni	0,02	NiO	0,03
P	0,02	P ₂ O ₅	0,06
Sn	0,01	SnO ₂	0,02
Zr	0,01	ZrO ₂	0,02
Sr	0,01	SrO	0,01

3.2.3. Clasificación de las Escorias de Cobre.

La escoria de cobre es clasificada según:

1. Grados de silicatos
2. Tiempo de enfriamiento.
 - Granallada
 - Escoria de Botadero
 - Expandida

- 1) Grados de Silicatos:** La formación de la escoria de cobre se inicia en la etapa de fundición, por la adición de SiO_2 y/o CaO como fundentes, se forma así escoria fallalítica ($2\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$). La composición de la escoria es en base a óxidos, donde se encuentran óxidos de hierro (Fe_3O_4), óxido de sílice (SiO_2), óxidos de aluminio (Al_2O_3), óxidos de calcio (CaO), entre otros.

La sílice en esa combinación tiene la condición ácida, al igual que la alúmina, con una proporción comparable a la sílice. Mientras los otros componentes tienen el carácter básico.

Las escorias fundidas reaccionan por contacto, esta acción es muy diferente dependiendo de si su carácter químico es ácido o básico. Para evaluar este carácter se usan los índices de Silicatación, en donde se calcula en base de la razón entre el contenido en oxígeno de la proporción sílice que forma la escoria, y el contenido en oxígeno de la proporción de todos los otros óxidos que la forman (incluso Al_2O_3) [14].

- 2) Tiempo de enfriamiento:** La escoria de cobre, se puede obtener en terrenos cercanos a las Fundiciones a temperatura ambiente. El tiempo que demore en llegar desde la temperatura en estado líquido a la etapa final de disposición, cumple un rol fundamental en la formación de fases cristalinas o vítreas de este material, afectando su poder de reactividad, aumentando cuando el tiempo de enfriamiento es corto. Según el tiempo de enfriamiento se pueden encontrar 3 tipos de escoria de cobre: a) La Granallada, b) La de Botadero y c) La escoria expandida [14]. La Figura 3.3 muestra estos tres estados de la escoria de cobre.



Figura 3.3- A) Escoria de Cobre Granallada, B) Escoria de Cobre de Botadero y C) Escoria de Cobre Expandida.

- a) **Escoria granallada:** Esta escoria, se obtiene al pasar de estado líquido a sólido en el menor tiempo posible. Existen varias técnicas para ello, entre ellas, la usada en Caletones que consiste en verter la escoria fundida, en un pozo de granulación o granallador, el que mantiene una cantidad de agua constante que se renueva de acuerdo con la granulación que se realice, en su interior se produce un enfriamiento brusco de la escoria, pasando de estado líquido a sólido, desde una temperatura aproximada de 1150 °C a menos de 100 °C respectivamente. Producida la granulación, es separada el agua de la escoria, siendo llevada posteriormente a canchas de acopio. La granalla es uno de los materiales mayormente utilizados como abrasivo, este se puede encontrar en forma de partículas redondas o angulares [14].
- b) **Escoria de botadero:** Se obtienen por un proceso de enfriamiento lento, directamente en el lugar de acopio definitivo o algún espacio especialmente acondicionado, desde donde es llevada a disposición final. La escoria es vertida en estado líquido, la cual se enfriará lentamente hasta alcanzar la temperatura ambiente. Este tratamiento, facilita la cristalización del material, reduciendo la porosidad y limitando la posibilidad de reacción en procesos posteriores. Se detecta un menor porcentaje de absorción de agua y es más densa que las granalladas [14].
- c) **Escoria expandida:** Se obtiene por un rápido enfriamiento, se expande por la aplicación de una cantidad controlada de agua, aire y vapor. La solidificación acelerada aumenta su naturaleza vesicular produciendo un material ligero, que luego es triturado y clasificado por fracciones, para darle un mayor valor tecnológico a las escorias [14].

3.2.4. Usos Actuales de la Escoria de Cobre.

La escoria de cobre en estos últimos años ha tenido un mayor protagonismo y diversos usos asociados a las prácticas ingenieriles, dadas las características que posee el material, su formación, la aplicabilidad y los bajos o nulos costos que este subproducto tiene actualmente. Años atrás la escoria de cobre era considerada un desecho, siendo almacenada en los sectores denominados “botaderos” de aquellas empresas generadoras de cobre, esta acumulación producía un impacto negativo al entorno y al medioambiente. En la actualidad a modo de reducir las cantidades almacenadas se han ido creando usos alternativos a nivel internacional y nacional [14]- [15].

A nivel nacional, algunos de los usos a los que se ha implementado la escoria son:

- Agregado pétreo para tratamientos superficiales [16].
- Reemplazo de la arena para ladrillos de hormigón [17].
- Áridos para pavimentos flexibles [18].

A nivel nacional e internacional los usos alternativos de la escoria de cobre son:

a. Balasto:

Es el relleno en las líneas férreas, usado para formar una cama en las mismas, lo que le permite ser más firme y sólida. También es usado como lastre en barcos, la escoria es depositada en el fondo del barco para hundirlo un poco más en el agua, y así evitar volcamientos [14].

b. Arena Abrasiva:

Se compone de material de silicato de hierro y óxidos metálicos, se forman al inactivarse los slags fundidos en agua fría. Este enfriamiento fractura la escoria en gruesas partículas otorgando formas angulares, es ideal para muchas aplicaciones abrasivas.

Los slags de Cobre se forman con un corte rápido, de alta calidad, es una opción económica para los astilleros y contratistas. Se ha demostrado ser lo mejor en abrasivos por la velocidad de corte y por el costo por metro cuadrado. Facilita remover la pintura, capas externas y corrosión de estructuras industriales. La escoria viene con forma cúbica, y por lo tanto con sus lados bastante afilados, generando un mejor poder abrasivo. Estos productos abrasivos a su vez generan una baja cantidad de polvo. Además, su uso no genera problemas a la salud para las personas [14].

c. Adocretos:

Existe un estudio del uso de escorias de cobre en la elaboración de prefabricados de hormigón, a partir del reciclaje de este residuo metalúrgico desde tres escoriales abandonados de la Región de Atacama. Con este propósito se estudió la factibilidad técnica-económica de un proyecto de construcción y puesta en marcha de una planta industrial productora de pavimentos de adocretos utilizando escorias de cobre en reemplazo de áridos normales [14].

d. Materiales de Construcción:

La reutilización de la escoria en materiales de construcción, especialmente como aditivo para cementos, reemplazando las puzolanas y el yeso, especialmente en el mejoramiento en la tecnología de la construcción de caminos y carreteras, son los principales focos en los que es posible la aplicabilidad de este material.

- **Cemento Portland:** En acuerdo con las características químicas y mineralógicas de la escoria de cobre, este residuo sólido industrial puede ser utilizado en el proceso de fabricación de clínker Portland como sustituto parcial de los minerales de sílice y hematita en la formación de mezclas crudas cuyos beneficios serían: disminución de los costos de producción de mezclas crudas y del consumo calorífico.

Se utilizó un método industrial de fabricación de cemento Portland, incorporando la escoria de cobre en la fabricación de clínker. Se consideró la escoria de cobre, como reemplazo del mineral de hierro utilizado habitualmente, producto de alto contenido de óxido de hierro, superior al 59%, presente como fayalita (Fe_2SiO_4) y magnetita (Fe_3O_4) [14].

- Reemplazo de áridos finos: Al utilizar la escoria de cobre como reemplazo de los áridos finos tradicionales, se obtuvo resultados esperanzadores en la fabricación de hormigones. Tanto los ensayos de compresión como las pruebas de flexo-tracción, registraron mejores valores al ser comparadas con las probetas testigo, registrándose valores mayores para un 40% de remplazo de las arenas por escorias de cobre. Producto que la escoria es más densa que los áridos tradicionales, la densidad de las probetas aumento un 6% para un 50% de reemplazo [15].
- Reemplazo de áridos Gruesos: En los ensayos presentados por [14], se utilizó la escoria de cobre para reemplazar el 100% de los áridos gruesos, en la fabricación de hormigón de alta resistencia, se incorporó el 6% y 10% de humo de sílice para lograr tal efecto. Al ser comparados con las muestras patrón confeccionadas con áridos tradicionales, las resistencias a la compresión registraron aumentos en general de un 10% a los 28 días.

En Codelco Ventanas, a raíz de los enormes volúmenes de pasivos medioambientales, que posee sobre todo en lo que respecta a los escoriales de cobre ha decidido como política de la empresa entregar estos pasivos ambientales, al estado de Chile, a través del Ministerio de Obras Públicas (MOP). La razón principal, de este acuerdo, es que la escoria de cobre ha dado muy buenos resultados, en estabilización de carreteras y en la compactación de suelos. Esto está avalado, por el laboratorio de la Dirección de Vialidad del MOP de la región de Valparaíso, donde se verificó que este pasivo ambiental, se puede ocupar, en la confección y diseño de la infraestructura vial, capas estructurales granulares y también como material pétreo de hormigones donde la mayor densidad del hormigón no signifique un impedimento o restricción. Por lo tanto, este pasivo, recibió la aprobación en la evaluación técnica a la que fue sometido, y que es exigible, para el código de carreteras y caminos, y que por lo tanto se puede utilizar, en proyectos viales.

3.3. Evaluación Ambiental de las Escorias de Cobre.

Una evaluación ambiental es el procedimiento para analizar los efectos previsibles sobre el medio ambiente de aquellos planes, programas y proyectos antes de su aprobación, desde la fase de diseño de un proyecto hasta el fin de este. El objetivo de una evaluación previa es la prevención y corrección de los posibles impactos negativos derivados de la implementación del plan, programa o proyecto que generen un cambio al entorno donde estos se sitúen.

Teniendo en cuenta la definición anterior, se logra aplicar a todo proceso o actividad de la construcción que causa grandes daños al medio ambiente, esto debido al consumo de grandes volúmenes de recursos naturales, energía y también por los grandes volúmenes de desechos que se generan. Entre los recursos más utilizados en la construcción y minería destacan los agregados pétreos y minerales (cobre, hierro, plata, etc.) los cuales, al ser extraídos de las riberas de los ríos y de minas respectivamente, generan cambios en el ecosistema que muchas veces resultan negativos para el mismo.

En el caso de Chile, el principal mineral extraído corresponde al cobre, el cual genera un impacto negativo no sólo en su proceso de fundición, sino que con los desechos que genera. Entre estos desechos se encuentran las escorias de cobre, residuo del cual estos últimos años se ha investigado en diferentes estudios, debido a sus características y cualidades que lo transforman en una alternativa como agregado en diferentes obras viales. Los diferentes usos que se han otorgado contribuyen a solucionar ambos problemas ambientales, ya que al utilizar este material se elimina el impacto ambiental negativo que implica el extraer áridos de ríos y esteros, y se disminuye el impacto que genera tener este residuo acumulado [14].

Los procesos requeridos para caracterizar los posibles efectos de la escoria de cobre en el medio ambiente destacan el análisis mediante fluorescencia de rayos X y el Test de Toxicidad por Lixiviación. Se presenta a continuación la descripción de estos estudios, sus objetivos, los elementos a analizar y los efectos que producen en el medio ambiente.

Posteriormente, se verificará si la escoria de cobre poder ser denominada un residuo peligroso, Luego se evaluará tanto sus componentes como sus efectos, para determinar si este desecho minero cumple con las características para ser declarado desecho inerte, o es definido como residuo peligroso y si es factible el uso de este en obras viales.

3.3.1. Tipo de Análisis.

3.3.1.1. Fluorescencia de Rayos X.

La fluorescencia de rayos X (FRX) es una técnica espectroscópica que utiliza la emisión secundaria o fluorescente de radiación X generada al excitar una muestra con una fuente de radiación X. La radiación X incidente o primaria expulsa electrones de capas interiores del átomo. Los electrones de capas más externas ocupan los lugares vacantes, y el exceso energético resultante de esta transición se disipa en forma de fotones, radiación X fluorescente o secundaria, con una longitud de onda característica que depende del gradiente energético entre los orbitales electrónicos implicados, y una intensidad directamente relacionada con la concentración del elemento en la muestra [19].

La FRX tiene como finalidad principal el análisis químico elemental, tanto cualitativo como cuantitativo, de los elementos comprendidos entre el flúor (F) y el uranio (U) de muestras sólidas (filtros, metales, rocas, muestras en polvo, tejidos, etc.) y líquidas porque permite hacerlos sin preparación de la muestra. El único requisito es que la muestra tenga un tamaño inferior al del porta muestras [19]. El instrumento utilizado para este tipo de análisis se muestra en la Figura 3.4.

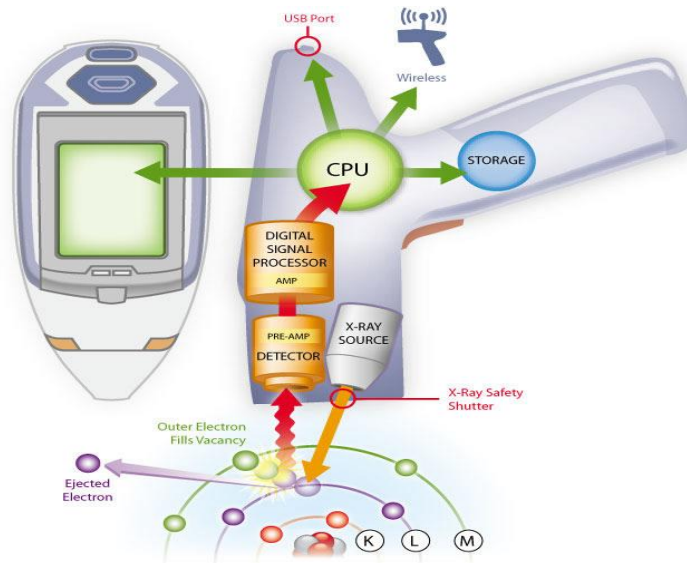


Figura 3.4- Instrumento Utilizado para Realizar Análisis de Fluorescencia de Rayos X.

3.3.1.2. Test de Toxicidad por Lixiviación.

La lixiviación de minerales es uno de los principales procesos usados hoy en día en la hidrometalurgia. Consiste en la disolución selectiva de los constituyentes de un mineral en una solución, a través de una reacción entre la solución lixiviante (agente) y el sólido que se quiere lixiviar, disolviendo la sustancia o mineral de interés, y posteriormente un transporte de materia. Este fenómeno de disolución selectiva se debe a que muchos metales pueden formar sales solubles en medios acuosos, y también es necesario recordar que los óxidos son sensibles a los ataques de soluciones ácidas, y, como se mencionó anteriormente, la escoria está formada principalmente por los óxidos que se producen durante el proceso piro- metalúrgico.

Las pruebas de lixiviación son ensayos muy útiles en la caracterización de residuos y materiales empleados en la industria de la construcción, el instrumento utilizado se muestra en la Figura 3.5. Los materiales no convencionales (residuos y subproductos industriales) utilizados en la construcción de caminos pueden contener compuestos que, al estar expuestos al agua (lluvia, agua superficial, agua subterránea, etc.), probablemente experimenten procesos de disolución y los liberen al ambiente (transporte). Si la concentración de alguno de estos componentes es elevada, puede presentar un riesgo al medio ambiente en el que se encuentran. Algunos de estos componentes que son un riesgo para la salud de las personas y al medio ambiente son: arsénico, bismuto, zinc, plomo, cadmio, selenio, antimonio, níquel, etc [20].



Figura 3.5- Instrumento Utilizado para Realizar Test de Toxicidad por Lixiviación.

3.3.2. Normativas Chilenas de Regulación de Residuos Tóxicos.

La regulación de residuos tóxicos y/o peligroso que rige a nivel nacional está establecido por el Decreto 148- 2004 “APRUEBA REGLAMENTO SANITARIO SOBRE MANEJO DE RESIDUOS PELIGROSOS” [21]. Este documento especifica las exigencias del manejo de residuos peligrosos, con el propósito de permitir a las personas vivir en un medio ambiente libre de contaminación, así como garantizar su derecho a la protección de la salud.

Además, este decreto indica que el crecimiento de la actividad económica ha multiplicado la generación de residuos peligrosos, con el consiguiente aumento de los riesgos que amenazan la salud humana y el medio ambiente. Tal motivo impulso a realizar un adecuado marco normativo para inducir a la incorporación de una gestión de los residuos más eficientes, que ayude a minimizar la generación de residuos peligrosos.

Como resultado de la implementación de este reglamento se dispondrá de información relativa a los residuos peligrosos que se generan en el país, cuyo procesamiento y análisis será de utilidad para la autoridad sanitaria, la comunidad y las actividades productivas, en los que respecta al conocimiento de los residuos peligrosos y las mejores alternativas para su manejo, entre otros posibles usos de la información [21].

Algunos de los artículos a destacar y que son importantes dentro del proceso de residuos mineros, y que abarcan a las escorias desechadas al finalizar los procesos pirometalúrgicos son:

- **Artículo 14:** *Un residuo tendrá la característica de toxicidad extrínseca cuando su eliminación pueda dar origen a una o más sustancias tóxicas agudas o tóxicas crónicas en concentraciones que pongan en riesgo la salud de la población. Cuando la eliminación se haga a través de su disposición final en el suelo se considerará que el respectivo residuo tiene esta característica cuando el Test de Toxicidad por Lixiviación arroje, para cualquiera de las sustancias mencionadas, concentraciones superiores a las señaladas en la siguiente tabla, Tabla 4:*

Tabla 3.4- Adaptación Tabla de Concentraciones de Sustancias Peligrosas (Metales Pesados). Fuente [19]

Código RP	Sustancia	CMP [mg/l]
D004	Arsénico	5
D007	Cromo	5
D009	Mercurio	0,2
D008	Plomo	5
D010	Selenio	1
D005	Bario	100
D018	Benceno	0,5
D006	Cadmio	1
D019	Tetracloruro de carbono	0,5

- **Artículo 23:** *Para efectos de la aplicación del presente reglamento y siempre que la disposición final no se realice en conjunto con residuos sólidos domésticos u otros similares, los siguientes residuos mineros masivos que provengan de las operaciones de extracción, beneficio o procesamiento de minerales no serán considerados peligrosos:*

- a) *Los estériles.*
- b) *Los minerales de baja ley.*
- c) *Los residuos de minerales tratados por lixiviación.*
- d) *Los relaves.*
- e) *Las escorias.*

No obstante, la Autoridad Sanitaria podrá, en casos calificados, requerir de un generador la caracterización de sus residuos mineros masivos. La Autoridad Sanitaria podrá en todo caso muestrear, analizar y caracterizar la peligrosidad de dichos residuos toda vez que lo estime oportuno.

Uno de los componentes denominado como residuo peligroso (RP) es el arsénico, que se encuentra asociado a la actividad minera como una impureza frecuente en los minerales sulfurados de cobre. En la pirometalurgia, el arsénico es un elemento no deseado que debe ser controlado puesto que introduce dos tipos de problemas [22]:

- Contaminación ambiental, debido a su toxicidad para organismos vivientes en cualquiera de sus formas químicas, pero especialmente cuando se encuentra como arsenito “As(+3)”.
- Contaminación de productos intermedios y finales. Su presencia en la fase metálica puede provocar pérdidas de las propiedades mecánicas y eléctricas del metal final y su remoción genera problemas de procesamiento.

El arsénico ha sido clasificado, según la Agencia Internacional de Investigaciones del Cáncer (IARC), como un agente cancerígeno comprobado. Con el fin de proteger la salud de las personas y los recursos naturales renovables, el Gobierno de Chile estableció en 1999, mediante decreto supremo, la “Norma de Emisión para la regulación del contaminante arsénico emitido al aire” [23]. Los desechos que contienen arsénico requieren un manejo cuidadoso, ya que el metal se lixivia y tiene un punto de ebullición relativamente bajo (614°C).

3.3.3. Resultados Internacionales del TCLP en Escorias de Cobre.

Investigación 1: “Evaluación del uso de escoria de cobre gastada para la recuperación de tierras” [24]

La escasez de espacio en los vertederos para la eliminación de desechos y la alta demanda de materiales de relleno para proyectos de recuperación de tierras en Singapur han llevado a un estudio sobre la viabilidad de utilizar la escoria de cobre gastada como material de relleno en la recuperación de tierras. Los posibles impactos ambientales asociados con el uso de la escoria de cobre gastada para la recuperación de la tierra también se evaluaron mediante la realización de pruebas de laboratorio que incluyen mediciones de pH y el potencial de oxidación (Eh), pruebas de lixiviación

por lotes, determinación de la capacidad de neutralización de ácidos y monitoreo de la disolución a largo plazo del material [24].

Los resultados obtenidos del test de toxicidad por lixiviación realizados por este estudio [24] en escorias de cobre gastadas entregó valores para seis muestras con diferente valor de pH del lixivante, estos se aprecian en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5- Concentraciones de MP en Muestras de Escoria de Cobre gastadas posterior al TCPL. Fuente [22].

Elemento	Concentración de Lixiviados [mg/l]						
	Contenido total [g/kg]	Prueba 1 (TCLP)	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5	Prueba 6
Si	155	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Pb	0,71	0,51	2,96	0,82	0,0024	<0,01	<0,01
Cd	0,04	0,03	0,06	0,04	0,03	0,03	0,02
Cr	0,28	0,081	0,59	0,12	<0,01	<0,01	0,07
Ba	2,4	1,2	NA	NA	NA	NA	NA
As	0,63	0,08	NA	NA	NA	NA	NA
Ag	0,04	<0,01	NA	NA	NA	NA	NA
Se	0,07	0,05	NA	NA	NA	NA	NA
Hg	0,02	<0,01	NA	NA	NA	NA	NA
Zn	6,06	18,5	54,7	27,6	10,3	5,88	1,86
Prueba 1: US EPA TCLP – inicial pH 5,0, 0,1 mol L ⁻¹ HAC, 18 h, 1: 20 sólido: agua.							
Prueba 2: Extracción a pH constante 3,0, 0,5 mol L ⁻¹ NaAc, 24 h, 1: 20 sólido: agua.							
Prueba 3: Extracción a pH constante 4,0, 0,5 mol L ⁻¹ NaAc, 24 h, 1: 20 sólido: agua.							
Prueba 4: Extracción a pH constante 6,0, 0,5 mol L ⁻¹ NaAc, 24 h, 1: 20 sólido: agua.							
Prueba 5: Extracción a pH constante 7,0, 0,5 mol L ⁻¹ NaAc, 24 h, 1: 20 sólido: agua.							
Prueba 6: Extracción a pH constante 8,0, 0,5 mol L ⁻¹ NaAc, 24 h, 1: 20 sólido: agua.							
NA: No analizado							

Las concentraciones de aquellos elementos considerados peligroso (Pb, Cd, Cr, Ba, As, Ag, Se y Hg) en el lixiviado de TCLP de la Prueba 1 fueron bastante bajas en comparación con los límites de umbral de la Agencia de Protección del Ambiente (EPA) de EE. UU [24]. Para los lixiviados, se consideró en este estudio que la escoria de cobre no causa un impacto ambiental severo, pero inevitablemente puede aumentar el contenido de metales pesados en el suelo y el agua subterránea en el sitio recuperado.

Investigación 2: “La lixiviabilidad del arsénico y los metales pesados de la escoria de cobre arruinada y la contaminación del sedimento marino y el suelo en el distrito de Ninh Hoa, en el centro sur de Vietnam” [25]

El área de estudio se encuentra en Ninh Hoa, provincia de Khanh Hoa, Vietnam, donde el trabajo realizado por [25], examinó la liberación real y a largo plazo de As y de metales pesados (MP) de escorias de cobre mediante una prueba de lixiviación en cascada. La prueba de lixiviación (prueba CEN / TS 14429) se realizó para evaluar la liberación de As y MP de escorias de cobre bajo la influencia de la acidificación, esta prueba se realizó con agua destilada acidificada a pH 4 y sin ningún ajuste de pH durante la prueba. El tamaño de partícula fue una variable en las escorias de cobre estudiadas. En sus investigaciones la influencia del tamaño de partícula en la liberación de As y MP en las pruebas de lixiviación se realizaron en diferentes fracciones de tamaño de partícula (<1 mm y masa con la prueba de lixiviación PH_{stat}, <1 mm y <125 µm con la prueba de lixiviación en cascada). Este estudio también proporcionó una primera caracterización de la contaminación por As y MP de sedimentos y suelos cercanos al vertedero de escoria de cobre.

En estas pruebas se pusieron 80 gramos de muestra en un matraz Erlenmeyer junto con 800 ml de agua. El primer lote de pH_{stat} se realizó durante 168 horas. Este experimento demostró que no se observó liberación adicional de MP entre 120 y 168 horas. Por lo tanto, el pH_{stat} posterior a la prueba de lixiviación se realizó durante 120 h. Luego se tomó una muestra de 10 ml de la suspensión sobre un filtro (0,45 µm, Chromafil PET-45/25, Macherey–Nagel GmbH & Co. KG, Alemania) mediante una jeringa conectada a un tubo flexible a intervalos de tiempo regulares (0; 1; 3; 6; 12; 24; 48; 72; 96 y 120 horas / 168 horas). Cuando se terminó la prueba de lixiviación, el residuo se secó para realizar un análisis de difracción de rayos X con el fin de investigar posibles cambios en la composición mineralógica de la fase sólida durante la prueba de lixiviación. Los resultados obtenidos de estos estudios se presentan en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6- Concentraciones de MP en Muestras Obtenidas de Escorias de Cobre, Sedimentos Superficiales y superficie del suelo cercanos al Botadero. Fuente [23].

	Unidad	Concentraciones totales de elementos en Escorias de cobre		Concentraciones en Sedimentos superficiales		Concentraciones en Superficie del suelo	
		Contenido [g/kg]	Muestra con pH 4	Promedio	Rango	Promedio	Rango
Pb	[mg/kg]	854	853 ± 61	22	1-170	241	25-715
Cd	[mg/kg]	24	23 ± 1	N/A	N/A	16	3-37
Cr	[mg/kg]	651	566 ± 71	35	8-135	142	5-415
Mo	[mg/kg]	ND	2054	-	-	-	-
As	[mg/kg]	847	798 ± 88	19	1-168	283	5-940
Ni	[mg/kg]	139	113 ± 37	11	3-35	16	2-41
Zn	[mg/kg]	0,92	0,84 ± 0,18	187	3-1733	2357	40-6709

N/A: No analizado

3.3.4. Comparaciones y Comentarios de la Evaluación Ambiental.

Los resultados que se obtuvieron en las dos investigaciones anteriores, concluyeron que las concentraciones de arsénico y de metales pesados presentes en las escorias de cobre y en los terrenos cercanos a los depósitos de este material fueron inferiores a las normativas que rigen en cada país de origen, sin embargo, las observaciones que entregan en estos estudios, hablan sobre las repercusiones que implica tener este material acumulado en vertederos, ya que si bien no produce impactos ambientales severos, si genera un aumento en los metales pesados de los suelos donde se depositan.

Realizando una comparación de los resultados de estos estudios con lo establecido en las Normas Chilenas, se puede decir en un caso hipotético que, si estas escorias fueran analizadas en Chile, cumplirían con las restricciones para las concentraciones de arsénico y de metales pesados, pero bajo la observación rigurosa de los organismos asociados al cuidado del medioambiente.

Para la Comisión Nacional del Medioambiente (CONAMA) la definición de escoria es una mezcla de óxidos de hierro y silicatos u otros compuestos producidos durante el proceso de fusión y conversión de concentrados sulfurados que es descartada para su disposición final en botaderos o para su posterior tratamiento en una unidad de procesamiento de minerales. Para las escorias de fundición existen legislaciones (Ley N° 19.300) [26] que regulan el almacenamiento adecuado posterior a su procesamiento, estas legislaciones no contemplan la revaloración, recuperación, reutilización ni reciclaje de las escorias, lo que contribuiría principalmente a la descontaminación del medio ambiente.

Una de las iniciativas de Codelco Ventanas en los reportes de sustentabilidad realizados todos los años destaca la protección del “humedal Campiche”, ubicado en la cercanía del depósito de escorias de cobre, en la Figura 3.6 se muestra la localización de este cuerpo de agua. Para la protección de este sector se contempla la utilización de la técnica de bioingeniería conocida como “biorrollos vegetados”. El propósito de esta técnica es revegetar las riberas de la laguna principal, con el fin de crear un hábitat favorable para la colonización y desarrollo de la vegetación del sector, además de proporcionar sitios de refugio, nidificación y alimentación a la fauna silvestre residente y migratoria. Transcurridos cinco años desde iniciado el Plan de Restauración del humedal, Codelco ha logrado restaurar el lugar generando una pantalla vegetal, que conforma un corredor ecológico de importancia en torno al humedal, lo que ha permitido el asentamiento de más de 60 especies de vertebrados (Reporte de Sustentabilidad 2019) [27]. La creación de este Plan de Restauración del humedal demuestra la importancia de la evaluación ambiental realizada por Codelco en sus depósitos de escoriales, minimizando todos aquellos aspectos negativos que genera el vertedero cercano a este cuerpo de agua, mostrando que las escorias de cobre no son una amenaza para la flora y fauna del sector.

Como conclusión es preciso decir que la existencia de arsénico en la escoria de cobre debe ser analizada con rigurosidad, pues es un elemento no registrado en los ensayos de fluorescencia de rayos X tradicionales, por este motivo es necesario realizar un estudio ambiental que permita no sólo obtener la presencia del arsénico en la escoria de cobre, sino que también señale si el material podrá ser catalogado como residuo no peligroso. En caso de ser catalogado como residuo peligroso, se concluirá inmediatamente que, en ese estado, la escoria de cobre no cumpliría con los requisitos para ser utilizado como árido en obras viales.



Figura 3.6- Ubicación del Humedal Campiche en las cercanías del Botadero de Escoria de Cobre.

4. Capítulo IV

4.1 Áridos del Aconcagua.

4.1.1. Ubicación.

Los áridos del Aconcagua tal como su nombre lo indica, son provenientes del río Aconcagua. Este cauce se encuentra en la Región de Valparaíso y su extensión alcanza los 7.340 km². El rumbo general es de E a W. Comienza desde la junta con el río Blanco y el río Juncal, luego recorre 142 km hasta su desembocadura en la bahía de Concón en el mar chileno [28], una vista general de este río se muestra en la Figura 4.1.



Figura 4.1- Proyección del Río Aconcagua.

4.1.2. Obtención del Árido.

El río Aconcagua y sus afluentes representan una de las principales fuentes de abastecimiento de áridos para la construcción en la V Región del país. Los áridos son explotados desde el lecho de este río en tramos que abarcan desde su paso por la comuna de los Andes, en el sector precordillerano, hasta la desembocadura en el mar. El auge experimentado durante los últimos años por la actividad inmobiliaria, así como el desarrollo de importantes proyectos viales en la V Región, han generado un creciente aumento en la demanda de áridos, la cual ha derivado a su vez en un aumento de la superficie explotada y en los volúmenes de material extraídos desde el lecho [29].

En la actualidad, cada proyecto de extracción de áridos se analiza técnicamente con la finalidad de no alterar el comportamiento hidráulico y mecánico fluvial local de cada tramo explotado.

Un proyecto de extracción conlleva a una excavación que se realiza en la superficie del terreno con el fin de extraer un material pétreo de la corteza terrestre como materia prima. Esta operación implica utilizar maquinarias para realizar la extracción, equipos de carguío y transporte. También es posible que sea necesario mover cantidades significativas de estéril, según la profundidad del depósito o espesor del recubrimiento.

El procedimiento para realizar la explotación queda definido por la aplicación de los parámetros o criterios de diseño de la excavación. El diseño de una explotación dependerá del tipo de yacimiento, incidiendo principalmente los parámetros geométricos que lo definen, las características del material a extraer y las distancias involucradas a los puntos de acopio o procesamiento.

Los proyectos de extracción presentan diversos matices, de acuerdo con las condiciones geomorfológicas en que se encuentra el yacimiento o reservas de material pétreo y a los niveles tecnológicos empleados para su explotación. Para analizar la extracción de estos materiales, los proyectos de extracción han sido clasificados en cuatro grandes grupos:

- a.- Extracción en cauces
- b.- Extracción en bancos areneros
- c.- Extracción en pozos
- d.- Extracción en canteras

Los proyectos de extracción de áridos más comunes en las cercanías del río Aconcagua son los denominados “*Proyectos de Extracción en Cauces*” dada la naturaleza de los yacimientos. La extracción en cauce corresponde a la explotación del material pétreo que se halla en las depresiones naturales del terreno por las que puede escurrir agua, en las cuales se encuentra material arrastrado por dichos escurrimientos. En otras palabras, corresponde a una extracción mediante la excavación de los lechos fluviales, tanto en niveles artesanales como en forma mecanizada.

El equipo de mayor uso en la extracción sobre lecho seco a poca profundidad es un cargador frontal que carga directamente al camión, tal como se muestra en la Figura 4.2. También pueden extraerse áridos de los cauces con equipos de dragas, que son especiales para sacar material a una gran profundidad y donde a la vez sea difícil acceder al lecho del cauce con otro equipo convencional. Para toda extracción que se realice dentro de un cauce es necesario tener una concesión municipal para su explotación, además de todos los permisos e informes técnicos favorables, que debe aprobar el Departamento de Defensas Fluviales del MOP y los demás organismos estatales que controlan el medio ambiente [30].



Figura 4.2- A) Acopio y carga de los áridos del Aconcagua B) Proceso de chancado y Tamizado.

En la Figura 4.3 se muestra algunos de los sectores de extracción de áridos y sus respectivas plantas de tratamiento localizados en el río Aconcagua.



Figura 4.3- Ubicación de seis empresas dedicadas a la extracción de áridos.

4.1.3. Tipos de Áridos.

Las empresas de empréstito situadas en las cercanías del río Aconcagua, dentro de sus procesos de extracción y fabricación de áridos producen deferentes variedades (tamaño, forma y composición). Los áridos de menos resistencia se utilizan en capas inferiores de las estructuras granulares y los de mayor pueden componer la parte superior de una estructura granular. Existen también áridos que por sí solos no tienen uso, salvo que sean mezclados con otros para conformar distintos tipos de mezclas.

Los áridos producidos en estas faenas se clasifican en cuatro especies: a) grava, b) gravilla, c) arenas y d) estabilizados. Cada una de éstas poseen características diferente y un uso específico. A continuación, en la Tabla 4.1 se indican los principales usos, características y granulometría.

Tabla 4.1- Tipos de Áridos Producidos cerca del Río Aconcagua. Fuente Áridos BOCO.

TIPO	USOS	CARACTERISTICAS	IMAGEN
Gravas	Hormigones en Obra. Hormigones Armados y de Alta Resistencia.	Tamaño máximo 40 [mm]. Producto lavado. 75% de Partículas Chancadas.	
Gravillas	Hormigones Industriales. Hormigones en Obra. Elementos Prefabricados de Hormigón. Hormigones Bombeados.	Tamaño máximo 20 mm - 5 [mm]. Buena Cubicidad. Alta trabajabilidad. Alta resistencia a la flexo-tracción. Producto Lavado.	
Arenas	Hormigón en obra. Hormigón premezclado. Hormigón bombeable. Morteros. Elementos prefabricados	Triturado mecánicamente Lavado a presión Tamaño máximo es de 3/8"	
Estabilizados	Obras Viales Rellenos Bases Sub Bases	60% de Partículas Chancadas. Tamaño Máximo 40 mm Producto sin lavar. Alta capacidad de soporte, controlada en un 100%.	

4.1.4. Características y Propiedades de un Árido con Granulometría entre 1,3-3,5 [mm].

Las características y propiedades de los áridos provenientes del río Aconcagua, se especifican en la Tabla 4.2, los que fueron extraídos por la empresa ASFALCOM. Ésta los sometió al proceso de trituración y chancado, para reducirlo a un tamaño de 3/8" (10 mm). Posteriormente, en laboratorio, este material fue chancado en la máquina de los ángeles, para obtener tamaños finales entre 1,3 y 3,5 [mm] aproximadamente. Este agregado pétreo luego fue sometido a los ensayos de caracterización, mostrados en el Capítulo VI, los resultados dan una noción general de los áridos del Aconcagua con esa granulometría, la cual se muestra en la Figura 4.4.

Tabla 4.2- Propiedades del Árido del Aconcagua Proveniente de Asfalcom con Granulometría entre 1,3- 3,5 mm Determinadas en Laboratorio.

Tipo de Ensayo	M.C	Unidades	ÁRIDO DEL ACONCAGUA
Densidad Real SSS	8.202.20-21	[kg/m ³]	2643,50
Densidad Real S	8.202.20-21	[kg/m ³]	2597,41
Densidad Neta	8.202.20-21	[kg/m ³]	2722,93
Densidad Aparente Suelta	8.202.19	[kg/m ³]	1449,72
Absorción	8.202.20-21	[%]	1,77
Índice de Lajas	8.202.7	[%]	6,43
Desgaste de los Ángeles	8.202.11	[%]	15,15
Índice de Trituración	8.202.8	[%]	2,64



Figura 4.4- Agregado Pétreo del Aconcagua, con tamaño de partículas entre 1,3 -4 [mm].

5. Capítulo V

5.1. Sellos de Alta Fricción.

5.1.1. Historia.

A lo largo de la historia han existido diferentes tecnologías propuestas para reducir el deslizamiento de los vehículos en los pavimentos bajo condiciones desfavorables. Estas tecnologías tuvieron su origen en Inglaterra en 1966, en donde se utilizó por primera vez el concepto de superficies de alta fricción.

En 1974 se realizó un estudio en ese mismo país, que demostró una dramática reducción en el índice de accidentes por deslizamiento en un 70%, gracias al empleo de esta tecnología. En 1978 la “Highways Agency” - organismo homólogo del Reino Unido (UK) – introdujo una norma referente al coeficiente de rozamiento transversal (CRT). Ya entonces, se exigía un valor de 55 puntos, para aquellos escenarios de alto riesgo, como curvas peligrosas o aproximaciones a rotondas, pasos peatonales y cruces.

En 1998, ante el riesgo que supone el uso de técnicas que no fueron diseñadas para este efecto por ejemplo morteros y selladores asfálticos, riegos de sello, entre otros, se introduce un sistema de homologación denominado HAPAS¹, el cual obliga a todas las superficies de alta fricción a estar certificadas por el British Board of Agreement (BBA) y con un CRT superior a 65 durante un mínimo de 5 años, incluso en zonas de poco tráfico.

Una de las tecnologías utilizadas para reducir los índices de accidentes y aumentar las características friccionales de un pavimento en Chile, son los sellos de alta fricción. Su aplicación sobre aquellos caminos y carreteras con condiciones desfavorables brindan actualmente mayor seguridad al conductor y permiten aumentar las propiedades friccionales de los pavimentos al igual que los valores de los parámetros requeridos por el sistema HAPAS [31].

5.1.2. Definición de los Sellos de Alta Fricción.

Los sellos de alta fricción son aquellas mezclas compuestas por un aglutinante y agregados pétreos o sintéticos altamente resistente al pulimento y abrasión, donde el aglutinante tiene como propósito fijar el árido a la capa de rodadura o sustrato a tratar, estas son aplicadas sobre una superficie para brindar una mejor resistencia al deslizamiento y textura de los pavimentos, estos pueden ser aplicados en frío (termo endurecimiento) y en caliente (termoplásticos).

“Los sellos de alta fricción comprenden una resina de poliuretano de alta adherencia y flexibilidad la cuál es cubierta con un árido de bauxita calcinada u otro material de gran dureza y granulometría entre 1,3 y 3,5 [mm]” [32].

¹ HAPAS: Highways Authorities Product Approval Scheme (Sistema de Aprobación de Productos de las Autoridades de Carreteras)

5.1.3. Componentes de un Sello de Alta Fricción.

Los sellos de alta fricción como ya antes se mencionó les otorgan propiedades friccionales a los pavimentos, aumentando la resistencia al deslizamiento y profundidad de textura (micro y macro textura). Estas propiedades están estrechamente relacionadas con los tipos de materiales que componen a estas mezclas, pues a partir de las características físicas y químicas se evalúa el desempeño y la durabilidad que estas puedan tener.

El árido que principalmente componen los sellos de alta fricción y que además se presentan comúnmente en los caminos es la bauxita calcinada, dado los altos índices que posee en lo que respecta al pulimento y abrasión, sin embargo, se han probado alternativas para suplir el uso de este agregado, reemplazándolo por agregados sintéticos o naturales que ofrezcan índices muy semejantes a la bauxita calcinada, o que incluso tengan la capacidad de cumplir con los estándares necesarios establecidos por la BBA [5].

El aglutinante de resina que se utiliza para los SSAF tiene la función de mantener unidas a las partículas del agregado, otorgándole a la superficie una mayor adherencia entre las partículas y la carretera. Comúnmente este aglutinante comprende resinas epoxi, poliuretano, poliurea o metacrilato de metilo (MMA).

A continuación, se describirá algunos de los componentes usados en la fabricación de SSAF, comenzando con el agregado especificado por la BBA, la bauxita calcinada, y luego la resina de poliuretano.

5.1.3.1. Bauxita Calcinada.

La bauxita es un mineral de aluminio y la principal materia prima para la fabricación de aluminio primario. El mineral proviene principalmente de la gibsita $[Al(OH)_3]$, bohemita y $[AlO(OH)]$ y diáspora $[a-AlO(OH)]$, mezclada con óxidos de hierro y arcillas [33]. La bauxita se clasifica en función de la aplicación comercial a la que se destina: metalúrgica, abrasivo, cemento, química y refractaria.

Las dos principales fuentes de bauxita a nivel mundial son: China y Guyana, pero como los especímenes de bauxita no están bien representados en las colecciones debido a su falta de estética, algunas de las otras localidades o países que son productores importantes de este material son: Australia, Brasil, Jamaica, Surinam, Guayana Francesa, Venezuela, Vietnam, India y Rusia. En los Estados Unidos, el principal productor de bauxita es Arkansas, que incluso tiene una ciudad llamada "*bauxite*" que lleva el nombre de sus famosas reservas. Otros estados con depósitos de bauxita son Georgia, Alabama, Mississippi, Tennessee y Virginia.

La bauxita es típicamente un material suave con una dureza de solo 1 a 3 en la escala de Mohs. Es de blanco a gris a marrón rojizo con una estructura piso lítica², brillo terroso y una gravedad específica baja de entre 2,0 y 2,5 gr/cm^3 , la Figura 5.1 muestra algunos de los aspectos de las bauxitas en estado natural. Estas propiedades son útiles para identificar la bauxita; sin embargo, no tienen nada que ver con el valor o la utilidad de la bauxita. Esto se debe a que la bauxita casi siempre se procesa en otro material con propiedades físicas que son claramente diferentes.

² **Piso lítico:** Compuesto o sustancia de origen química y mineral que este contenido la pisolita, es decir la roca, piedra o un canto que se caracteriza por su forma o figura de una arveja o guisante.

Algunas de las características que presenta la Bauxita como elemento natural se muestran en la Tabla 5.1:

Tabla 5.1- Características de la Bauxita. Fuente [30].

Características	Descripción
Composición	Hidróxido de aluminio básico
Color	Beige, amarillo, blanco, gris, marrón, marrón rojizo, rosa
Veta	Blanco
Dureza	1-3 [Mohs]
Sistema cristalino	Amorfo
Formas cristalinas y agregados	Muy a menudo como masas esféricas piso líticas y oolíticas dentro de una matriz. También masivo, botrioidal y en masas similares a la arcilla. A veces en nódulos con pequeños cristales que recubren las cavidades dentro de los nódulos.
Transparencia	Opaco
Peso específico	2,0-2,5 [gr/cm ³]
Brillo	Apagado terroso
Cleavage	Ninguna
Fractura	Terroso
Tenacidad	Frágil
Entorno	Como un mineral secundario que se forma en las zonas superficiales erosionadas en depósitos de arcilla y piedra caliza, así como en rocas ígneas bajas en sílice.
Demanda	Muy demandado

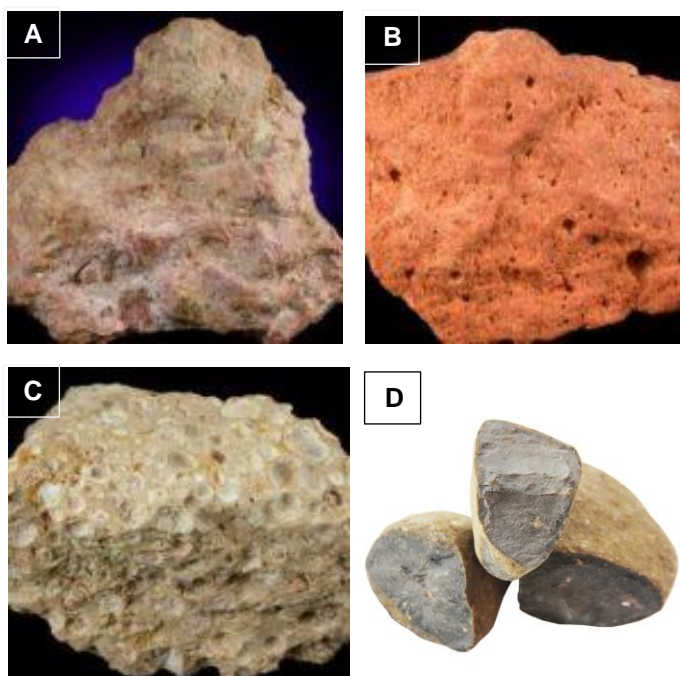


Figura 5.1- a) Bauxita de Guyana, b) Bauxita del Estado de Arkansas, c) Bauxita del Estado de Georgia, d) Bauxita de China.

La bauxita extraída directamente de las mineras es calcinada y dicha acción se produce por sinterización / calcinación de bauxitas crudas bajas en hierro y bajas en álcali a temperaturas de 1600 - 1800 grados Celsius. En este proceso de calcinación se forman las fases minerales altamente refractarias, corindón y mullita. Por lo tanto, la bauxita calcinada es una de las materias primas más importantes para la producción de refractarios moldeados y sin forma para la industria siderúrgica, fundiciones, plantas de vidrio y cemento. La bauxita calcinada está disponible como "corrida de horno", es decir, sin triturar o en fracciones y como polvo molido en bolas de acuerdo con los requisitos del cliente, a granel o en bolsas [34].

Este material calcinado se transforma en un agregado más denso, de mayor pureza y más estable, la mayoría de estos tiene un alto contenido en alúmina y un muy bajo contenido en álcalis con muy pocas impurezas; asegura, por tanto, una estable resistencia a la temperatura y buena resistencia mecánica (dureza y tenacidad). El aspecto de la bauxita calcinada se muestra en la Figura 5.2, donde aprecian partículas chancadas y sin pigmentación.

Estos materiales al ser de distintas zonas presentan cualidades que los diferencia, no obstante, estas diferencias no son considerables al momento de recurrir a ellos como material para los SSAF, pues poseen las características necesarias y requeridas como agregados, según la BBA y la HAPAS [34].

La composición típica de la bauxita calcinada proveniente de Guyana y de China se presentan en la Tabla 5.2:

Tabla 5.2- Características y composición Química de las Bauxitas Calcinadas de Guyana y China.

Características	Bauxita Calcinada "Guyana"	Bauxita Calcinada "China"	Unidad
	Valor	Valor	
Al ₂ O ₃	89	86	%
SiO ₃	6,5	6	%
Fe ₂ O ₃	1,0	1,5	%
Densidad	3,15	3,0	g/cm ³
Tamaño	0-1/ 1-3/...etc.	0-1/ 1-3/...etc.	mm



Figura 5.2- Forma de la Bauxita Calcinada Chancada.

En lo que respecta a los costos, la bauxita calcinada posee valores muy elevados, transformándola a nivel mundial en un material valioso al momento de adquirirla para aplicaciones comerciales a la que se destina, por este motivo, se buscan alternativas que logren sustituir o disminuir el uso masivo de este material. Disminuyendo la demanda de este producto es posible mitigar los impactos ambientales negativos que genera la explotación de este recurso. Sin embargo, a pesar del valor comercial que posea, este material de igual forma es utilizado dadas las características que tiene sobre otros agregados naturales y sintéticos. La Tabla 5.3 muestra la comparación de precios de tres agregados, los cuales serán los utilizados en este informe para los análisis de sellos de alta fricción.

Tabla 5.3- Precios comerciales de las BC, A. Aconcagua y Esc. de Cobre Ventanas.

AGREGADOS	VALOR COMERCIAL [\$]
Bauxita Calcinada (saco 25 kg)	\$ 30.000- \$35.000
Árido del Aconcagua (1,3-3,5 mm) (25 kg)	\$940-\$1.000
Escoria de Cobre (CODELCO Ventanas)	\$ 0

5.1.3.2. Resina Aglutinante.

- **Resinas de Poliuretano.**

Las resinas de poliuretano son un producto industrial, a menudo es utilizado en la fabricación de tintas, formación de moldes, en plásticos y materiales adhesivos. Estas resinas son maleables, sus propiedades de dureza y elasticidad pueden alterarse, y una vez asentadas en su forma final, no vuelven a la forma que tenían originalmente.

Las resinas de poliuretano se dividen en dos tipos, basándose en las propiedades de sus compuestos líquidos: isocianatos y polioles, ver Figura 5.3. En los Estados Unidos, las resinas de isocianatos se refieren a las resinas A o iso, y las muestras generadas por la mezcla de polioles, que incluyen hidroxilos y otros aditivos, se conocen como resinas B o poli. La mayoría de las resinas se venden en kits con ambos tipos, porque los dos se deben mezclar para lograr el compuesto deseado. Una vez mezclados, se asientan rápidamente. Las opciones de kits varían de rígidos a flexibles, con distintos tipos de dureza y opacidad.

La mayoría de las resinas de poliuretano se producen a través de una reacción entre un polialcohol³ y un disocianato⁴. Para alcanzar su forma final, se debe añadir calor o un catalizador. Una vez que se catalizó la reacción, la resina alcanza su forma final. Esta no es reversible, incluso si se usa calor. El compuesto de isocianato contiene nitrógeno, carbono y oxígeno. La exposición del compuesto al hidroxilo, que contiene hidrógeno, produce una reacción y la asociación de estos dos compuestos (polialcohol y disocianato) produce una cadena de uretanos que luego establece enlaces con poliésteres [35].

Se pueden lograr tres tipos distintos de resinas: rígidas, muy duras, lustrosas, indicadas para recubrimientos que deban presentar una elevada resistencia a los disolventes; las blandas y elásticas, en forma de cauchos resistentes a la abrasión; y la espuma que puede ser flexible o rígida [36].

³ **Polialcohol:** Sustancias cuya estructura consiste en una cadena carbonada con un grupo OH sobre cada uno de los carbonos.

⁴ **Disocianatos:** Compuestos químicos caracterizados por tener dos grupos funcionales Isocianatos (-N=C=O).



Figura 5.3- Compuestos: A (Isocianatos) y B (Poliol).

- **Resinas de Poliuretano para SSAF.**

Las resinas de poliuretano utilizadas para sellos de alta fricción se consideran como compuestos adhesivos, ya que tienen como objetivo principal mantener unidas las partículas de agregado pétreo a utilizar en distintas obras. Las características que debe tener este tipo de resinas para las mezclas de los SSAF corresponden a una estructura dura y resistente después de su aplicación, deben generar una cobertura resistente a los solventes o a la abrasión y tener una buena adherencia con el árido.

La información detallada de las propiedades de las resinas de poliuretano usadas en Chile y España para obras que requieren sellos de alta fricción en sectores con un índice elevado de accidentes vehiculares se presentan en la Tabla 5.4. Estos sellos poseen variedades de pigmentación de las cuales destaca el color rojo, establecido por el Ministerio de Obras Públicas (MOP) para sectores críticos, además su aplicación es en frío, no es inflamable ni contamina al medio ambiente. La Tabla 5.5 muestra las características que debe cumplir un tratamiento pigmentado.

Tabla 5.4- Propiedades de las Resinas de Poliuretano Usadas en Chile y España. Fuente "Color Vial Chile SL".

Características del adhesivo:

“Resina de Poliuretano de dos componentes”

Parámetros y Características	Valores y consideraciones
Rangos de Temperatura y Condiciones Atmosféricas	
Aplicación:	Temperatura ambiente : $5^{\circ}\text{C} \leq T^{\circ} \text{ amb} \leq 35^{\circ}\text{C}$ Temperatura del Pavimento: $T^{\circ}\text{p} \geq 5^{\circ}\text{C}$; $T^{\circ}\text{p} \geq [\text{Pto de Rocío} + 2^{\circ}\text{C}]$ Humedad Relativa $\leq 95\%$
Servicio:	Resiste todo rango de temperaturas del pavimento habituales en España (-20°C a 70°C) No presenta fluidez en 2 horas a 135°C
Tiempo útil de trabajo ("Pot Life")	Entre 15 y 40 minutos, según temperatura y humedad ambiente.
Tiempo de curado (Apertura al Tráfico)	Entre 1,5 y 4 horas, según temperatura y humedad ambiente Existen dos Grados: STANDARD-INVIERNO (catalizada) y SUMMER-VERANO (sin catalizar), idénticos en características mecánicas y de viscosidad; sólo difieren en el tiempo de curado
Color	Base: Ocre Activador: Marrón La base puede ser pigmentada para utilización con áridos de color y pigmentación (Verde, Rojo, Cian,)
Densidad	Base= $1,13 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ Activador= $1,23 \text{ [g/cm}^3\text{]}$
Disolvente	No contiene
Viscosidad	Tixotrópica
Contenido no volátil	100%
Adherencia	Adherencia al acero superior a 15 N/mm^2
Resistencia a la tracción	$\geq 10,5 \text{ [N/mm}^2\text{]}$
Elongación a la rotura	$\geq 45 \%$
Dotación	Función de la macro textura superficial y del tipo de capa de rodadura. Dotaciones Standard: Hormigón: $1,60 \text{ [kg/m}^2\text{]}$ Asfalto: $1,60 \text{ [kg/m}^2\text{]}$: AC16surfS/D (antiguas S12/D12) $2,15 \text{ [kg/m}^2\text{]}$: BBTM (antiguas M/F) y PA; todas las mezclas drenantes requieren sellado previo con arena de sílice secada en horno.

Tabla 5.5- Características de un Tratamiento Pigmentado en SSAF. Fuente "Color Vial Chile SL".

Tratamiento Pigmentado	
Ensayo de desgaste "Wear Test" (método "TRL Report 176 (12), Appendix H")	
• después de 10.000 ciclos 10	≤10
• después de 100.000 ciclos	≤12,5
Ensayo de desgaste "Scuffing Test" Standard (método "TRL Report 176, Appendix G") durante 9 minutos y tras 24 h de saturación en Gasóleo	≤15
Ensayo de Resistencia a la Niebla Salina, según BS 3900: Part F12:1985 (1991) Exposición durante 500 h a 35 °C	≤1,5
Ensayo de Resistencia a la Radiación Ultravioleta UV-A, según ASTM G53-96 2000 h en ciclos de 4 h QUV-A a 45 °C / 4h condensación a 50 °C	≤10

Otros proveedores encargados de la confección de las resinas de poliuretano son: LEESON POLYURETHANES y GEVEKO markings, los cuales poseen productos certificados por el BBA y que cumplen con los requisitos de HAPAS para un producto de alta fricción "Tipo 1", utilizado para rutas de alto tráfico vehicular con un valor de pasadas de rueda por carril por día cuyas cifras varían entre 2500 a 3500. Este valor cambia según las características que posea el sitio, puesto que este producto puede ser aplicado en cruces principales, aproximaciones a rotondas, caminos con radios de curvatura <500 m, entre otros.

Estas resinas permiten satisfacer los requerimientos de durabilidad, desgaste y resistencia al deslizamiento de los sellos de alta fricción, además otorgan al producto final una adherencia entre partículas que es favorable para mantener una textura superficial apta para las condiciones de alto tráfico. Asimismo, las pruebas de laboratorio según el informe TRL 176, apéndice J, han confirmado una fuerza de adherencia de tracción satisfactoria al asfalto y el hormigón si se ha instalado de acuerdo con las disposiciones de los certificados pertinentes a cada producto.

Algunas de las características más relevantes de las resinas de poliuretano de estos dos proveedores son las que se muestran en las Tablas 5.6 y 5.7, cabe destacar que para ambos materiales se realizaron sus pruebas respectivas de desempeño, las que fueron evaluadas para ser certificadas por la BBA.

Tabla 5.6- Características de los Componentes LeesonGrip.

	LeesonGrip D3149/20	
	Parte A (resina)	Parte B (endurecedor)
Color	Beis	Líquido marrón
Densidad	0,96 [g/cm ³]	1,236 [g/cm ³]
Relación de mezcla (19°C)	2,15	1
Viscosidad	1600 +- 400 [mPa.s]	
Vida útil	25 +- 5 minutos	

Tabla 5.7- Especificaciones Técnicas de las Resinas Certificadas de LeesonGrip y Geveko Markings.

Especificaciones Técnicas	LeesonGrip (Polyurethanes)		Geveko Markings
Parámetros	Intervalo	Estándar	Valor (7días)
Adherencia bajo tracción del aglutinante (28 días)	>16 N/mm ²	BS2782 parte 3 métodos 320A-320F	10 N/mm ²
Elongación del aglutinante (28 días)	>100 %	BS2782 parte 3 métodos 320A-320F	90%
Dureza del aglutinante (48 horas)	> 90 (Shore A)	LPU STM 9	
Resistencia al deslizamiento	Resistencia al deslizamiento inicial >100 Después de 100000 vueltas de rueda aproximadamente 85	LPU STM 80	>80

5.2. Propiedades Mecánicas y Químicas de los SSAF.

Las principales propiedades que deben tener los sellos de alta fricción al ser implementado sobre un camino, carretera u otra superficie en específico se basan en las características físicas, químicas, geográficas, geológicas, topográficas, etc. que se encuentren en el sector de su aplicación. Esto incluye los fenómenos físicos que suceden entre los cuerpos en movimiento (vehículos) y la capa de rodadura por donde estos transitan.

Chile se caracteriza por tener un clima variado a lo largo de su territorio, esto implica un clima seco al norte y un clima húmedo al sur. La variación de climas produce en las zonas cambios térmicos importantes que afectan las condiciones de servicio y durabilidad de los pavimentos. Por este motivo las nuevas tecnologías están enfocadas en entregar vías con mayor capacidad de fricción y resistencia a los deslizamientos, aumentando la adherencia entre neumático y pavimento, en sectores críticos de mayor influencia de accidentes vehiculares.

Los sellos de alta fricción tienen el objetivo de potenciar estas características en los pavimentos, y para ello estos deben cumplir con las normativas dictadas para superficies de alta fricción.

5.2.1. Fricción y Resistencia al Deslizamiento.

La principal propiedad mecánica que se relaciona con los SSAF corresponde al concepto de fricción o resistencia al deslizamiento, el cual señala que el movimiento de un vehículo es posible mientras las fuerzas resistentes sean iguales o superiores a las fuerzas de deslizamiento.

La fuerza de fricción (F_r) depende directamente del coeficiente de fricción (μ) y la fuerza peso del vehículo normal al plano (W), tal como aparece en la ecuación 5.1:

$$Fuerza\ fricción\ (F_r) = Coef.\ Fricción\ (\mu) * Peso\ Vehículo\ (W) \quad (Ec. 5.1)$$

El coeficiente de fricción (μ) es la razón entre la resistencia al deslizamiento (F_r) y la fuerza normal a la superficie donde el cuerpo desliza (W). La resistencia al deslizamiento, por definición es la fuerza desarrollada entre la superficie del pavimento y el neumático, que estando impedidos de rotar se deslizan a lo largo de la superficie. Este coeficiente de fricción se desarrolla en la longitud horizontal y vertical del plano, tal como se muestra en la Figura 5.4 y su función esta descrita según las ecuaciones 5.2 y 5.3 respectivamente.

$$\text{Coef. Friccion } (\mu_x) = \frac{F_x}{W} \quad (\text{Ec. 5. 2})$$

$$\text{Coef. Friccion } (\mu_y) = \frac{F_y}{W} \quad (\text{Ec. 5. 3})$$

Durante el movimiento del vehículo, existen fuerzas que son transmitidas entre el neumático y el pavimento, estas actúan normal a la superficie como también de forma paralelas a ella siendo ejercidas de manera vertical y horizontal respectivamente.

Las fuerzas horizontales pueden ser proyectadas en la dirección tangencial, que es paralela a la trayectoria del vehículo y en la dirección radial, que es normal a la trayectoria de este. Este fenómeno se aprecia de mejor manera en las curvas, debido a que la fuerza de roce compensa el efecto que genera la fuerza centrífuga, impidiendo que el automóvil pierda el control y sea expulsado fuera de la vía. Por lo tanto, el coeficiente de roce que actúa en esta dirección corresponde al coeficiente de roce transversal, utilizado por la BBA como coeficiente de rozamiento transversal (CRT) como índice para la resistencia al deslizamiento.

CRT es la relación entre la fuerza transversal (F_y) al neumático situado en un plano perpendicular al plano de este y el peso que actúa sobre ella (W_z).

Por otra parte, el coeficiente de fricción longitudinal determina las aceleraciones y desaceleraciones máximas que sufre un vehículo, en aquellos casos cuando sucede un frenado crítico. Este coeficiente se define como la relación entre la fuerza longitudinal (F_x) a la rueda situada en un plano vertical al plano de esta y el peso que actúa sobre ella (W_z), este se denomina coeficiente de rozamiento longitudinal (CRL) [37].

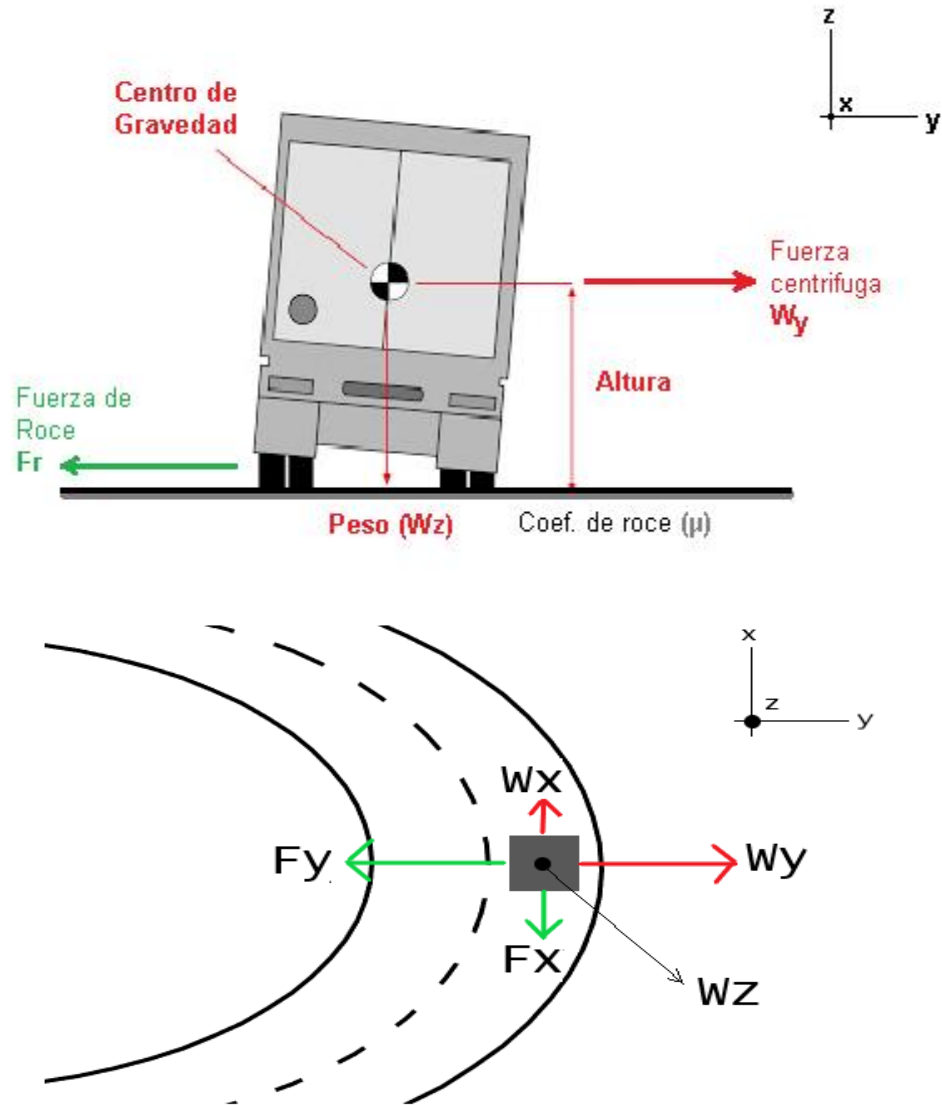


Figura 5.4- Diagrama de Fuerzas ejercidas por un Vehículo durante las Curvas.

Las condiciones más desfavorables en función de las fuerzas de fricción es cuando el pavimento se encuentra mojado o cuando la superficie ha perdido las propiedades de fricción, debido al desgaste del agregado.

En la actualidad para medir la fricción, se utiliza el índice de fricción internacional (IFI) el cual es el segundo de una larga serie de indicadores internacionales que definen el estado de una carretera. El primero corresponde al índice de regularidad superficial (IRI), el cual se instaura con el fin de estandarizar el valor de la regularidad superficial que se basa en un modelo matemático denominado "Golden Quarter Car" circulando a 80 km/hr. Mientras que el IFI se puede describir como una escala de referencia que relaciona la fricción con la velocidad al deslizamiento, el cual viene indicado por dos números expresados como (F, M); El primero de estos términos representa la fricción (F) y el segundo la macro textura (M) de la superficie. El término "F" es un número adimensional mientras que el último es un número positivo con unidades de velocidad (km/h). Con este parámetro se estiman las constantes de referencia de velocidad (S_p) y la de fricción a 60 km/h (F60) de una superficie de pavimento. El par de valores (F60 y S_p) expresan el IFI de una superficie y permiten calcular el valor de fricción, $F(S)$, a cualquier velocidad de deslizamiento (S) [38].

5.2.2. Adherencia (Neumático- Pavimento).

En el campo de la física, la adherencia es la resistencia que ejerce una superficie cuando un cuerpo trata de deslizarse sobre ella. A modo de ejemplo, si la ruta o carretera ejerce poca resistencia, la adherencia de los neumáticos de los vehículos es escasa: de este modo, los vehículos resbalan sobre el pavimento. En cambio, cuando la adherencia es buena, los neumáticos encuentran mayor resistencia y los conductores, de este modo, tienen un mejor control de los vehículos.

La adherencia entre neumático y pavimento varía según las condiciones del medio de interfase entre ambos sólidos, identificándose entre estos los siguientes estados: seco, húmedo, mojado, con nieve y con hielo u otro agente contaminante como caucho, polvo, grasas, etc. En el estado seco, la interacción se produce por contacto directo entre el neumático y el pavimento, en presencia de aire, en los casos húmedo y mojado, la interacción se produce en un ambiente en el cual el agua puede tender a desplazar el aire, produciéndose una película delgada en la interfase entre el neumático y el pavimento [39].

5.2.2.1. Adherencia en Condiciones Secas.

En condición seca, el mecanismo de adherencia se desarrolla por adhesión e histéresis. La fuerza de adhesión se genera por la atracción entre moléculas de ambas superficies en contacto, en áreas con una alta presión localizada. Debido al giro de la rueda o al deslizamiento, el enlace entre moléculas se rompe y se degenera constantemente, disipando energía y dando lugar a las fuerzas de fricción.

Por otro lado, las fuerzas generadas por el fenómeno de histéresis son debidas a la constante deformación que sufre la banda de rodadura por las irregularidades de la superficie de la carretera. Estas irregularidades tienen unas longitudes de onda que varían entre 0,5 y 50 mm con amplitudes entre 0,01 y 20 mm. Cuando se deforma la banda de rodadura, para recuperar la forma inicial, se genera una fuerza en sentido contrario a la que provoca la deformación. Toda la energía de compresión no se recupera, disipándose en forma de calor y generando las fuerzas de fricción [37]. Dichos fenómenos se pueden apreciar en la Figura 5.5.

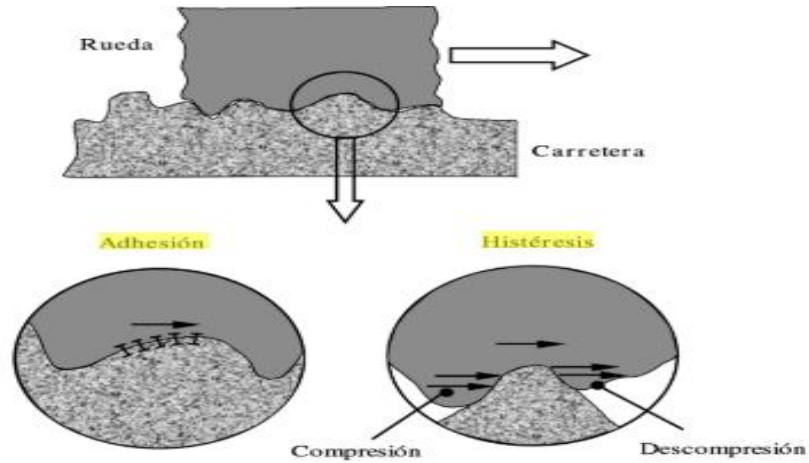


Figura 5.5- Fuerzas de Adhesión e Histéresis producidas entre la Rueda y la Superficie. Fuente [37]

Por otra parte, las propiedades superficiales de la capa de rodadura que influyen directamente en la interacción neumático-pavimento y en su adherencia son: coeficiente de rozamiento y textura superficial.

5.2.2.2. Adherencia en Condiciones Húmedas y Mojadas.

En las condiciones secas el contacto entre el neumático y el pavimento se produce en toda la superficie de huella, obteniéndose valores de adherencia elevados. Sin embargo, estas condiciones cambian cuando la carretera se encuentra mojada, disminuyendo considerablemente la adherencia

En presencia de agua, la adherencia disminuye producto de la disminución de puntos de contacto entre el neumático y el pavimento. Esto produce una pérdida de adhesión y una menor deformación por histéresis del neumático.

Cuando existen situaciones como esta, es necesario que los canales tallados sobre el neumático evacuen el agua hacia los laterales. Esta acción suele suceder a velocidades bajas, pero para las ocasiones en donde el vehículo transita a una gran velocidad, puede generarse una lámina de agua entre el neumático y el pavimento que provoca la pérdida del contacto completo entre estas dos superficies, este fenómeno se denomina “hidro planeo” [40].



Figura 5.6- Mecanismos de Pérdida de Adherencia a: 1) Velocidades Bajas, 2) Velocidades Moderadas y 3) Altas Velocidades. Fuente [40].

Es preciso señalar que los mecanismos por el cual se produce la pérdida de adherencia se explican a través del concepto de las tres zonas que se muestran en la Figura 5.6 caracterizadas por la cantidad de agua que se ha logrado evacuar: En la Figura 5.7 se muestran estas zonas donde la primera de ellas es la zona A, ésta se encuentra en el frontal de la huella, donde el neumático acaba de entrar en contacto con la película de agua y por tanto el volumen de agua evacuado es muy reducido.

El espesor es todavía lo suficientemente grande como para que no se produzca contacto alguno entre la rueda y el asfalto, por lo que la adherencia proporcionada por esta zona es prácticamente nula.

En la zona B el espesor de la película de agua se ha reducido lo suficiente como para que se inicie un leve contacto entre las irregularidades más prominentes del asfalto y la superficie de la banda de rodadura. Se empieza a generar fricción, pero muy lejos de los valores que proporcionaría un contacto sobre asfalto seco.

Finalmente, si la capacidad de evacuación de agua es suficiente, en la zona C de la huella se logrará un contacto franco, proporcionando un agarre cercano al que se daría sobre asfalto seco [39].



Figura 5.7- Zonas de contacto entre la Rueda y el Pavimento bajo efectos de la Velocidad. Fuente [39]

5.2.2.3. Factores que Determinan la Adherencia.

Los principales factores que determinan la adherencia, los espesores de agua aspirada y la posibilidad de desplazar el aire en la zona de contacto son:

- La textura del pavimento (micro textura y macro textura).
- Las características del neumático (presión, naturaleza del caucho, forma del dibujo de los canales tallados, superficie de contacto).
- Espesor de la película de agua presente en el pavimento.

- La carga que soporta el neumático y que transmite hacia los puntos de contacto con el pavimento.

Textura superficial del pavimento:

La **micro textura** o asperezas corresponden a la geometría de los agregados presentes en la superficie del pavimento. Es importante para la adherencia entre el neumático y el pavimento y, por lo tanto, para la resistencia al deslizamiento, por lo que la micro textura influye en el riesgo de accidente para todas las velocidades de circulación. Esta textura, debido a la dureza que presenta, proporciona que los áridos presenten menor desgaste o mayor resistencia al pulimento.

Por otra parte, la **macro textura** corresponde a la altura media existente entre la superficie expuesta del árido y la matriz que está inserto, es decir, refiere al relieve de la capa de rodadura y depende de la composición de la mezcla, lechada asfáltica o del tratamiento sobre la superficie dada. Esta es necesaria para una adecuada resistencia al deslizamiento a velocidades medias y elevadas (superiores a 60 Km/hr) en pavimentos mojados, debido a que evita la incidencia de accidentes por efecto de hidro planeo; Además, proporciona los intersticios necesarios para el escurrimiento del agua por el pavimento [38].

Además, la macro textura, al proveer una buena capacidad de drenaje superficial de las aguas lluvias, mejora la visibilidad de la demarcación y reduce la pérdida de visibilidad por el efecto spray, que se genera debido al levantamiento de aguas pulverizadas, generado por el vehículo que lo precede o que adelanta.

En la Figura 5.8 se aprecia un esquema sobre la micro y macro textura.

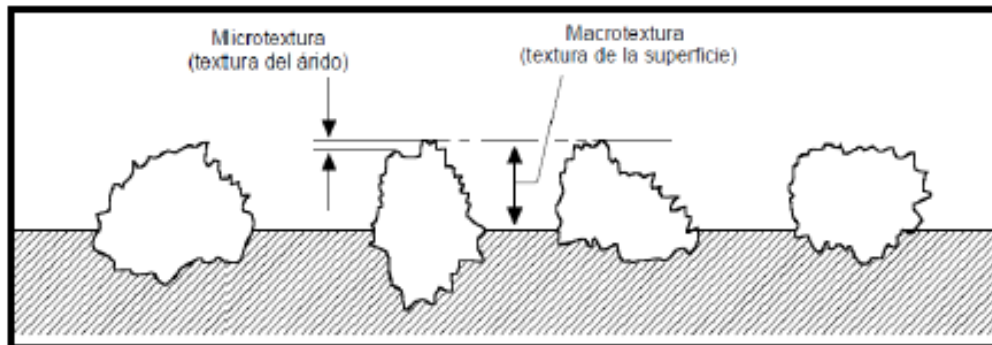


Figura 5.8- Micro textura y Macro textura de los Áridos Aplicados en Pavimentos. Fuente “MC- Volumen 6”

En ocasiones es necesario realizar una distinción entre macro textura positiva y la macro textura negativa. La primera es usual, típica de mezclas bituminosas y de tratamientos superficiales tanto convencionales como el sello de alta fricción. La segunda referida a la macro textura negativa se encuentran los pavimentos rocosos. Una diferencia entre estos dos tipos de macro textura es el ruido de rodadura que generan según las dimensiones de las irregularidades.

Cotidianamente, los caminos presentan diferentes tipos de superficie, dependiendo del tipo de agregado aplicado o el tiempo de uso. Estas superficies contienen una combinación entre macro textura y micro textura, y que influye directamente con la resistencia al deslizamiento a cualquier velocidad que transite un vehículo. En la Figura 5.9 se aprecian las diferentes combinaciones y su respectiva resistencia al deslizamiento, mientras que en la Figura 5.10 se aprecia la forma de estas superficies en sitio.

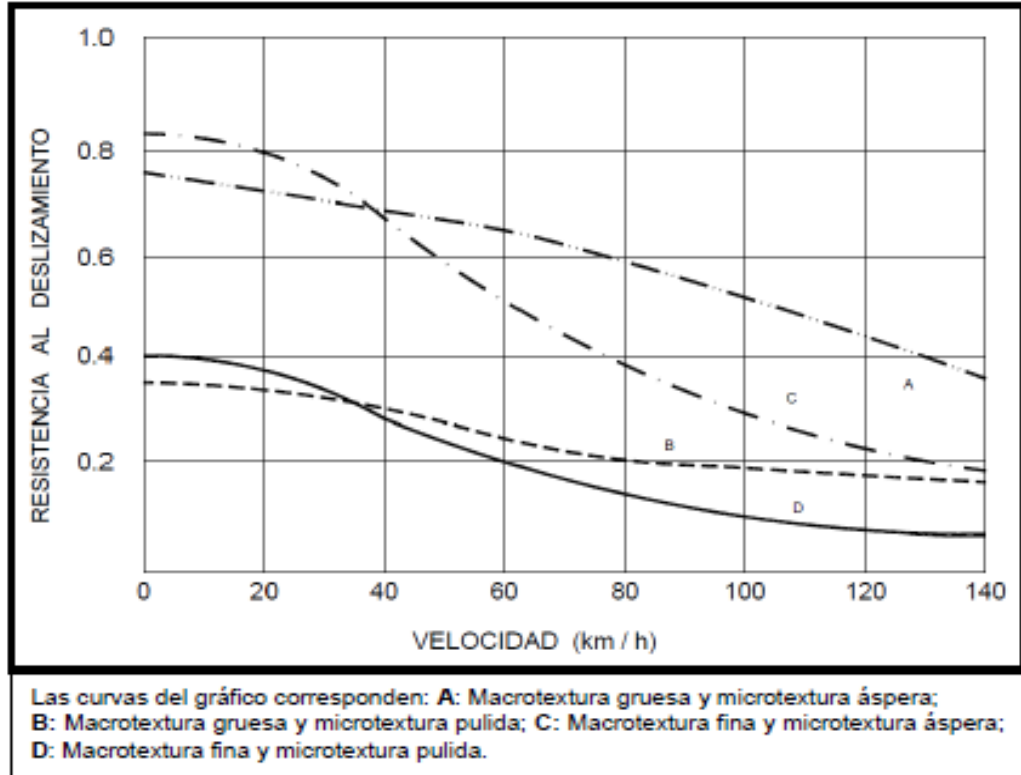


Figura 5.9- Resistencia al Deslizamiento vs Velocidad de Circulación de distintas Combinaciones de Textura. Fuente [38].

COMBINACIONES	IMAGEN	MACRO	MICRO
A		Gruesa	Áspera
B		Gruesa	Pulida
C		Fina	Áspera
D		Fina	Pulida

Figura 5.10- Combinaciones de Micro Textura y Macro Textura de una Superficie [41].

Pulimento y Abrasión:

El sello de alta fricción que se implemente sobre la superficie de los pavimentos debe contener un agregado con una alta resistencia al pulimento y abrasión. El pulimento del árido se aprecia en la micro textura, mientras que la abrasión se debe a la acción del tráfico y se manifiesta como la pérdida másica de la macro textura.

El pulido, es el efecto causado por la repetición de cargas de tránsito. Cuando el agregado aplicado en la mezcla de los SSAF se vuelve suave al tacto, la adherencia de este con los neumáticos del vehículo se reduce considerablemente. Cuando la porción de agregado que esta sobre la superficie es pequeña, la textura del pavimento no contribuye de manera significativa a reducir la velocidad del vehículo, produciendo pérdidas de control.

Cabe destacar que la presencia de partículas finas sobre la superficie contribuye a la abrasión de los agregados. El tamaño de estas partículas puede producir un pulimento "general", el cual tiende a redondear los agregados y un pulimento "diferencial", que tiende a esculpir las caras de estos mismos. Este fenómeno se aprecia en la Figura 5.11, sobre superficies de asfalto y hormigón.

La abrasión, es producida cuando dos superficies están en contacto y movimiento relativo, en este contacto una de las dos superficies resulta más dañada, ya sea por las propiedades del material o por las condiciones superficiales, también se puede deber a causa de la velocidad de contacto, medio ambiente y tipo de carga. Dicho de otra manera, la abrasión es generada por las partículas duras que se introducen entre dos superficies más blandas, que se deslizan e interactúan mutuamente. Las partículas abrasivas pueden ser las propias asperezas de la superficie o bien el producto del desgaste de estas, que tienden a producir esfuerzos de corte en la superficie causando deformación plástica [42].

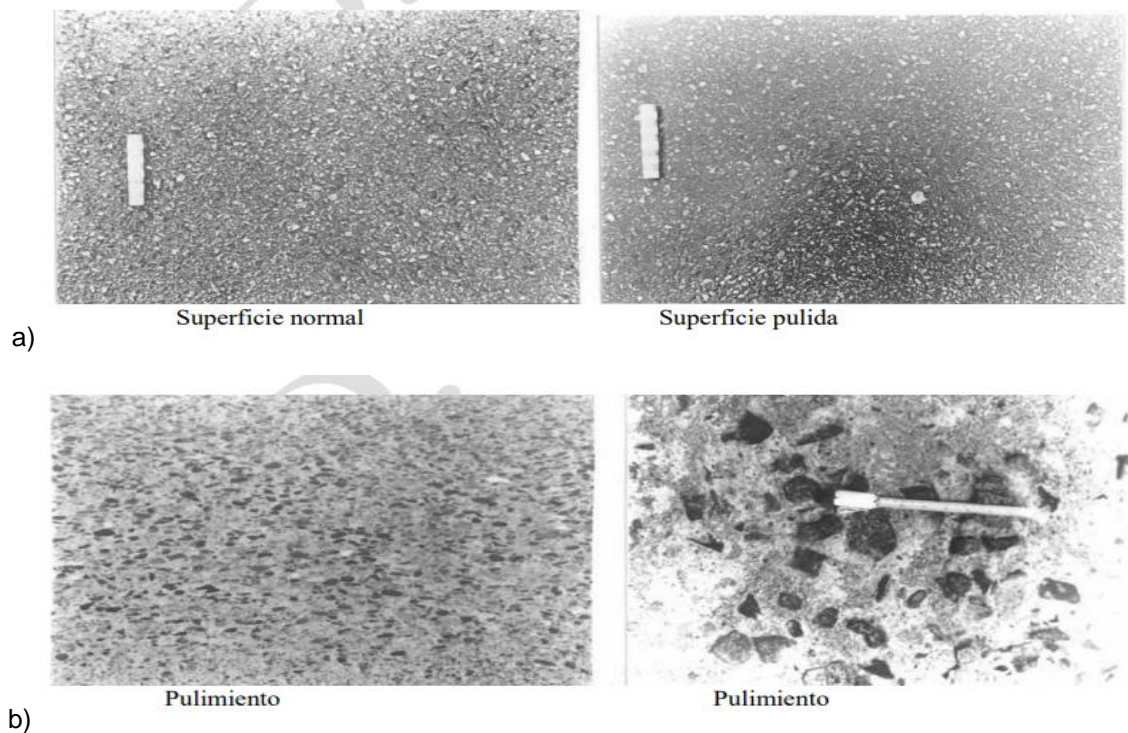


Figura 5.11- a) Ejemplo de una Superficie Pulida de Asfalto, b) Ejemplo de una Superficie Pulida de Hormigón. Fuente [43].

5.3. Desempeño de los SSAF Utilizando Bauxita Calcinada.

En esta sección se mostrará el desempeño de los sellos de alta fricción que utilizan bauxita calcinada como agregado pétreo. Las bauxitas calcinadas empleadas en las muestras equivalen a la bauxita calcinada gris de China, bauxita calcinada pulida de China y bauxita calcinada de Guyana, cuyas propiedades se muestran en la Tabla 5.8.

Las placas que se utilizan como muestra y que simulan las condiciones del pavimento, fueron creadas a partir del British Board of Agrément, Apéndice E [5]. En el estudio [7] se muestra el procedimiento llevado a cabo para distintos especímenes, dentro de estos se pueden encontrar mezclas de sellos de alta fricción con 100% de bauxita calcinada, otros con una mezcla entre bauxita calcinada y un árido natural y mezclas con 100% de agregado natural.

Estas placas creadas para pruebas de laboratorio fueron sometidas a un tránsito simulado en una plataforma giratoria conocida como “The wear simulator Turntable”, donde se obtuvieron los resultados de la resistencia al deslizamiento y profundidad de textura para distintos valores de pasos de rueda en las diferentes muestras.

Esta sección se enfocará solo en los resultados obtenidos en el estudio [7] para mezclas de sellos de alta fricción que utilizaron bauxita calcinada de distintas partes del mundo, de manera que sirva como un indicativo de los parámetros que se usaran más adelante.

Características de las bauxitas calcinadas:

Tabla 5.8- Características de las BC provenientes de China y Guyana. Adaptación Fuente [4].

Tipo de agregado	PSV	AAV	Densidad de partículas: secado al horno [kg/m ³]	Absorción de agua [%]
Bauxita calcinada pulida (China)	>70	<4	2629	6,8
Bauxita calcinada Gris (China)	>70	<4	3314	1,4
Bauxita calcinada Gris (Guyana)	>70	<4	3490	2,3

Siendo

PSV: Valor de piedra pulida, (como se define en BS EN 1097-8: 2009).

AAV: Valor agregado de abrasión (como se define en BS EN 1097-8: 2009)

El desempeño mostrado por aquellas muestras que contenían el 100% de bauxita calcinada sobresalieron por sobre las muestras que contenían el 100% del agregado natural y combinaciones de estos.

Los sellos de alta fricción creados a partir de estos tres tipos de agregados fueron sometidos al paso de rueda establecido según [5] para muestras de laboratorio “Tipo 1”, y para cada intervalo se realizaron ensayos con el instrumento del péndulo británico, para luego determinar la resistencia al deslizamiento y profundidad de textura.

Los resultados obtenidos de los tres experimentos realizados en el documento “High Friction Surfacing Systems Using Blends of Natural Aggregate and Calcined Bauxite” [7] se muestran en las Figuras 5.12 y 5.13.

Experimento 1: Mezcla Aplicada en frío para 100 mil pasos de rueda (Universidad de Ulster)

Las muestras ensayadas por la Universidad de Ulster aplicadas en frío (termo endurecimiento) arrojaron valores superiores a los requeridos por la junta británica (BBA). Para las mezclas hechas con Bauxita calcinada de Guyana y China se obtuvieron resultados de 90 y 75 PTV respectivamente, tal como se aprecia en la Figura 5.12. En el caso de la profundidad de textura los valores finales se muestran en la Figura 5.13, estos fueron 1,8 y 1,7. Los valores del experimento 1 se aprecian en el Anexo A.5.

- **Resistencia al Deslizamiento.**

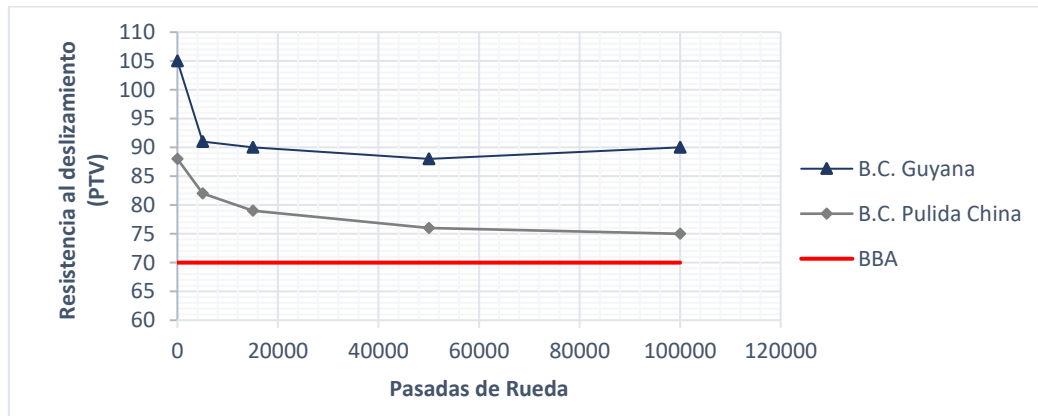


Figura 5.12- Resistencia al Deslizamiento vs Pasos de Rueda del Experimento 1.

- **Profundidad de Textura.**

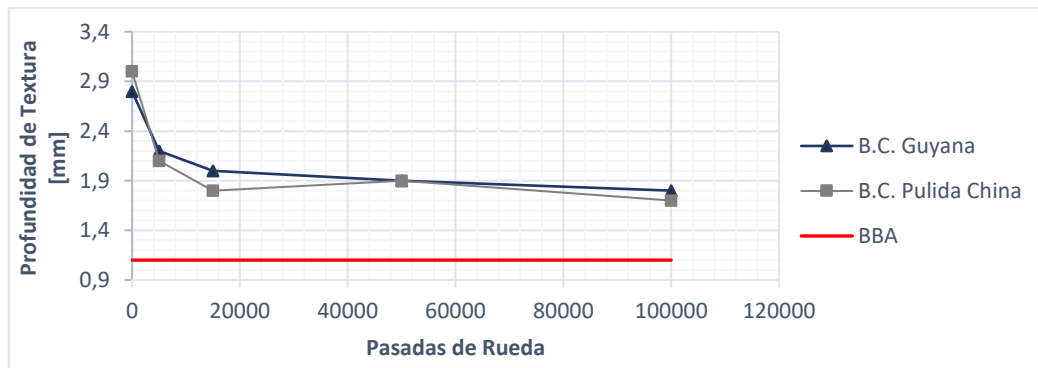


Figura 5.13- Profundidad de Textura vs Pasos de Rueda del Experimento 1.

Experimento 2: Mezcla aplicada en caliente para 100 mil pasos de rueda (Universidad de Ulster)

Las muestras aplicadas en caliente presentaron resultados por sobre los 70 PTV y sobre 1,1 mm para la resistencia al deslizamiento y profundidad de textura respectivamente, tal como se observa en las Figuras 5.14 y 5.15. Inicialmente los valores de resistencia al deslizamiento de la B.C gris China es inferior a la cifra establecida por norma, esto se debe al exceso de agregado de bauxita calcinada, sin embargo, mientras procede el ensayo este exceso se elimina y a partir de los mil pasos de rueda la resistencia adquiere valores representativos. Los valores del experimento 2 se aprecian en el Anexo B.5.

- **Resistencia al Deslizamiento.**

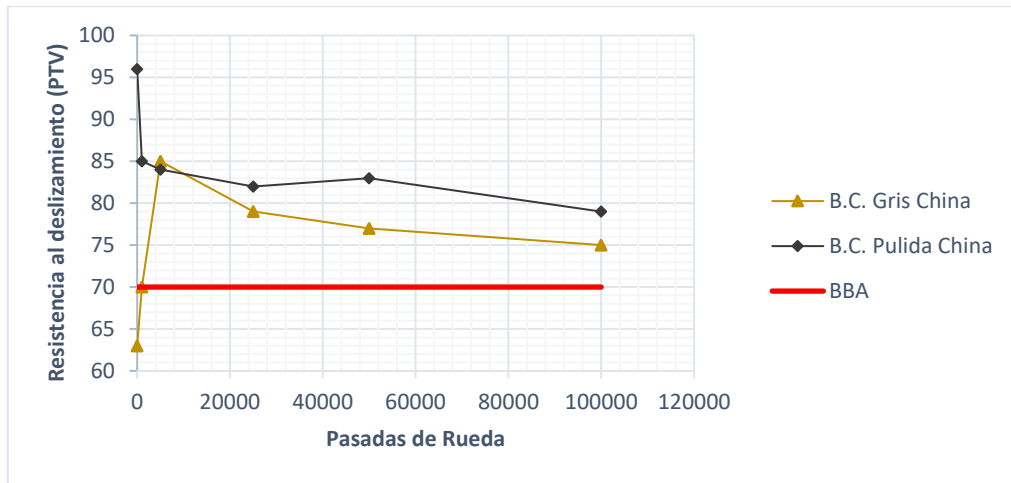


Figura 5.14- Resistencia al Deslizamiento vs Pasos de Rueda del Experimento 2.

- **Profundidad de Textura.**

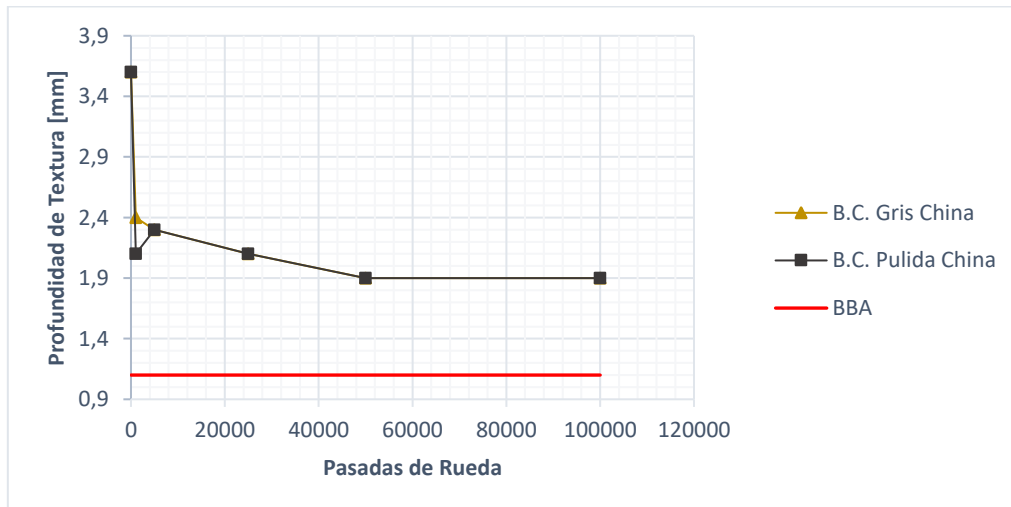


Figura 5.15- Profundidad de Textura vs Pasos de Rueda del Experimento 2.

Experimento 3: Mezclas aplicadas en frío para 1,5 millones de paso de rueda.

Para determinar la resistencia al deslizamiento y profundidad de textura, se sometieron las muestras a condiciones húmedas del pavimento y a 1,5 millones de pasos de ruedas. Finalizados los ensayos los resultados mostraron que la resistencia al deslizamiento en ambas mezclas es superior a los requeridos por la BBA, mientras que en la textura de estas placas se mantuvo por sobre los 1,1 [mm], siendo el valor final de ambas de 1,3 [mm], el comportamiento de estos especímenes se muestra en las Figuras 5.16 y 5.17 y los valores numéricos del experimento 3 se aprecian en el Anexo C.5.

- **Resistencia al Deslizamiento.**

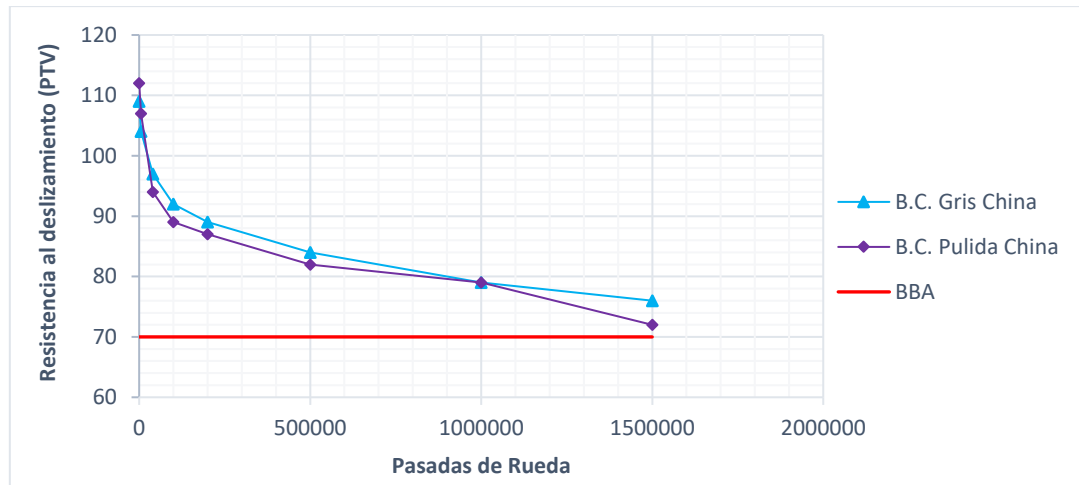


Figura 5.16- Resistencia al Deslizamiento vs Pasos de Rueda del Experimento 3.

- **Profundidad de Textura.**

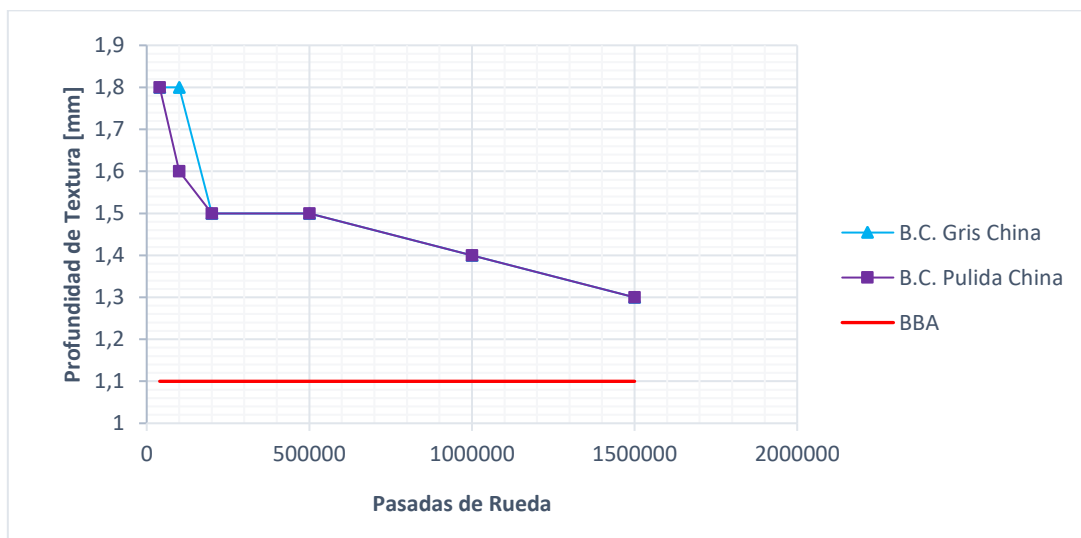


Figura 5.17- Profundidad de Textura vs Pasos de Rueda del Experimento 3.

5.4. Usos Nacionales e Internacionales de los SSAF

5.4.1. Usos Históricos.

Los SSAF se aplicaron por primera vez en el Reino Unido durante los años 60. El Gobierno británico había comenzado a abordar de manera proactiva los accidentes por derrape que se producían en los "puntos críticos" y había descubierto que el agregado del pavimento en esos lugares se había pulido. Las investigaciones demostraron que las pequeñas virutas de bauxita calcinada eran muy resistentes al pulido y podían aplicarse a la superficie de un pavimento existente utilizando un aglutinante de resina epoxídica. El éxito de un período de prueba cerca de Londres llevó a utilizar el tratamiento para reducir los choques en los puntos críticos situados en las curvas, rotondas e intersecciones. Como resultado de los exitosos programas de seguridad en el Reino Unido, en los que los SSAF juegan un papel importante, las muertes por accidentes de tráfico han disminuido sustancial y consistentemente desde los años 60. Los SSAF son ahora obligatorio en ciertas curvas, rotondas y enfoques de intersección [44].

5.4.2. Usos Modernos.

Después del éxito en el Reino Unido, los SSAF comenzaron a aplicarse en el extranjero. Fue así como en los Estados Unidos se informó sobre los beneficios del agregado de bauxita calcinada con resina epoxídica en 1976, lo que disminuyó en un 31% los choques en las intersecciones donde se aplicaron los SSAF [45].

Algunas aplicaciones de los SSAF a nivel internacional son:

- Cerca de Fort Lauderdale (Florida), el Departamento de Transporte aplicó un SSAF en 2006 en una sección de 300 pies (92 metros) de un circuito interestatal que había experimentado doce choques en un período de 3 años (un promedio de cuatro por año). En el año siguiente después de la aplicación del SSAF se informó una reducción del 50% (dos choques al año siguiente) [44].
- En Nueva Zelanda, se aplicó un SSAF en 1997 a una curva en la que se habían observado 173 choques en un período de 7 años. Durante el siguiente período de 7 años sólo se observaron 11 choques (una reducción del 94%) [46].
- En Bellevue (Washington), se aplicó un SSAF en 2004 en una intersección señalizada donde existe una pendiente y una curva pronunciadas. Durante los 5 años anteriores al período, 21 accidentes fueron observado; durante los siguientes 4 años sólo se observaron dos choques [44].

5.4.3. Usos en Chile.

Los diseños de las curvas en Chile suelen ser tan conservadoras que las salidas de carril o los choques no deberían ser tan frecuentes. Desafortunadamente, hay una serie de factores que pueden estar presentes simultáneamente, cuyos efectos no pueden ser considerados en el proceso de diseño. Algunos de estos efectos son: conducción distraída, juicios erróneos del conductor, malas bandas de rodadura de los neumáticos o el insuficiente mantenimiento de los vehículos, las condiciones del pavimento mojado y la textura deteriorada del pavimento.

En las aproximaciones a las curvas, algunos conductores pueden no responder adecuadamente a las señales de advertencia antes de una curva. La repentina desaceleración justo antes de la curva puede necesitar un grado más elevado de fricción que la que proporciona la carretera, particularmente durante las inclemencias del tiempo (lluvias, nieves) [47].

Aumentando la fricción del pavimento mediante un tratamiento sobre la superficie, la carretera o camino pueden proporcionar suficiente fricción para que las situaciones de peligro se reduzcan. Empresas encargadas del rubro en Chile ofrecen diferentes variedades de SSAF, cuyas características dependen de los sectores donde sean aplicados y teniendo como principal objetivo aumentar la adherencia entre los neumáticos y el pavimento. En la Figura 5.18 se logra apreciar la aplicabilidad de los SSAF comparándolos con un pavimento asfáltico sin SAF bajo condiciones secas y mojadas.

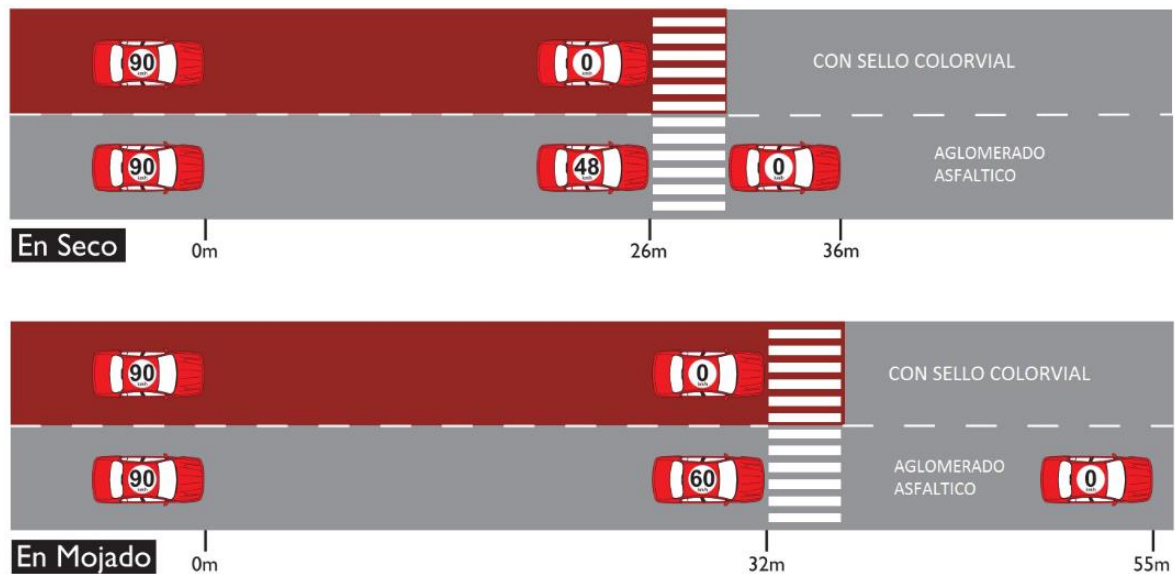


Figura 5.18- Distancias de Frenado y Velocidad de Impacto de un Automóvil con ABS a 90 Km/hr. Fuente ColorVial.

“Colorvial Chile” es una de las empresas que se dedica a aplicar sellos de alta fricción. “A enero del 2019 ha aplicado un total de 110.000 metros cuadrados del Sello Superficial de Alta Fricción en el territorio nacional, desde Iquique por el Norte hasta Puerto Natales en el Sur, tanto sobre pavimentos de asfalto como de hormigón” [32].

Algunas de las aplicaciones más importantes realizadas por Color Vial y otras empresas dedicadas al rubro a nivel nacional se presentan en la Figura 5.19.



Figura 5.19- A) Camino "La Pólvara", Valparaíso. B) Avenida Borgoño, Viña del Mar. C) Cruces Peatonales, Quilpué. D) Plaza de Peajes, Ruta 68.

6. Capítulo VI

6.1. Caracterización de la Bauxita Calcinada, Árido del Aconcagua y Escoria de Cobre como Agregados Pétreos para SSAF.

Este Capítulo se enfocará principalmente en la caracterización de los agregados que se emplearán en la confección de sellos de alta fricción, con el objetivo de presentar aquellos parámetros físicos necesarios para un buen desempeño. Para realizar esta caracterización, los agregados pétreos serán sometidos a diferentes ensayos, de los cuales se determinará las densidades reales, netas, y aparente suelta, además se obtendrán los porcentajes de absorción y aquellos parámetros relacionados con el desgaste.

6.1.1. Granulometría y Bandas de trabajo.

La granulometría es el estudio de la distribución porcentual de los tamaños de partículas que conforman un agregado pétreo. Para lograr distribuirlos se requiere de un análisis mediante tamices con aberturas definidas y según la banda de trabajo a evaluar. El procedimiento consiste en registrar los datos de la granulometría en función de los pesos retenidos, porcentajes retenidos, porcentajes acumulados retenidos y porcentajes acumulados que logran pasar por cada tamiz.

Los sellos de alta fricción se caracterizan por utilizar un árido con una granulometría específica y que corresponde a valores aproximadamente de 1 a 3.5 milímetros, esta condición impulsa a que cualquier agregado pétreo utilizado como alternativa de la bauxita calcinada deba cumplir con la granulometría requerida. Por lo tanto, es preciso decir que para los SSAF existe una banda de trabajo definida [48].

Teniendo en consideración lo antes mencionado, se confeccionarán las muestras de escoria de cobre y de árido del Aconcagua (gravilla fina) según la distribución granulométrica de la muestra de bauxita calcinada, la cual posee partículas ya definidas por defecto. La distribución granulométrica de este agregado luego de cuartear en cuatro ocasiones una muestra de 9000 [g] se presenta en la Tabla 6.1 y la Figura 6.1.

Tabla 6.1- Granulometría de la Bauxita Calcinada.

Material: <i>Bauxita Calcinada</i>				
Masa Inicial: 638,5 [gramos]				
NCh [mm]	ASTM	Peso Retenido [gramos]	Retenido Acumulado [%]	Pasa Acumulado [%]
10	3/8"	0	0%	100%
6,3	1/4"	0	0%	100%
5	N°4	0	0%	100%
2,5	N°8	180,9	28%	72%
1,25	N°16	430,6	67%	4%
0,63	N°30	26,8	4%	0%
0,315	N°50	0,2	0%	0%

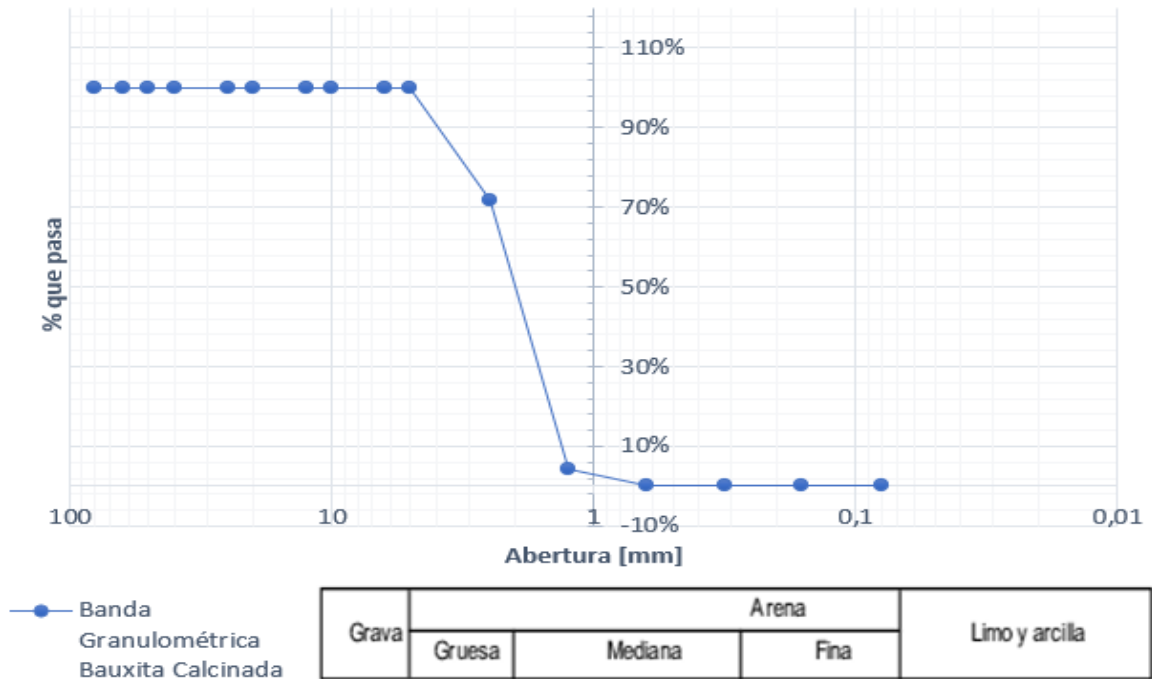


Figura 6.1- Banda Granulométrica completa de la Bauxita Calcinada obtenida en Laboratorio.

De la Figura 6.1 se puede apreciar que la muestra de bauxita calcinada luego de ser tamizada por las mallas 3/8", 1/4", N°4, N°8, N°16, N°30 y N°50, presenta un agregado de características arenosas, donde el 28 % de la muestra retenida en el tamiz N°8 se considera arena gruesa mientras que el resto que pasa se califica como arena de partículas medianas.

La Tabla presente en el Anexo A.6 muestra la clasificación de los suelos según: SUCS, AASHTO, ASTM y BS. Estas clasificaciones catalogan la granulometría de la bauxita calcinada como:

- **SUCS:** Agregados entre 4,75 – 2 mm (arenas gruesas); agregado entre 2 – 0,425 (arenas de tamaño mediano).
- **AASHTO:** Agregados entre 4,75 – 2 mm (gravas muy finas); agregado entre 2 – 0,425 (Arenas gruesas).
- **ASTM:** Agregados entre 4,75 – 2 mm (arenas gruesas); agregado entre 2 – 0,425 (arenas de tamaño mediano).
- **BS:** Agregados entre 4,75 – 2 mm (gravas finas); agregado entre 2 – 0,425 (arenas gruesas)

Posterior a la distribución y clasificación de la muestra de bauxita, se procede a confeccionar el porcentaje de material requerido para las demás muestras (escoria de cobre y árido del Aconcagua), con el propósito de poseer tres tipos diferentes de agregado, pero con la misma proporción de partículas y de esta manera conseguir resultados representativos para los ensayos que se realizarán más adelante.

6.1.2. Densidad Real, Neta y Absorción de Agua.

- **Pétreos Gruesos.**

Se entiende como pétreo grueso al material retenido en el tamiz N°4 (5 mm) y en el tamiz N°8 (25 mm) para los casos de hormigones y asfaltos respectivamente. Para los agregados gruesos el método para determinar las densidades reales, netas y la absorción es diferente a lo utilizado en agregados finos pues poseen material bajo los tamices N°4 y N°8.

La densidad corresponde al cociente entre la masa y el volumen del material, y corresponde a una propiedad física de las partículas. Esta propiedad es real cuando considera el volumen macizo de las partículas, más el volumen de poros accesibles e inaccesibles, de este modo la densidad real del pétreo seco es cuando se considera al agregado en estado seco y la densidad real saturada superficialmente seca considera esta misma masa del pétreo seco más la masa del agua que llena los poros accesibles.

La densidad neta, por otro lado, considera el volumen macizo del pétreo más el volumen de los poros inaccesibles. Por naturaleza de las partículas, estas presentan poros saturables e insaturables, esta característica permitirá determinar la cantidad de líquido que logra absorber dichos materiales a estudiar.

Para determinar las densidades reales, netas y absorción de agua se emplea el método especificado en el Capítulo 8.202.20 del Manual de Carreteras Volumen 8, y para los cálculos se utilizarán las ecuaciones 6.1, 6.2, 6.3 y 6.4.

- **Densidad Real Saturada Superficialmente Seca:**

$$\rho_{RT} = \frac{M_{SSS}}{(M_{SSS} - M_{sum})} * 1000 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \quad (Ec. 6.1)$$

- **Densidad Real Seca:**

$$\rho_{rs} = \frac{M_s}{(M_{SSS} - M_{sum})} * 1000 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \quad (Ec. 6.2)$$

- **Densidad Neta:**

$$\rho_N = \frac{M_s}{(M_s - M_{sum})} * 1000 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \quad (Ec. 6.3)$$

- **Absorción de agua:**

$$\alpha = \frac{M_{SSS} - M_s}{M_s} * 100 [\%] \quad (Ec. 6.4)$$

- M_{SSS} : Masa saturada superficialmente seca (g)
- M_s : Masa seca (g)
- M_{sum} : Masa sumergida (g)
- ρ_{RT} : Densidad real saturada superficialmente seca (kg/m^3)
- ρ_{rs} : Densidad real Seca (kg/m^3)
- ρ_N : Densidad neta (kg/m^3)
- α : Absorción de agua (%)

El Anexo B6.1 muestran los resultados obtenidos del ensayo de densidades reales, netas y absorción para muestras de agregado pétreo "grosso", donde se comparan los valores de la escoria de cobre con los otros dos agregados. Se observa que debido a la naturaleza de la escoria y a sus procesos pirometalúrgicos, este material presenta unas densidades elevadas en comparación con la bauxita calcinada y al árido del Aconcagua. Dichos valores de densidades presentes en la escoria de cobre difieren entre un 13-14% por sobre los obtenidos en la bauxita calcinada, y entre un 40-45 % con respecto al árido del Aconcagua, además la escoria de cobre arrojó una absorción del 0,4%, resultado 30% menor que lo entregado por las muestras de bauxita y 78% inferior a lo obtenido por el árido del Aconcagua.

La Figura 6.2 entrega una visualización general de los valores obtenidos de las densidades reales y netas de los agregados gruesos, para la bauxita, escoria de cobre y árido del Aconcagua (gravilla), estos resultados equivalen al promedio de dos muestras de masa aproximadamente iguales.

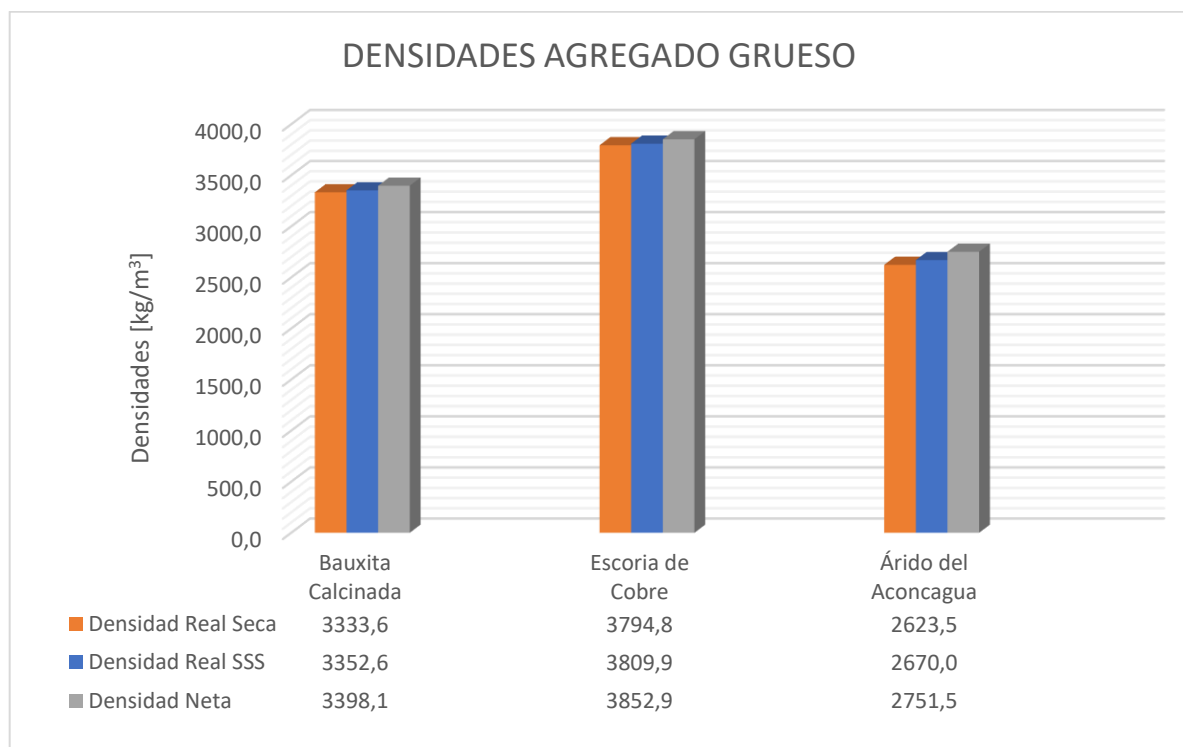


Figura 6.2- Densidades Reales y Netas de los Agregados Pétreos "Gruesos".

- **Pétreos Finos.**

Un pétreo fino es aquel material que pasa el tamiz de 5 mm para hormigones y de 2,5 mm para asfaltos. Teniendo presente esta consideración, los futuros ensayos estarán pensados para asfalto, lo que indica inmediatamente que el tamiz de referencia para separar un material fino de uno grueso es el N°8 (2,5 mm).

La granulometría del agregado utilizado como referencia (bauxita calcinada) posee un 28% de material sobre el tamiz 2,5 mm, esto indica que las muestras serán consideradas como un integral y se deberán determinar las densidades reales, netas y absorción mediante métodos diferentes y que corresponden a los descritos en las secciones 8.202.20 y 8.202.21 del Volumen 8 del Manual de Carreteras.

El procedimiento para determinar las densidades reales, netas y absorción de las partículas finas presentes en las tres muestras ensayadas se detallan en los siguientes pasos:

- Cubrir las muestras de aproximadamente 50-500 gramos con el mínimo de agua para asegurar su saturación por un periodo de 24 horas.
- Eliminar paulatinamente el exceso de agua, revolviendo frecuentemente la muestra.
- Colocar un molde cónico sobre una superficie firme, lisa y plana. Llenar el molde y golpear suavemente con un pisón a una altura de 5 mm aproximadamente.
- Apenas se alcance la condición de saturado superficialmente seco (al retirar el molde, el agregado debe caer suave según su talud natural) se registra la masa de la muestra (M_{ss}).
- Luego esta muestra se coloca en un matraz y se llena de agua, eliminando las burbujas de aire.
- Dejar depositar por una 1 hora, para posteriormente llenar con agua hasta la marca de calibración y registrar la masa del matraz más muestra y agua (M_m).
- Sacar la muestra del matraz y dejar secar en un horno a 110±5 °C. Registrar la masa seca (M_s).
- Registrar la masa del matraz más agua (M_a).

La Figura 6.3 presenta los valores obtenidos del ensayo descrito en la sección 8.202.21 del Volumen 8 del Manual de Carreteras. Estos resultados presentan una tendencia muy similar al ensayo realizado para agregados grueso, puesto que las mayores densidades pertenecen a la escoria de cobre, seguidos por la bauxita calcinada y finalizando con el árido del Aconcagua. Este último árido al ser de origen natural (material depositado en los lechos fluviales) presentó densidades con valores entre 2500-2700 [kg/m³], esta diferencia con los otros dos agregados se debe a que la naturaleza de estos se define por procesos químicos y metalúrgicos, los que generan materiales con densidades elevadas por sobre los 3000 [kg/m³].

Por otro lado, el ensayo realizado para las muestras de material fino, arroja porcentajes de absorción diferentes para cada agregado, siendo la escoria de cobre el agregado con menor porcentaje, con un valor de 0,4%, siendo este un 60% menor que el porcentaje de absorción presentado por la bauxita calcinada y un 79% menor que la absorción del árido del Aconcagua.

Los principales resultados se presentan en la Figura 6.3, donde se puede apreciar aquellos valores de la escoria de cobre. Para visualizar con mayor detalle el procedimiento y resultados de este ensayo, véase el Anexo B6.2.

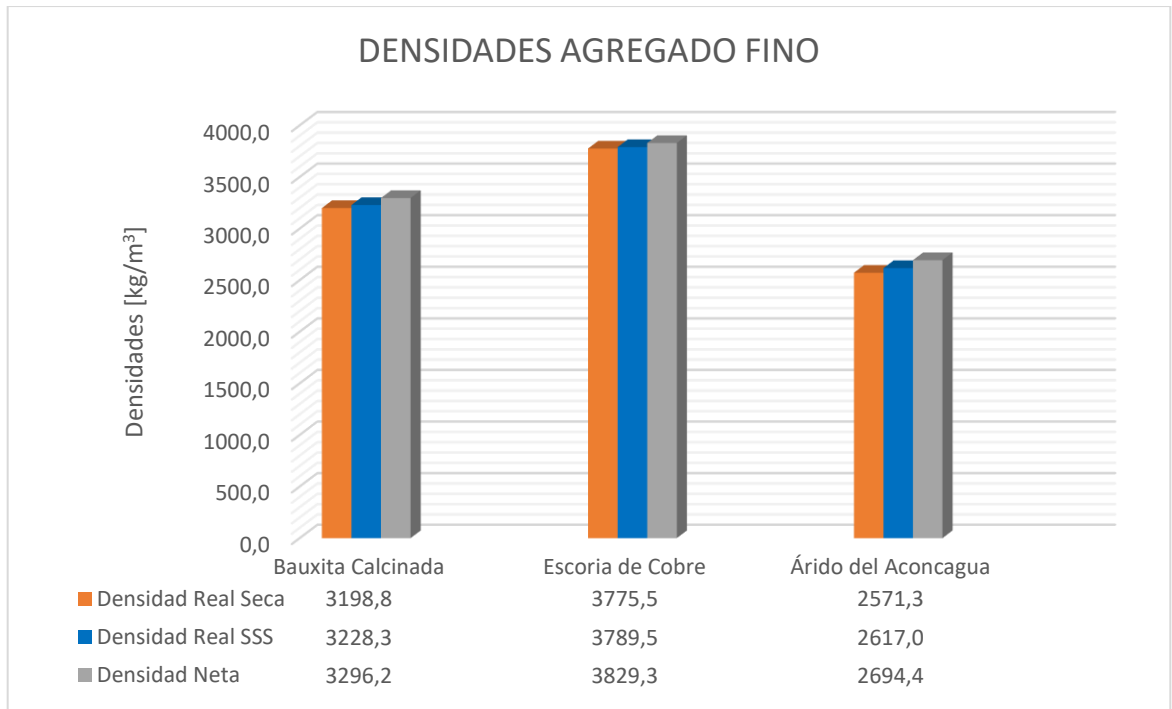


Figura 6.3- Densidades Reales y Netas del Agregado Pétreo "Fino".

- **Agregado Integral.**

Anteriormente, se mencionó que, al momento de realizar el ensayo de densidades reales, netas y absorción para agregados finos, el porcentaje de material retenido sobre el tamiz N°8 debiese haber sido inferior a 15%, sin embargo, el material de referencia (bauxita calcinada) presentaba un 28% de material retenido sobre el tamiz N°8, por lo que se debió realizar dos ensayos, uno para materiales finos y otro para gruesos, clasificando a las muestras como agregados integrales [4].

El Procedimiento llevado a cabo para determinar las densidades reales, netas y absorción para estos agregados integrales consistió en determinar el promedio de los resultados de ambos ensayos. Los resultados finales se presentan en la Tabla 6.2.

Tabla 6.2- Densidades Reales, Netas y Absorción de los Agregados Pétreos Integrales.

Densidades promedias de agregados integrales	Densidad real SSS [kg/m ³]	Densidad real S [kg/m ³]	Densidad neta [kg/m ³]	Absorción [%]
Escoria de cobre	3799,71	3785,14	3841,11	0,38
Bauxita calcinada	3290,45	3266,18	3347,12	0,75
Árido del Aconcagua	2643,50	2597,41	2722,93	1,77

6.1.3. Densidad Aparente.

La densidad aparente suelta, es un parámetro útil para labores realizadas en terreno, pues permite calcular los volúmenes de áridos para el transporte de camiones o acopio. Con estos valores se logra obtener el porcentaje de huecos, necesario para el método de dosificación de la dimensión mínima promedio.

El procedimiento utilizado para determinar la densidad aparente de los agregados empleados en este documento se desarrolló según lo estipulado por el ensayo 8.202.19 del Volumen 8 del Manual de Carreteras, este consiste en un cilindro de volumen definido por el cual se vierte el material de una pala o poruña desde una altura de 50 mm, en forma circular, preocupándose de depositar los materiales uniformemente. Posterior al llenado de este recipiente, se enrasa y se registra la masa.

- **Suelta.**

La densidad aparente suelta se aplica a los áridos de tamaño máximo nominal igual o inferior a 100 [mm]. El procedimiento también es aplicable a las arenas en estado húmedo; en este caso, se debe indicar el contenido de humedad del árido expresado como porcentaje de la masa del árido seco, frecuentemente los ensayos se realizan con material seco. En la Tabla 6.3 se indican las cantidades utilizadas de agregados para este ensayo.

De la Tabla 6.4, se aprecia que el material pirometalúrgico denominado “escoria de cobre” arroja densidades aparentes suelta de aproximadamente 2100 kg/m³, siendo este un 14% más que el agregado utilizado para los SSAF (bauxita calcinada), y un 45,2% más que los áridos del Aconcagua. El detalle del procedimiento se muestra en el Anexo C.6.

Tabla 6.3- Cantidades de agregados utilizadas en el ensayo.

Volumen recipiente	[m ³]	3,003	
Peso recipiente	[g]	3534	
Masa suelta escoria de cobre	[g]	9890	9820
Masa suelta bauxita calcinada	[g]	9086	9076
Masa suelta árido Aconcagua	[g]	7905	7870

Tabla 6.4- Resultados promedios de la Densidad Aparente Suelta de los tres Agregados.

Agregado	Densidad aparente suelta [kg/m³]		
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra promedio
Escoria de cobre	2116,6	2093,2	2104,9
Bauxita calcinada	1848,8	1845,5	1847,2
Árido Aconcagua	1455,5	1443,9	1449,7

6.1.4. Índice de Lajas.

Este ensaye corresponde al porcentaje de peso de partículas que tiene un diámetro o espesor inferior a 0,6 veces la dimensión media de la fracción del agregado considerado. Este índice es empleado para agregados utilizados en tratamiento superficiales y es aplicable a áridos cuyo tamaño máximo absoluto sea igual o superior a 6,3 mm (ASTM: Tamiz 3/8). Los valores que se obtienen forman parte de la fórmula de dosificación según el método de la dimensión mínima promedio.

Al poner énfasis en la granulometría empleada y replicada en los tres agregados, es necesario destacar que el tamaño máximo de partículas utilizadas en los sellos de alta fricción se encuentra por sobre los 2,5 mm (ASTM: Tamiz N°8) y por debajo de los 5 mm (ASTM: Tamiz N°4), lo que indicaría que este ensaye no cumple con los requisitos necesarios para la fracción más pequeña.

Sin embargo, al tratarse de un estudio en donde se trabajará con emulsiones asfálticas, emulando un tratamiento superficial simple, es necesario la implementación del ensaye para determinar el índice de lajas, adaptando una de las fracciones, y calculando la abertura del pie de metro con la ecuación 6.5. Los resultados de estos cálculos se muestran en la Tabla 6.5.

$$A = 0,6 * \frac{T_s - T_i}{2} \quad (\text{Ec 6.5})$$

- A : Abertura pie de metro [mm]
Ts : Abertura tamiz superior [mm]
Ti : Abertura tamiz inferior [mm]

Tabla 6.5- Valores adaptados para la fracción en estudio.

Fracción mínima para ensaye	6,3 - 5	[mm]
Fracción Adaptada para ensaye	5 - 2,5	[mm]
Cantidad de fracciones	1	[unidad]
Abertura pie de metro	2,25	[mm]

Posterior a la adaptación de la nueva fracción, se realizó el ensaye, obteniéndose los resultados mostrados en la Tabla 6.6. Se puede observar que la escoria de cobre contiene un Índice de Lajas menor que la bauxita calcinada y superior al árido del Aconcagua. Este último agregado junto con la escoria de cobre al poseer valores bajos en comparación con la bauxita, presentan una rotura menor de sus partículas al momento de ser sometidas a la acción de cargas pesadas. Otro beneficio que otorga el contar con un valor menor de Índice de Lajas, es que resultan dosificaciones menores tanto de árido como de ligante, ya que un menor contenido de material lajeado disminuye el valor de la dimensión mínima promedio del agregado. El procedimiento del ensaye se muestra en el Anexo D.6.

Tabla 6.6- Resultados del Índice de Lajas para la fracción adaptada de los tres Agregados.

	Partículas Totales	Masa Total	Partículas pasan pie de metro	Masa Partículas que pasan	índice de lajas fracción	índice de lajas Agregado	índice de lajas Promedio
	[unidades]	[gramos]	[unidades]	[gramos]	[%]	[%]	[%]
Escoria de Cobre							
Muestra 1	102	12,4	20	1,4	11,3	11,3	11,0
Muestra2	102	12,1	18	1,3	10,7	10,7	
Bauxita Calcinada							
Muestra 1	102	5,5	39	1,4	25,5	25,5	25,2
Muestra2	102	5,6	37	1,4	25,0	25,0	
Árido Aconcagua							
Muestra 1	102	10	13	0,6	6,0	6,0	6,4
Muestra2	102	10,2	14	0,7	6,9	6,9	

6.1.5. Desgaste.

El significado de desgaste alude al acto o consecuencia de deteriorar un material lentamente debido a su utilización o por algún tipo de contacto o roce con otro material. En diversos agregados pétreos, esta definición está ligada a una de las propiedades físicas más importantes, como lo es la resistencia a la abrasión o desgaste, puesto que nos da a conocer la durabilidad y la resistencia que pueden aportar estos áridos a las estructuras a diseñar. A continuación, se evaluará esta propiedad para la escoria de cobre, el árido del Aconcagua y la bauxita calcinada, utilizando la máquina de los Ángeles y el ensayo para determinar el índice de trituración.

- **Desgaste de los Ángeles.**

El ensayo para medir el desgaste mediante la máquina los Ángeles consisten en introducir una determinada cantidad de agregado (aproximadamente 5 kilos en su totalidad) dentro de un cilindro grande de acero, junto con una cantidad de esferas de masa definidas que simulan la carga abrasiva, posteriormente se aplica un determinado número de revoluciones dependiendo del grado de la muestra. Este ensayo está definido para agregados cuya densidad ronde entre 2000 y 3000 kg/m³ y para partículas mayores a las retenidas en el tamiz N°8 (2,5 mm). Además, es importante señalar que el máximo porcentaje de desgaste según la normativa es de 25% siendo incluso 35% en caso de ser indicado en las especificaciones de algún proyecto [4].

Este ensayo se realizó para tres áridos diferentes, uno de ellos corresponde a la bauxita calcinada, agregado pétreo comúnmente utilizado para la aplicación de los sellos de alta fricción y cuya granulometría está comprendida entre 1,3 y 3,5 mm. Esta granulometría también se replicó para los otros dos agregados (escoria de cobre y árido del Aconcagua) con el fin de tener una

comparación más representativa de estas tres muestras. Dadas las restricciones del ensayo, el tamiz de menor tamaño permitido es el tamiz N°8 (2,5 mm) que corresponde al grado 7 del ensayo, por lo que se debió utilizar para los tres agregados una granulometría entre 5 y 2,5 mm tal como muestra la Tabla 6.7.

Tabla 6.7- Requerimientos según el grado de la muestra para el ensayo de Desgaste de los Ángeles. Fuente [5]

Tamaños de partículas (mm)	1	2	3	4	5	6	7
	(80-40)	(50-25)	(40-20)	(40-10)	(20-10)	(10-5)	(5-2,5)
Tamaño de las fracciones (g)							
80 – 63	2.500 ± 50						
63 – 50	2.500 ± 50						
50 – 40	5.000 ± 50	5.000 ± 50					
40 – 25		5.000 ± 25	5.000 ± 25	1.250 ± 25			
25 – 20			5.000 ± 25	1.250 ± 25			
20 – 12,5				1.250 ± 10	2.500 ± 10		
12,5 – 10				1.250 ± 10	2.500 ± 10		
10 – 6,3						2.500 ± 10	
6,3 – 5						2.500 ± 10	
5 – 2,5							5.000 ± 10
Masa inicial de muestra (Mi)	10.000 ± 100	10.000 ± 75	10.000 ± 50	5.000 ± 10	5.000 ± 10	5.000 ± 10	5.000 ± 10
Esferas							
- número	12			12	11	8	6
- masa (g)	5.000 ± 25			5.000 ± 25	4.584 ± 25	3.330 ± 25	2.500 ± 15
Número de Revoluciones	1.000			500			

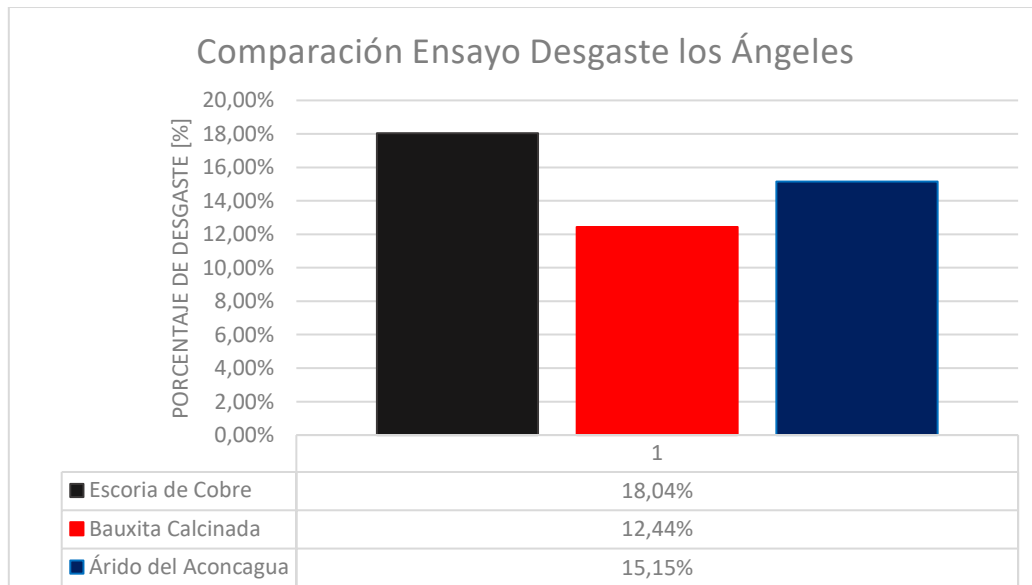


Figura 6.4- Porcentajes de Desgaste de los Agregados sometidos a la Máquina de los Ángeles.

En la Figura 6.4 se presentan los resultados obtenidos del ensayo de desgaste utilizando la máquina de los ángeles para los tres agregados utilizados en esta investigación. Se aprecia que la escoria de cobre proveniente del depósito de Codelco Ventanas presenta los resultados más alto con un 18% de desgaste, este valor se encuentra bajo lo establecido por la normativa, por lo que no debiese presentar impedimentos ante acciones abrasivas producidas por el tráfico vehicular.

El porcentaje de desgaste que se obtuvo de la bauxita calcinada indica claramente que este agregado posee una resistencia al desgaste superior a los otros dos especímenes. Este es uno de los motivos por lo cual este material se usa frecuentemente para la confección de SSAF. El otro agregado pétreo sometido en la máquina los Ángeles es el árido del Aconcagua, el cual presentó un 15% de desgaste a la abrasión.

Al momento de evaluar cuáles son los factores que afectan al desgaste de las piezas de un equipo chancador, destaca la triturabilidad y abrasividad del material a chancar. La triturabilidad de las rocas indica la facilidad de romperse, en donde un valor de triturabilidad alto indica que el árido posee mayor facilidad de ser triturado. Uno de los índices utilizados por el proveedor de equipos y piezas de chancado METSO [49], el cual clasifica el grado de triturabilidad según el resultado obtenido del ensayo de desgaste de los Ángeles.

Tabla 6.8- Clasificación de los Agregados según el Desgaste obtenido en el Ensayo de los Ángeles.

Clasificación	Desgaste los Ángeles	Agregado
Muy fácil	27>	
Fácil	22 - 27	
Medio	17 - 22	Escoria de Cobre
Difícil	12 - 17	Árido del Aconcagua
Muy difícil	<12	Bauxita Calcinada

De la Tabla 6.8 es preciso mencionar que la escoria de cobre se clasifica como un material de desgaste medio, dada su alta densidad, ya que al poseer sus moléculas más aglomeradas hacen de la escoria un agregado frágil en comparación con la bauxita y la gravilla, generando porcentajes de desgaste superiores. La confección de las muestras y el procedimiento del ensayo se muestran en el Anexo E.6.1.

Observación 1: El método utilizado para medir el desgaste de las partículas empleado por la máquina de los Ángeles permite un ambiente de libre desplazamiento, en donde el material luego de ser sometido al impacto de las bolas de acero tiene la ventaja de disipar la energía generada por la colisión, dado el gran volumen del cilindro metálico. Esta energía es distinta para cada agregado, esto se puede apreciar en los resultados presentados, recalcando los valores de desgaste de la escoria de cobre, este material presenta valores de desgaste superiores a los otros dos materiales debido a que este posee mayor peso, lo que significaría una mayor energía de impacto y con esto un mayor desgaste.

Observación 2: Al momento de realizar este ensayo, se procuró mantener una granulometría igual para los tres agregados, de la cual se obtuvo un solo grado, correspondiente al N°7 con material retenido en tamiz 2,5 mm, ya que este grado es el último asociado a este ensayo, se optó por recurrir al ensayo de trituración como complemento, puesto que este abarca a materiales con granulometría menor.

- **Trituración.**

El ensayo del Índice de Trituración se enfoca principalmente en medir la resistencia a la desintegración física de los áridos gruesos y finos, basándose en los diferentes cortes granulométricos. El procedimiento para medir este parámetro en los áridos gruesos (tamiz 40 – 10 mm) se realiza mediante compresión, confinando de manera gradual las muestras por ensayar, mientras que para los áridos finos (tamiz 10 – 0,630 mm), el método cambia, puesto que las muestras son sometidas a impactos repetitivos. Este método de ensaye es utilizado como complemento del ensaye de desgaste de los Ángeles o también como sustituto de este. La Tabla 6.9 muestra los valores de índice de trituración máximo especificado para distintos usos según el Manual de Carretera Volumen 5.

Tabla 6.9- Índice de Trituración máximo exigido para diferentes usos. Fuente [1].

Usos	Exigencia máxima [%]	Capítulo M-C Vol. 5
Lechada asfáltica	3,5	M-C 5.406. 201.A
Arena para pavimentos de hormigón	4	M-C 5.410.201 (2)
Áridos gruesos para pavimentos de hormigón	20	M-C 5.410.201 (2)
Áridos finos para hormigones	5	M-C 5.501. 201 (2)
Áridos gruesos para hormigones	30	M-C 5.501. 201 (2)
Micro aglomerados en frío	3,5	M-C 5.419. 201.B

Debido a que los SSAF no poseen una exigencia específica para el ensaye del índice de trituración, se procederá a interpretar estos Sellos como un tratamiento superficial simple o como lechadas asfálticas, con el objetivo de poseer una exigencia límite. Para este ensayo se realizará la comparación de los materiales definidos como finos de Grado 5 y 2,5, ya que la confección de la granulometría entrega porcentajes retenidos de mayor tamaño para estos dos grados, por lo que se realizará el método de impacto.

El método de ensaye por impacto consiste en llenar un molde con material según el grado especificado, compactando con una varilla tres capas de material con 25 golpes, este procedimiento se aprecia en la Figura 6.5.A. Posteriormente se enrasa e instala en la máquina de impacto, sometiendo al agregado a 15 golpes de martinete desde una altura de aproximadamente 380 [mm]. La energía suministrada a cada muestra es la misma dadas las características del aparato, pues la altura de caída es controlada en cada golpe, como se observa en la Figura 6.5.B.

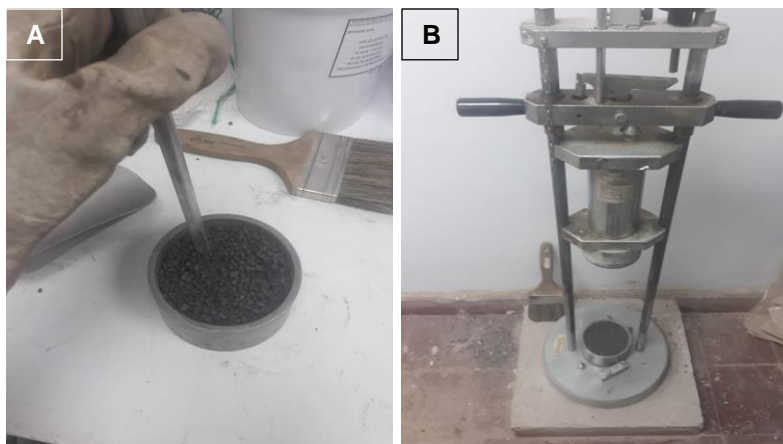


Figura 6.5- A) Compactación de Capas Usando Varilla (25 golpes), B) Equipo de Impacto (15 golpes).

Luego de someter todas las muestras al impacto del martinete, se registra su peso como “Masa Muestra N°” en gramos, posteriormente se registra la masa del material fino que pasa el tamiz de corte establecido para cada grado del ensayo, siendo 0,630 mm (ASTM tamiz N°30) para el grado 5 y 0,315 mm (ASTM tamiz N°50) para el grado 2,5. Cabe destacar que para cada grado se realizan dos ensayos para finalmente promediar los resultados obtenidos.

A continuación, se presenta la Tabla 6.10 con los respectivos resultados del ensayo de trituración para los tres agregados. El detalle del ensayo se muestra en el Anexo E.6.2.

Tabla 6.10- Índice de Trituración de las muestras ensayadas.

Agregado Pétreo	ITp Muestra 1 [%]	ITp Muestra 2 [%]	Porcentaje Granulométrico [%]	IT total Muestra 1 [%]	IT total Muestra 2 [%]	IT total Promedio [%]
Escoria de Cobre	2,35	2,28	29	2,56	2,54	2,55
	2,65	2,65	71			
Bauxita Calcinada	0,43	0,57	29	0,31	0,36	0,34
	0,26	0,28	71			
Árido del Aconcagua	2,73	2,57	29	2,86	2,43	2,64
	2,91	2,37	71			




Al observar los resultados, los valores del índice de trituración presentes en la escoria de cobre fueron muy similares a los arrojados por el árido del Aconcagua, pero muy superiores a los presentados por la bauxita calcinada. Esta diferencia se debe a que la bauxita en su composición posee un pigmento que recubre a las partículas, lo que permite mantener unidas a los granos de este material, esta conclusión no es definitiva, y para corroborarlo se debería realizar el mismo ensayo, pero con el material en estado natural. Además, hay que destacar que los tres agregados presentaron índices de trituración por debajo del límite para lechadas asfálticas.

6.1.6. Resumen General de los Ensayos.

La Tabla 6.11 muestra un resumen general de los ensayos realizados en este capítulo y sus principales resultados.

Tabla 6.11- Resumen de los Ensayos de Caracterización de los Agregados.

Tipo de Ensayo	Unidades	Agregado Pétreo		
		ESCORIA DE COBRE	BAUXITA CALCINADA	ÁRIDO DEL ACONCAGUA
Densidad Real SSS	[kg/m ³]	3799,71	3290,45	2643,50
Densidad Real S	[kg/m ³]	3785,14	3266,18	2597,41
Densidad Neta	[kg/m ³]	3841,11	3347,12	2722,93
Densidad Aparente Suelta	[kg/m ³]	2104,90	1847,15	1449,72
Absorción	[%]	0,38	0,75	1,77
Índice de Lajas	[%]	11	25,22	6,43
Desgaste de los Ángeles	[%]	18,04	12,44	15,15
Índice de Trituración	[%]	2,55	0,34	2,64

7. Capítulo VII

7.1. Evaluación de los Sellos de Alta Fricción Usando Escoria de Cobre.

En el presente capítulo se pondrá énfasis a la evaluación de la escoria de cobre como agregado pétreo para los sellos de alta fricción. Este material será sometido a pruebas, de las cuales se determinará su resistencia al deslizamiento, desgaste y textura superficial.

Para determinar estos parámetros los sellos diseñados con los diferentes agregados se someterán a diferentes ensayos que simulen las condiciones del tráfico vehicular, con el objetivo principal de exigir al máximo las probetas a ensayar.

Para el diseño de las probetas se usarán tres ligantes diferentes, los cuales servirán como aditivo y fijador de las partículas de los agregados pétreos. Dos de estos aditivos serán las emulsiones asfálticas catiónicas de quiebre rápido tradicional (CRS-2) y elastomérica (CRS-2 Elast.). El tercer ligante consistirá en una resina de poliuretano de dos componentes.

El procedimiento que se llevará a cabo para el diseño de las probetas será el mismo utilizado en la aplicación de los sellos de alta fricción, este consiste en [50]:

- El instalador debe comprobar y registrar la temperatura del aire, la temperatura de la superficie de la carretera y la humedad relativa. No se debe continuar con la instalación si: a) La humedad relativa es superior al 80 %, b) La temperatura de la superficie de la carretera y/o del aire es inferior a 5 °C o superior a 35 °C y c) La temperatura de la superficie de la carretera es inferior a 2 °C por encima del punto de rocío de la temperatura del aire y la humedad relativa medidas.
- Los componentes del aglutinante y el catalizador se suministran en paquetes pre-pesados. La parte B se decanta en la parte A y se incorpora bien usando un taladro a bajas revoluciones equipado con una paleta helicoidal de mezcla hasta que se obtenga un producto con un color uniforme sin vetas. Se debe tener cuidado de retirar el producto de los laterales del recipiente (Este procedimiento se aplica solo a las resinas de poliuretano).
- El material mezclado se vierte en la superficie de la carretera a los 10 minutos de realizar la mezcla (Resinas de poliuretanos), y se extiende usando un rastrillo de goma serrado para lograr que la cobertura esté nivelada entre 1,5 kg-m⁻² y 2,5 kg-m⁻² en función de la textura y la porosidad de la superficie existente. Para este paso se utilizará moldes de maderas, para lograr un efecto más realista de un pavimento a una escala menor.
- A los 5 minutos de la aplicación del aditivo, el exceso de los agregados se disemina y se extiende por la superficie de cada probeta y se deja que el sistema se cure.
- Después de que el aditivo se haya curado totalmente, el exceso de agregado se elimina mediante una barredora de succión u otros métodos adecuados. Para este paso se usará una escobilla manual.

Los ensayos realizados en laboratorio para medir el desgaste y abrasión de cada una de las probetas tendrán como objetivo determinar la pérdida de agregado y el daño que sufren los áridos ante acciones de cargas repetitivas. Estas mediciones permitirán comparar los valores de las distintas combinaciones árido-ligante, principalmente de las probetas conformadas con escoria de cobre. Los ensayos que se emplearán son aquellos utilizados para determinar el contenido de ligante en lechadas asfálticas. Cabe mencionar, que los valores que se obtengan de dichos ensayos no serán comparables con aquellos que podrían determinarse a partir de los ensayos de las certificaciones de la british board of agreement (BBA), ya que estos emplean distintos aparatos y diferentes condiciones de trabajo. En resumen, los valores que se obtengan de estos ensayos serán útiles para observar el comportamiento de sellos diseñados con agregados y ligantes alternativos comparándolos con un sello de alta fricción tradicional (bauxita calcinada + resina de poliuretano).

Los ensayos que se emplearán en el presente trabajo corresponden a los utilizados en lechadas asfálticas, estos son: a) ensayo de rueda cargada, b) ensayo de abrasión en medio húmedo, c) ensayo de abrasión en medio seco. De estos ensayos se observará el desempeño de las distintas combinaciones áridos- ligante, sobre todo de los ligantes. Posteriormente, el aditivo de mejor desempeño será usado para confeccionar las probetas definitivas, las cuales serán sometidas a desgaste y abrasión. Finalmente, se medirá la resistencia al deslizamiento y profundidad de textura. La Figura 7.1 muestra un esquema general del procedimiento.

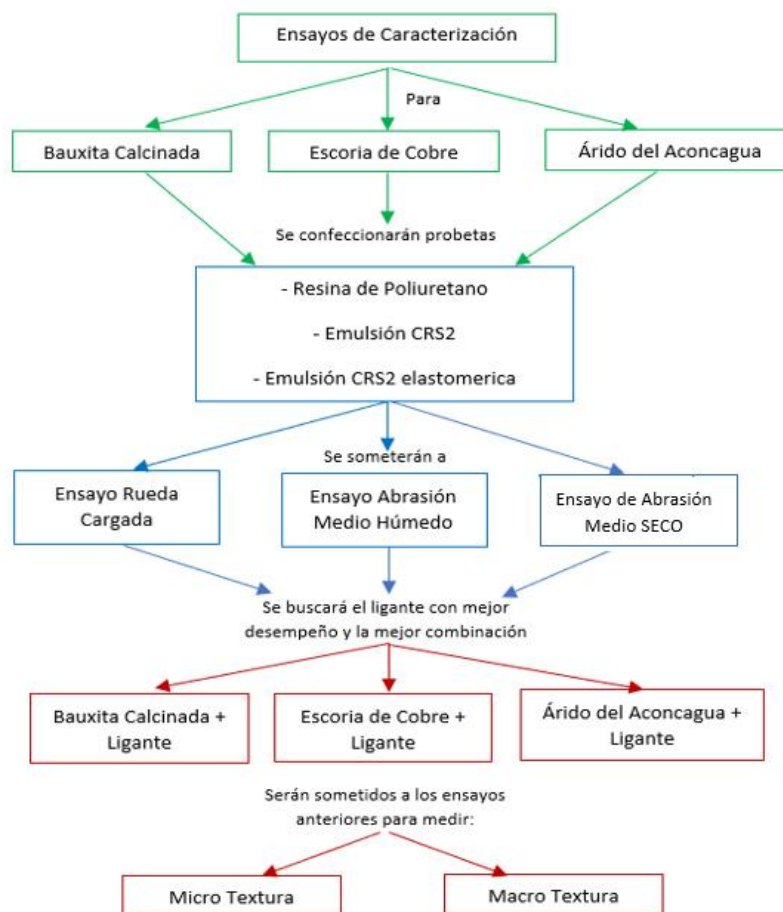


Figura 7.1- Esquema de Ensayos para los Agregados Pétreos y SSAF.

7.1.1. Campo de Aplicación.

El propósito de la evaluación de la escoria de cobre es analizar las características y propiedades que posee y de esta manera tener valores indicativos que permitan considerar a este material (residuo) como un recurso importante en la confección de sellos y sellos de alta fricción.

Por este motivo, que los ensayos a los cuales serán sometidos los agregados y ligantes, evaluarán parámetros de resistencia y textura, pensando en las siguientes características de los caminos según lo establece el BBA [5]:

- Nivel de Tráfico: Tipo 1 con 2500-3500 vehículos comerciales por carril por día.
- Caminos o Carreteras con pendiente 5-10% más de 50 m. (G1)
- Radio de curvatura <500 m - Tráfico unidireccional. (S1)
- Caminos o Carreteras con pendiente > 10% más de 50 m. (G2)
- Radio de curvatura <500 m - Tráfico bidireccional. (S2)
- Aproximaciones a pasos de peatones y otros de alto riesgo.

7.2. Emulsiones Asfálticas.

7.2.1. Emulsión Asfáltica Catiónica de Quiebre Rápido Tradicional (CRS-2).

La emulsión asfáltica catiónica de quiebre rápido CRS-2 se caracteriza por tener un color café oscuro y un estado líquido- viscoso. Posee una excelente adherencia y recubrimiento con materiales pétreos de diferente naturaleza. Es recomendable no aplicar este producto con temperaturas ambientes por debajo los 10°C, tampoco bajo lluvia o neblina.

Esta emulsión asfáltica de quiebre rápido es utilizada para tratamientos superficiales simples y dobles y presenta las siguientes características [51]:

- Al estar almacenada tiene escasa sedimentación de asfalto.
- Tiene una escasa sedimentación de asfalto al estar almacenada.
- Viscosidad adecuada para diferentes usos.
- Muy buena adherencia árido- asfalto.
- Se obtiene rápidamente la adhesión del tratamiento.
- El agregado debe estar limpio, libre de polvo y materia orgánica.

Modo de Empleo: Esta sustancia debe aplicarse a temperaturas entre 55 y 65°C, esto permite obtener una viscosidad entre 100 y 400 (ssf). La viscosidad baja es recomendable usarla en climas fríos, por otro lado, la viscosidad alta se utiliza en climas calurosos.

Rendimiento: Estos valores varían de acuerdo con el diseño del tratamiento, pues se basan en el tamaño nominal del agregado, comúnmente para tratamiento superficiales simples la cantidad de emulsión asfáltica CRS-2 varía entre 0,9-1,6 L/m². A continuación, en la Tabla 7.1 se detallan las características técnicas de la emulsión CRS-2.

Tabla 7.1- Características Técnicas de la Emulsión CRS-2. Fuente [51].

Análisis	Unidad	Norma (MC)	Especificaciones	
			Mín.	Máx.
Viscosidad Saybolt Furol a 50°C	s	8.302.12	100	400
Carga de partículas		8.302.5	Positiva	
Estabilidad 1 día	%	8.302.5		1
Tamizado	%	8.302.5		0,1
Residuo por Evaporación	%	8.302.5	65	
Demulsibilidad, 35 ml Dyocil Sulfosuccinato de Sodio (0,8%)		8.302.5	40	
Análisis al Residuo				
Penetración a 25°C, 100g, 5s	dmm	8.302.16	100	250
Ductilidad a 25°C, 5cm/min	°C	8.302.17	40	
Solubilidad en Tricloroetileno	%	8.302.11	97,5	
Ensayo de la Mancha (%Xilol)	%	8.302.7	Negativo para 30%	

7.2.2. Emulsión Asfáltica Catiónica de Quiebre Rápido Elastomerica (CRS-2E).

La emulsión CRS-2 elastomerica es una emulsión asfáltica catiónica, modificada con polímeros del tipo SBR de quiebre rápido y de color café oscuro en estado líquido-viscoso. Este polímero cuenta con una buena adherencia y cubrimiento con todo tipo de áridos.

Esta emulsión asfáltica es utilizada para tratamientos superficiales simples y dobles y presenta las siguientes características [52]:

- Posee un buen comportamiento tanto a altas como bajas temperaturas
- Excelente retención de árido, disminuyendo los riesgos de proyección de áridos sueltos.
- Tiene una escasa sedimentación de asfalto al estar almacenada.
- Viscosidad adecuada para diferentes usos.
- Muy buena adherencia árido- asfalto.
- Cohesión rápida del tratamiento.
- El agregado debe estar limpio, libre de polvo y materia orgánica.

Teniendo en cuenta que la confección de las probetas se realizará pensando en un Tratamiento Superficial Simple, su aplicación consiste en un sello de gravilla, el cual posee un método de mantención de bajo costo. Se puede usar en todo tipo de climas, además renueva, sella y protege el pavimento de las inclemencias climáticas y mejora la resistencia al deslizamiento.

Esta emulsión elastomerica posee la cualidad de disminuir el período de apertura al tránsito en comparación a las emulsiones convencionales, se debe aplicar a temperaturas entre 65°-75°C y su rendimiento cambia de acuerdo con el diseño del tratamiento, pues basado en el tamaño nominal del agregado, las dosis de emulsión CRS-2E para tratamiento superficiales simples serían: 0,9 a 1,6 L/m². Algunas de las características técnicas de este producto se especifican en la Tabla 7.2.

Tabla 7.2- Características Técnicas de la Emulsión CRS-2 Elastomérica. Fuente [52].

Análisis	Unidad	Norma (MC)	Especificaciones	
			Mín.	Máx.
Viscosidad Saybolt Furol a 50°C	s	8.302.12	50	250
Carga de Partículas		8.302.5	Positiva	
Sedimentación 7 días	%	8.302.5	5	
Residuo por Evaporación	%	8.302.5	65	
Análisis al Residuo				
Penetración a 25°C, 100g, 5s	dmm	8.302.3	50	150
Punto de Ablandamiento	°C	8.302.16	50	
Índice de Penetración	%	8.302.21	1	
Recuperación Elástica lineal a 13°C	%	8.302.19	50	
Ensayo de Placa Vialit	%	8.302.20	90	

7.3. Dosificación del Árido y Ligante Asfáltico para Tratamientos Superficiales.

Las cantidades de agregados y emulsiones utilizados para tratamientos superficiales son determinadas a partir de la dosificación mediante la dimensión mínima promedio. Este método utiliza el tamaño medio del árido y otros parámetros ya determinados en los ensayos antes descritos en esta memoria.

Esta forma de dosificación será la utilizada para determinar la cantidad de emulsión y árido a emplear para los sellos de alta fricción, ya que, para propósitos de esta evaluación los sellos emularán un tratamiento superficial simple. Es importante destacar que la dosificación solo es válida para las emulsiones asfálticas CRS-2 y CRS-2E, puesto que para las resinas de poliuretanos las concentraciones están establecidas por el fabricante.

El procedimiento para determinar la dosificación de los agregados y las emulsiones se describen en los siguientes pasos:

Paso1: Dimensión Mínima Promedio

En este paso se interpolará el tamaño medio del árido en base a los porcentajes retenidos en cada fracción, además se utilizarán los valores del índice de lajas de cada agregado determinados en la sección 6.1.3, con estos parámetros se calcula la dimensión mínima promedio utilizando la ecuación 7.1.

$$H(mm) = \frac{TM}{1.09 + (0.0118 * IL)} \quad (Ec. 7.1)$$

H : Dimensión Mínima Promedio (mm)

TM : Tamaño medio del árido (mm)

IL : Índice de Laja (%)

Paso 2: Contenido de Vacíos

Con las densidades reales y aparentes determinadas en las secciones 6.1.2 y 6.1.3 respectivamente, se calcula el índice de vacíos presente en las muestras utilizando la ecuación 7.2.

$$V = 1 - \frac{\rho_{as}}{\rho_{rs}} \quad (\text{Ec. 7.2})$$

- V : Contenido de huecos
 ρ_{as} : Densidad Aparente Suelta (kg/dm³)
 ρ_{rs} : Densidad Real Seca (kg/dm³)

Paso 3: Factor y Porcentaje de Desperdicio (E, %)

En base al valor obtenido en la dimensión mínima promedio, se determina el porcentaje de desperdicio del árido que se produce durante el proceso constructivo, dichos porcentajes se muestran en la Tabla 7.3. En este caso las dimensiones mínimas promedios son inferiores a 6,5 mm, por ende, el factor de desperdicio es de un 5%.

Tabla 7.3- Factor de Desperdicio Utilizado para Dosificación de TSS.

H (mm)	Desperdicio (%)	Factor de Desperdicio (E)
<6,5	5	1,05
6,5-8,0	4	1,04
8,1-9,5	3	1,03
>9,5	2	1,02

Paso 4: Factor de Tránsito (T)

El volumen de tránsito, en particular el tránsito pesado, aumenta el embebido del árido del tratamiento. Este factor incorpora el efecto del tránsito en el embebido del árido. Se obtiene mediante la Tabla 7.4.

Tabla 7.4- Factor de Tránsito Utilizado para Dosificación de TSS.

Volumen de Tránsito (vehículos/día)	Factor T
< 100	0,85
100 – 500	0,75
500 – 1.000	0,7
1.000 – 2.000	0,65
>2.000	0,6

Observación: El volumen de tránsito considerado para los ensayos serán considerado como medio a medio-alto con 1000 a 2000 vehículos/día, de este modo el valor utilizado para el factor de tránsito será 0,65.

Paso 5: Para el cálculo de dosificación dosis de árido se emplea la ecuación 7.3.

$$C = M * ((1 - 0.4V)H * \rho_{rs} * E) \quad (\text{Ec. 7.3})$$

- C : Contenido de árido (kg/m²)
M : Factor de Corrección (considerar 1,0)
V : Vacíos de áridos
ρ_{rs} : Densidad Real Seca (kg/dm³)
E : Factor de Desperdicio (%)

Paso 6: Las dosis de ligante se determinan a partir de la ecuación 7.4.

$$B = K * \left(\frac{0.4 * H * T * V + S + A}{R} \right) \quad (\text{Ec. 7.4})$$

- B : Contenido de Ligante (L/m²)
H : Dimensión Mínima Promedio (mm)
T : Factor de Transito
V : Vacíos de áridos
S : Factor Corrección Textura superficial (L/m²)
A : Factor corrección absorción asfalto del árido (L/m²)
R : Porcentaje de asfalto residual del ligante. Considerar 0,65 para emulsiones CRS-2 y CRS-2E

Observación: con el objetivo de obtener un rango para la dosificación del ligante, se optó por considerar un valor de 0,1 para el factor corrección de la textura superficial (S), puesto que es posible encontrar probetas con irregularidades.

Los principales resultados de dosificación de árido y ligante se presentan en la Tabla 7.5.

Tabla 7.5- Principales Valores de la Dosificación del Árido y del Ligante para SSAF.

Agregado pétreo	Dimensión mínima Promedio	Contenido de Vacíos	Dosificación del árido	Dosificación del Ligante
Unidad	H [mm]	V [ad]	C [kg/m ²]	B [L/m ²]
Escoria de Cobre	1,924	0,444	6,29	0,376-0,545
Bauxita Calcinada	1,921	0,434	5,44	0,367-0,536
Árido del Aconcagua	1,925	0,442	4,32	0,374-0,544

De la Tabla 7.5 se concluye que la dimensión mínima promedio de los tres agregados es similar, independiente de la diferencia que existe en los índices de lajas, su valor ronda los 2 mm aproximadamente.

El contenido de vacíos también entrega información importante, pues los tres áridos presentan valores muy parecidos, esto quiere decir que la relación entre las densidades reales y aparentes están en un mismo rango. Esto es un aspecto positivo a la hora de comparar a la Escoria de Cobre con el agregado que comúnmente se utiliza para estos sellos.

7.4. Dosificación entre Resina de Poliuretano y Agregado Pétreo.

La dosificación entre los agregados y la resina de poliuretano depende de diferentes factores, entre los cuales se encuentran:

- La temperatura ambiente de aplicación.
- La relación entre los componentes A y B de la Resina.
- El tiempo necesario para la apertura de la ruta.

La temperatura ambiente es un factor importante, ya que a temperaturas bajas se necesitará añadir a la mezcla un acelerante que disminuya el tiempo de curado, caso contrario para temperaturas elevadas, aquí será primordial las concentraciones del componente B (componente de curado), sustancia que permite el endurecimiento de la mezcla.

Según la ficha técnica [53] se especifica una dosificación para la resina de poliuretano con una concentración de 1 parte por peso del componente B y 2,15 parte por peso del componente A para una temperatura de 19°C. A esta mezcla se le puede añadir un colorante (rojo), el cual también será suministrado de manera gradual, de esta manera la mezcla de estos componentes se aplicará con una tasa de cobertura mínima de 1-1,5 kg/m².

A partir de la temperatura se confeccionó una tabla con la proporción entre los componentes A y B de la Resina de poliuretano en base a las pruebas experimentadas en laboratorio (Ver Anexo A.7). Por otro lado, la cantidad de agregado utilizado tendrá los mismos valores que los determinados en la dosificación de los tratamientos superficiales de la sección 7.4, puesto que la superficie de aplicación es similar.

Las probetas serán creadas finalmente con una relación de: 1 parte por peso del componente B y 1,5 partes por peso del componente A ya que la temperatura aproximada de aplicación varía entre 14-16 °C, además se añadirá un porcentaje entre 3-5 % de colorante. Un ejemplo de estas proporciones se observa en las Figuras 7.2.A, 7.2.B y 7.2.C.

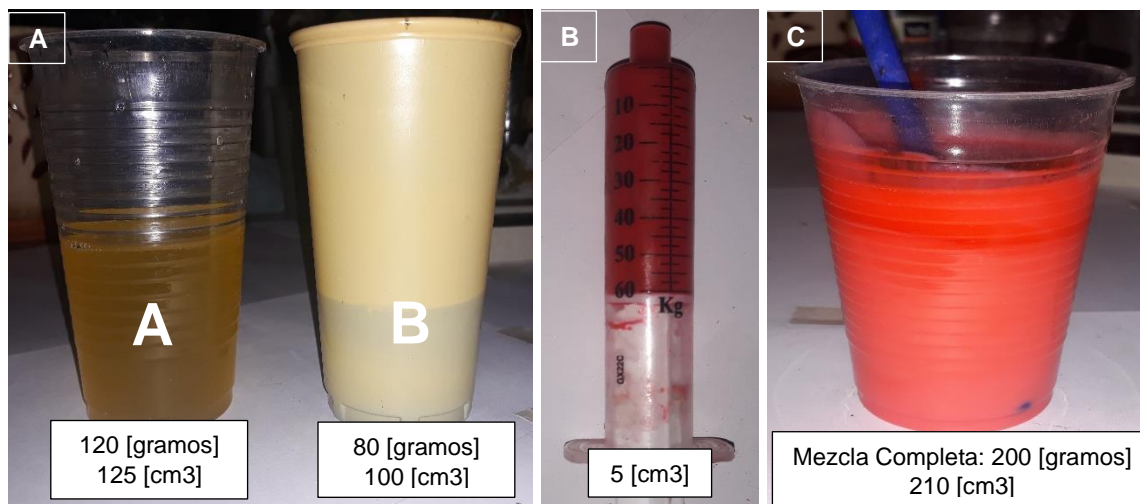


Figura 7.2- A) Proporción en Gramos de los Componentes A-B de las Resinas de Poliuretanos; B) Cantidad de Colorante Suministrada; C) Mezcla Final de la Resina de Poliuretano.

7.5. Ensayes Evaluativos.

7.5.1. Ensayo Rueda Cargada.

Método para determinar el porcentaje máximo de ligante en lechadas asfálticas usando la rueda cargada.

El principal objetivo de este ensayo es establecer el límite máximo del contenido de ligante en lechadas asfálticas. Para propósitos de este estudio, se pretende adaptar este ensayo para lograr clasificar el desempeño que pueden tener los diferentes ligantes (resinas de poliuretano, emulsiones CRS2 y emulsiones CRS2 Elastomérica de quiebre rápido) en combinación con los distintos agregados (escoria de cobre, bauxita calcinada y árido del Aconcagua). Por ende, se registrarán las masas antes y después de ensayo, y se calculará la pérdida de agregado. El instrumento utilizado es el mostrado en la Figura 7.3.



Figura 7.3- Máquina de Ensayo Rueda Cargada.

DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO:

Este ensayo consiste en confeccionar probetas con lechadas asfálticas, las cuales son sometidas al paso repetitivo de una rueda cargada de goma. Luego estas probetas se cubren con arena y son sometidas a nuevos ciclos de carga. La cantidad de arena adherida a la superficie de las probetas indica el exceso de ligante que se pueden encontrar en los especímenes. En esta ocasión las probetas serán confeccionadas con una "cama de madera" (terciado estructural de 15 mm) de dimensiones 400mm x 75mm y sobre esta placa se aplicarán las diferentes emulsiones, para finalmente esparcir los agregados pétreos sobre la superficie, cuya área es 0.03 m² aproximadamente [4].

EQUIPOS Y MATERIALES.

- Balanzas.
- Horno.
- Máquina para ensayo de rueda cargada (con especificaciones del Manual de Carretera Volumen 8.302.53), como se observa en la Figura 7.3.
- Termómetro.
- Bol o recipiente.
- Arena de sílicea natural (calibrada de acuerdo con la granulometría indicada en el Manual de Carretera Volumen 8.302.53).
- Otros (escobillas, pesas de 10 kg aproximadamente, guantes, etc).

PROCEDIMIENTO.

Este es el procedimiento establecido por el Manual de Carreteras Volumen 8, para el ensayo de rueda cargada [4].

- a. Los materiales correspondientes a: escoria de cobre, árido del Aconcagua y bauxita calcinada se deben mantener a una temperatura de 25°C durante 60 minutos Aproximadamente.
- b. El confeccionamiento de las probetas debe ser de un espesor aproximadamente 1,25 veces el tamaño nominal (mm) del agregado (espesor de las probetas sin considerar la placa de madera 1,9-3,8 mm).
- c. Sobre una placa galvanizada colocar papel mantequilla y aplicar una capa de vaselina sólida. Centrar el molde y aplicar la mezcla de emulsión y agregado (considerar un 25-35% extra del agregado necesario para llenar el molde).
- d. Enrasar y colocar el molde en un horno a 60°C por un tiempo mínimo de 15 horas. Luego desmoldar y enfriar a temperatura ambiente (15°C).
- e. Colocar las probetas confeccionadas con las diferentes combinaciones de emulsiones y agregados sobre la máquina de rueda cargada y luego aplicar una cantidad de 1000 ciclos.
- f. Lavar las muestras y dejar secar a 60°C hasta conseguir la masa constante y registrar dicha masa como "Mi".

CALCULOS.

Para determinar la cantidad de agregado que es desprendido luego de los 1000 ciclos se utilizará la ecuación 7.5:

$$P = \frac{Mi - Mf}{Mi} (\%) \quad (\text{Ec. 7.5})$$

Donde

- P : Cantidad de agregado desprendido (%)
Mi : Masa inicial de la probeta (g)
Mf : Masa Final de la probeta (g)

CONFECCIÓN DE LAS PROBETAS.

PASO 1: Imprimación

En la madera la superficie se debe imprimir con el N°10 (PU3922) [53], a continuación, se debe dejar curar durante un mínimo de 2 horas y un máximo de 12 horas. El resultado de la imprimación se aprecia en la Figura 7.4.

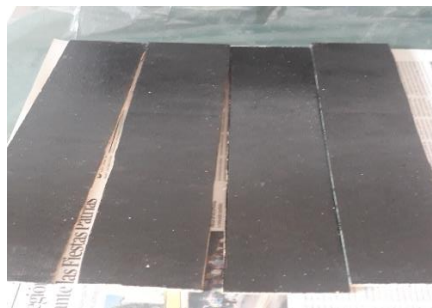


Figura 7.4- Imprimación de Probetas Rueda Cargada.

PASO 2: Aplicación Emulsión (Resina de Poliuretano; Emulsiones CRS-2 y CRS-2E)

Las emulsiones asfálticas serán aplicadas sobre la superficie a temperaturas entre 65-75 °C, como se observa en la Figura 7.5, y para el caso de la resina de poliuretano según las proporciones establecidas en la sección 7.4.



Figura 7.5- Aplicación de los Ligantes sobre Probetas de Maderas Imprimadas.

PASO 3: Aplicación Agregado Pétreo (escoria de cobre, bauxita calcinada, árido del Aconcagua)

Los agregados serán aplicados de tal manera que en la superficie de la probeta el árido quede uniformemente repartido, preocupándose de utilizar las concentraciones determinadas en la sección 7.3. para el área indicada de 0,03 m². Esta aplicación se muestra en la Figura 7.6.



Figura 7.6- Aplicación del Agregado sobre los Ligantes.

PASO 4: Curado del Sello

Finalmente, dejar curar las probetas, así como se muestra en la Figura 7.7, hasta que los ligantes estén en condiciones de ser ensayados.

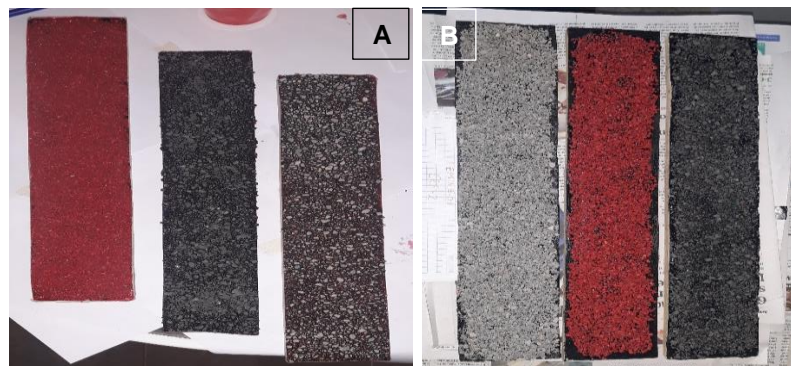


Figura 7.7- A) Curado de Probetas con Resina de Poliuretano; B) Curado de Probetas con Emulsiones CRS-2 y CRS-2E.

RESULTADOS ENSAYO RUEDA CARGADA.

Las probetas confeccionadas con la escoria de cobre, bauxita calcinada y árido del Aconcagua se ensayaron en la máquina de rueda cargada con el objetivo de calcular la pérdida de material y así determinar cuál de los tres ligantes utilizados ofrecería un mejor desempeño.

Al ensayar las probetas cuyo ligante fue la Resina de Poliuretano, se apreció un bajo porcentaje de pérdida de material, siendo aproximadamente 0,5% el mayor valor registrado para el agregado de bauxita calcinada, seguido por el árido del Aconcagua y por la escoria de cobre, este último presentó un valor aproximado de 0,3% de pérdida.

Los resultados de los ensayos entregados por las probetas confeccionadas con la emulsión asfáltica CRS-2 tradicional, muestran una mayor pérdida de material particulado en las probetas creadas con el árido del Aconcagua, cuyo valor llegó al 1%, sin embargo, los otros dos agregados presentaron porcentajes de desprendimiento de material similar, con un margen de diferencia de 0.1%. En esta ocasión la escoria de cobre presentó un mejor comportamiento que los otros dos agregados, teniendo en cuenta que la cantidad de ciclos completados por las probetas de estos materiales fue de 325 para la escoria de cobre, 330 para la bauxita calcinada y 300 en el caso del árido del Aconcagua.

Los motivos por el cual se decidió no completar los 1000 ciclos establecidos por el ensayo y detenerlo en las cifras antes mencionadas, se debió a que la emulsión CRS-2 tradicional comenzó a exudar, aflorando en la superficie de la probeta. Esta singularidad provocó un desprendimiento excesivo del material y un deterioro anticipado, tal como se muestra en la Figura 7.9, y para no dañar los artefactos se decidió detener dichas pruebas.

Los valores determinados en las probetas ensayadas y confeccionadas con la emulsión asfáltica CRS-2 elastomérica presentaron valores sobre el 1% de pérdida de material para los tres agregados, estos valores se visualizan en la Tabla 7.6. Estas probetas fueron sometidas a la misma cantidad de ciclos que las efectuadas por la emulsión CRS-2 Tradicional, con el objetivo de realizar una comparación entre ambas emulsiones. Además, se continuó con el ensayo hasta alcanzar un límite para estas probetas, finalizando estas pruebas a los 550 ciclos tanto para la bauxita calcinada como para la escoria de Cobre, y en 394 ciclos para el caso del árido del Aconcagua.

Si bien los resultados de la emulsión CRS-2E fueron mayores a los determinados por la emulsión CRS-2 tradicional, las condiciones presentadas por estas probetas para las mismas cantidades de ciclos fueron muy diferentes, puesto que para los especímenes hechos con la emulsión CRS-2 tradicional el agregado se desprendió totalmente en las esquinas hasta llegar a la capa de imprimación, no así el caso de las probetas hechas con la emulsión CRS-2 elastomérica, pues estas mostraron una mejor adherencia, independiente de que estas hayan obtenido los mayores resultados en las pruebas.

La Figura 7.8 muestra un gráfico comparativo de los principales resultados obtenidos, y en conclusión el ligante que mejor desempeño obtuvo en el ensayo de rueda cargada fue la resina de poliuretano de dos componentes, pues las probetas confeccionadas con este aditivo completaron los 1000 ciclos de rueda cargada, y se lograron bajos porcentajes de pérdida de material, destacando la escoria de cobre como el agregado con menor pérdida.

En la Figura 7.10 se muestra el efecto generado por la rueda cargada en tres probetas de escoria de cobre con distinto ligante, se aprecia que la probeta confeccionada con la resina presenta una leve marca de desgaste, no así el caso de las otras dos probetas, en estas el mayor desprendimiento de material se produjo en los extremos, ya que en estas zonas la rueda frena su movimiento y cambia de dirección, ejerciendo una mayor fuerza.

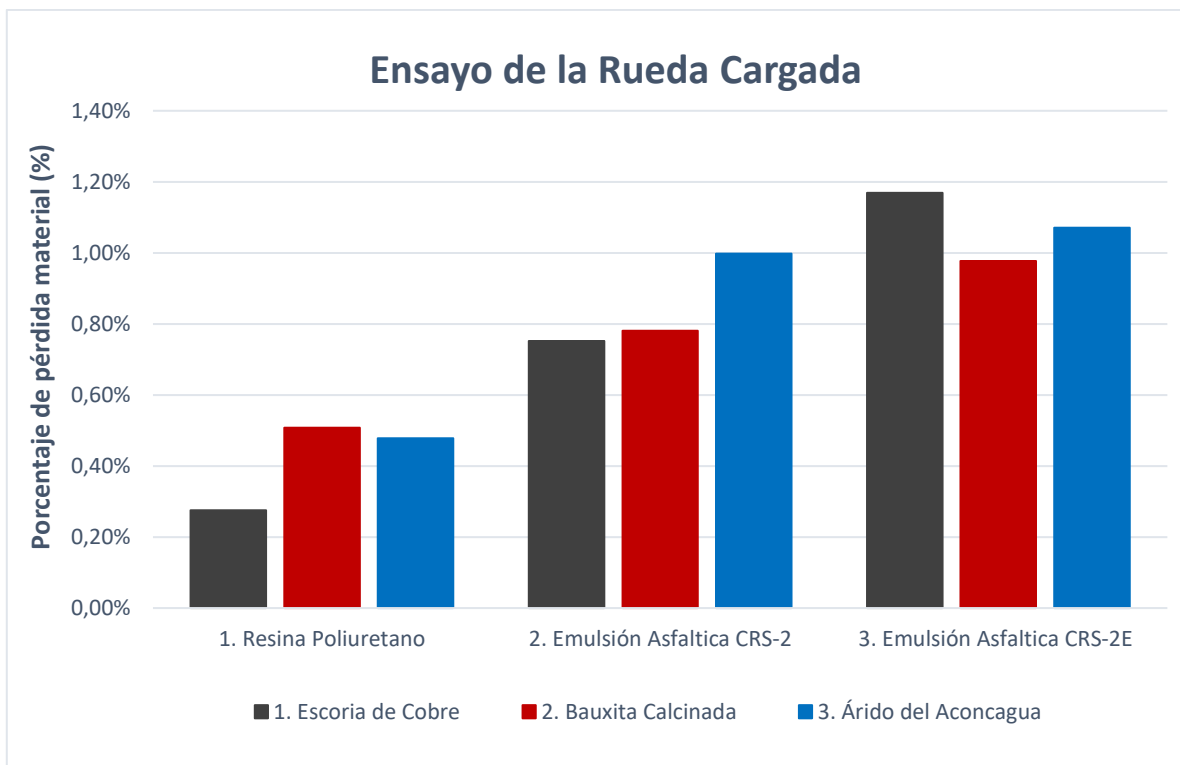


Figura 7.8- Gráfico de Resultados del Ensayo de Rueda Cargada.

Tabla 7.6- Pérdida de Agregado producto del Ensayo de Rueda Cargada.

Ligante	Agregado	Cantidad Ciclos (N°)	Pérdida de agregado (%)
Resina Poliuretano	Escoria de Cobre	1000	0,28%
	Bauxita Calcinada	1000	0,51%
	Árido del Aconcagua	1000	0,48%
CRS-2	Escoria de Cobre	325	0,75%
	Bauxita Calcinada	330	0,78%
	Árido del Aconcagua	300	1,0%
CRS-2 Elast.	Escoria de Cobre	325	1,17%
	Bauxita Calcinada	330	0,98%
	Árido del Aconcagua	300	1,07%



Figura 7.9- Problema producido por Exudación de las Emulsiones Asfálticas de Quiebre Rápido.



Figura 7.10- Resultado Final de las Probetas posterior al Ensayo de Rueda Cargada.

7.5.2. Ensayo Abrasión Medio Húmedo.

Método de abrasión en medio húmedo para lechadas asfálticas.

El objetivo de este ensayo es determinar la resistencia al desgaste por abrasión bajo agua de probetas de lechadas asfálticas. Mediante este procedimiento se logra determinar el contenido mínimo de ligante necesario para resistir la acción abrasiva del tránsito. Para propósitos de este estudio, se pretende clasificar el desempeño que pueden tener las emulsiones (resinas de poliuretano, emulsiones CRS2 y emulsiones CRS2 elastoméricas de quiebre rápido) con los distintos agregados (escoria de cobre, bauxita calcinada y árido del Aconcagua) los cuales serán sometidos a este ensayo en condiciones secas y húmedas. La Figura 7.11 muestra el aparato utilizado para este ensayo.



Figura 7.11- Máquina de Abrasión en Medio Húmedo.

DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO:

Las probetas confeccionadas con las emulsiones asfálticas y con la resina de poliuretano, previamente curada, serán sumergidas en agua y sometidas a la acción abrasiva de un cilindro de goma, el cual roza la superficie de las probetas en forma orbital y como resultado final se obtiene la pérdida de masa de las probetas.

EQUIPOS Y MATERIALES.

- Balanza (de capacidad 5000 g y 2000 g con resoluciones de 1 g y 0,1 g respectivamente)
- Máquina de Abrasión.
- Recipiente metálico.
- Moldes (según lo estipulado en el Manual de Carretera Volumen 8 sección 8.302.46)
- Base para probetas (forma cuadrada 300 mm y espesor igual o superior a 2 mm)
- Goma de abrasión (Características: dureza de 80 grados shore, diámetro externo 31 +/- 0,5 mm, diámetro interno 19 +/- 0,5 mm y longitud 127 +/- 1 mm)
- Horno.

PROCEDIMIENTO.

Este es el procedimiento establecido por el Manual de Carreteras Volumen 8, para el ensayo de abrasión en medio húmedo [4].

- a. Mantener todos los materiales empleados para las mezclas a una temperatura de 25°C durante 60 minutos.
- b. La base para las probetas debe ser cubierta con papel mantequilla y se debe aplicar una capa de vaselina sólida, luego se centra el molde (las dimensiones de los moldes están establecidas en el Manual de Carretera Volumen 8 Sección 8.302.46), posteriormente se toma una muestra de 1000 g y se incorpora una determinada cantidad de agua. Mezclar hasta obtener un color uniforme.
- c. Incorporar la cantidad correspondiente de emulsión. Revolver hasta obtener una mezcla homogénea. Después se debe vaciar la mezcla dentro del molde y enrasar.
- d. Secar la mezcla con molde y base en un horno a 60°C durante un tiempo mínimo de 15 horas hasta obtener una masa constante. Por consiguiente, las probetas se dejan enfriar y se registra su masa como "Mi".
- e. Posteriormente, las probetas son colocadas en un baño de agua a 25°C durante 60 -75 minutos, después son puestas en la máquina de abrasión bajo una cubierta de agua de altura 6 mm.
- f. Con las probetas ya instaladas se procede a activar la maquina durante 5 min, determinando el área sometida a desgaste como A m².
- g. Se procede a retirar las probetas, limpiarlas y secarlas en un horno a una temperatura de 60°C hasta obtener una masa constante. Finalmente registra la masa final como "Mf".

CÁLCULOS.

Para determinar el desgaste por abrasión bajo agua se utiliza la ecuación 7.6:

$$D. B. A = \frac{M_i - M_f}{A} \left(\frac{g}{m^2} \right) \quad (Ec. 7.6)$$

Donde

- DBA : Desgaste por abrasión bajo agua (g/m²)
Mi : Masa inicial de la probeta (g)
Mf : Masa Final de la probeta (g)
A : Área de desgaste de la Probeta de lechada asfáltica y resina (m²)

CONFECCIÓN DE LAS PROBETAS.

PASO 1: Imprimación (probetas circulares de diámetro 24 cm, como la mostrada en la Figura 7.12)



Figura 7.12- Imprimación de Probetas Circulares para Ensayo de Abrasión.

PASO 2: La aplicación de las emulsiones y resina (resina de poliuretano; emulsiones CRS-2 y CRS-2E) se muestran en la Figura 7.13.



Figura 7.13- Aplicación de las Dosis de Ligantes sobre Probetas Circulares destinadas a la Abrasión.

PASO 3: La aplicación agregado pétreo (escoria de cobre; bauxita calcinada; árido del Aconcagua) se muestran en la Figura 7.14.



Figura 7.14- Aplicación de Agregados sobre Probetas destinadas a la Abrasión.

PASO 4: La Figura 7.15 muestra el curado del sello de las probetas circulares.



Figura 7.15- Curado de Probetas destinadas al Ensayo de Abrasión.

RESULTADOS ENSAYO ABRASIÓN MEDIO HÚMEDO:

El ensayo de abrasión en medio húmedo fue adaptado para realizarse en condiciones húmedas y secas y así evaluar los efectos que producirían el roce de la goma sobre las probetas.

Con el objetivo de emular un escenario real de contacto neumático-pavimento para climas calurosos se realizó el ensayo de abrasión en un medio seco para los tres tipos de ligantes usando los agregados pétreos ya mencionados. La proporción de ligante y agregado usado en la confección de las probetas se presentan en la Tabla 7.7. Estas proporciones consideraron un 5% adicional para la cantidad de agregado, un promedio para la cantidad de emulsiones y una concentración de 45,2 ml para las resinas de poliuretano.

Tabla 7.7- Dosis de Agregados y Ligantes para Confección de Probetas Circulares de Abrasión en Medio Húmedo.

		Agregado [gr]	Ligante [ml]
Resina Poliuretano	Escoria de Cobre	285	45,2-67,9
	Bauxita Calcinada	247	45,2-67,9
	Árido del Aconcagua	200	45,2-67,9
Emulsión CRS-2	Escoria de Cobre	285	17-24,6
	Bauxita Calcinada	247	16,6-24,3
	Árido del Aconcagua	200	16,9-24,6
Emulsión CRS-2Elast.	Escoria de Cobre	285	17-24,6
	Bauxita Calcinada	247	16,6-24,3
	Árido del Aconcagua	200	16,9-24,6

Abrasión en Medio Húmedo: “Condiciones Secas”

Los resultados obtenidos por este ensayo bajo condiciones secas se muestran en la Figura 7.16, en esta se observan bajos valores de desgaste para aquellas probetas confeccionadas con la resina de poliuretano, donde el material que obtuvo un menor desgaste fue la bauxita calcinada con un DSA de 46 g/m², sin embargo, la escoria de cobre y la gravilla no arrojaron valores tan distantes con respecto a este material, siendo esta una señal clara que este aditivo posee buena adherencia con otros agregados pétreos.

De la Figura 7.16, también se observa que el comportamiento de las probetas hechas con las emulsiones asfálticas presenta mayores desgastes, esto se puede apreciar en la Figura 7.17, donde es posible divisar las zonas de mayor influencia. De estos resultados, el agregado con mejor desempeño para ambas emulsiones fue la bauxita calcinada, con valores inferiores a 1400 g/m², seguidos por la escoria de cobre, cuyos valores mostraron mejores resultados en presencia de la emulsión CRS-2 tradicional. Sin embargo, las condiciones físicas finales de las probetas indican un mayor deterioro para aquellas hechas con la emulsión CRS-2 tradicional, puesto que, en estas el ligante exudó en demasía y provocó el desprendimiento del agregado en zonas locales.

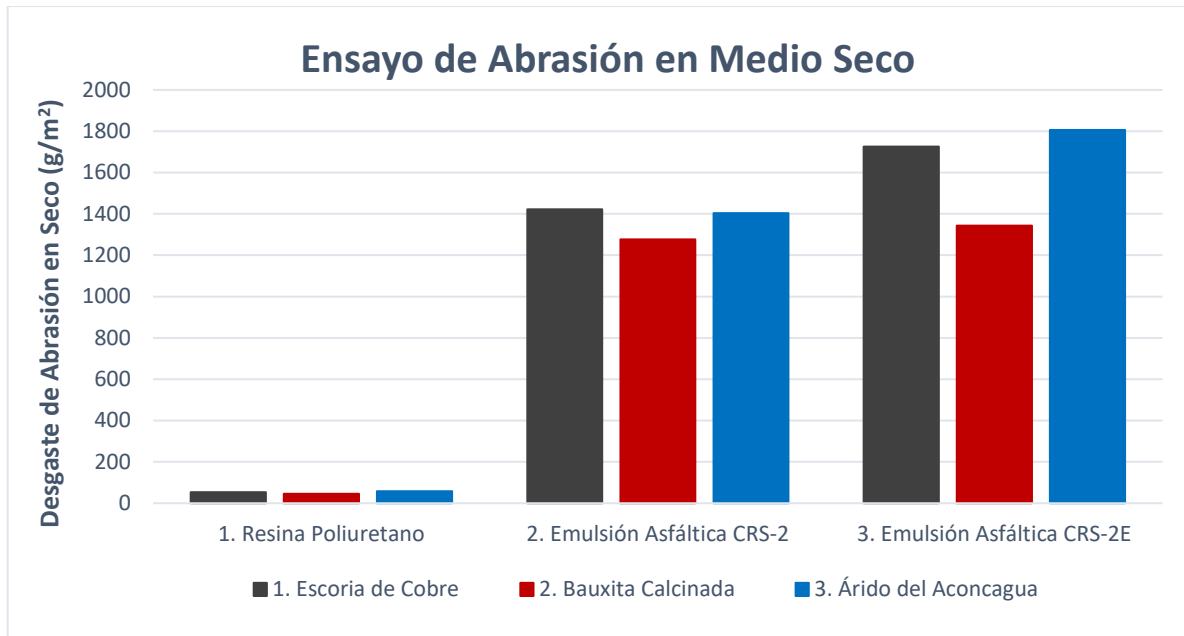


Figura 7.16- Gráficos de los Resultados más relevantes del Ensayo de Abrasión en Condiciones Secas Usando los diferentes Ligantes.

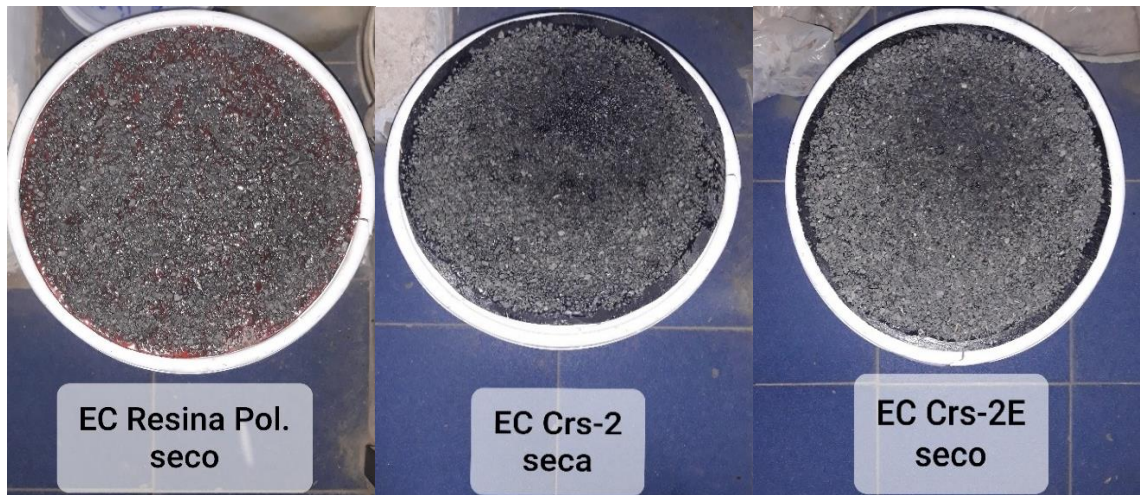


Figura 7.17- Probetas Confeccionadas con Escoria de Cobre y con los tres Ligantes, Sometidas al Ensayo en Condiciones Secas.

Abrasión en Medio Húmedo: “Condiciones Húmedas”

Al someter a las probetas al ensayo de Abrasión en medio húmedo bajo estas mismas condiciones, se logró evaluar el desempeño de los distintos sellos en situaciones desfavorables como lo es un ambiente húmedo o mojado.

Los resultados más relevantes se obtuvieron para aquellas probetas confeccionadas con la resina de poliuretano, tal como se observa en la Figura 7.18, estas presentaron un desempeño muy similar para los tres agregados, siendo la bauxita calcinada el material con menor desgaste, seguido nuevamente por la escoria de cobre y la gravilla del río Aconcagua.

Para el caso de las emulsiones asfálticas el desgaste mostrado por la escoria de cobre indica que este material no posee una buena adherencia con estos ligantes, puesto que los valores obtenidos fueron de 3606 y 4480 para la emulsión CRS-2 tradicional y CRS-2 elastomérica respectivamente. Es importante mencionar que los valores de desgaste mostrados por las combinaciones de sellos “gravilla- emulsiones” indican claramente que este agregado posee buena adherencia con estos tipos de ligantes, y es este uno de los motivos por los cuales se utiliza frecuentemente para los tratamientos superficiales.

Realizando una comparación exclusivamente de las emulsiones asfálticas utilizadas, y en base a los resultados obtenidos de todas las probetas ensayadas, se puede decir que la emulsión asfáltica CRS-2 tradicional en conjunto con los tres agregados presentó mejores resultados que las probetas confeccionadas y ensayadas con la emulsión CRS-2 elastomérica, pero en base a la inspección visual y deterioro de las probetas finalizados los ensayos, es preciso mencionar que todas presentan grandes desprendimientos de agregado en zonas locales. El estado físico de estas probetas se muestra en la Figura 7.19.

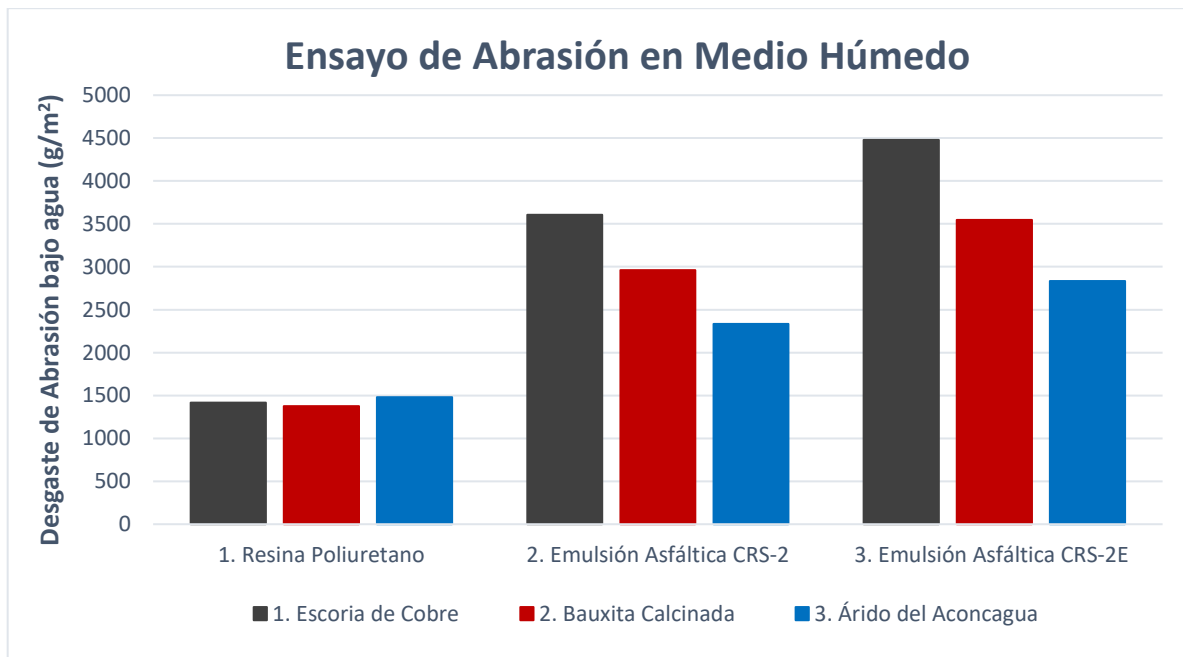


Figura 7.18- Gráfico de Resultados del Ensayo de Abrasión en Condiciones Húmedas.

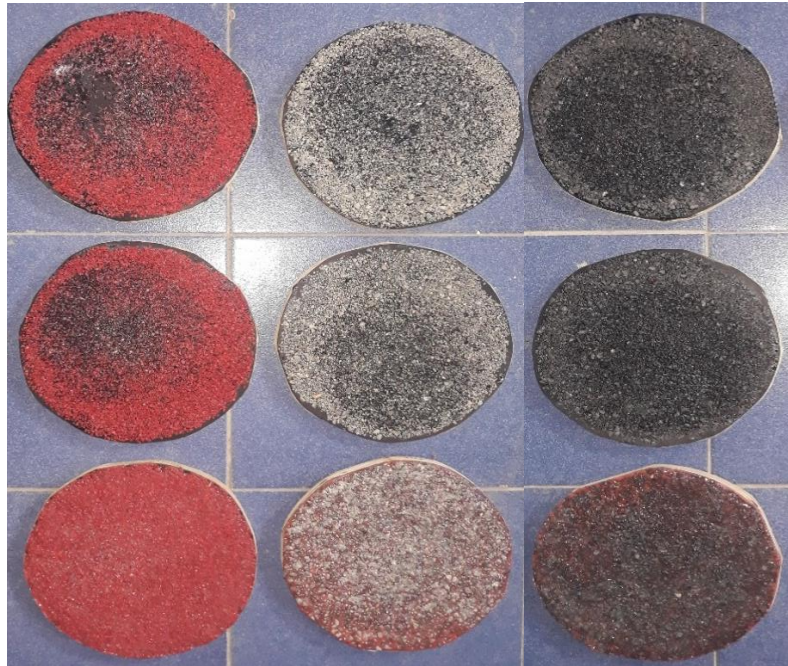


Figura 7.19- Condiciones de las Probetas posterior al Ensayo de Abrasión en Condiciones Húmedas.

En resumen, tanto el ensayo de rueda cargada como el ensayo de Abrasión en Medio Húmedo efectuado en condiciones secas y húmedas, entregó como vencedor entre los tres ligantes empleados a la resina de poliuretano, ya que este ligante en combinación de los tres agregados pétreos presento sellos de alta fricción con mejor adherencia y resistencia a la abrasión, a diferencia de las emulsiones asfálticas, cuyo desempeño no logro mantener en condiciones óptimas a las probetas, provocando un desgaste elevado y desprendimiento del material.

La Figura 7.21 muestra una comparativa de los resultados obtenidos en los ensayos en condiciones secas y húmedas, y se aprecia que las probetas sometidas a un ambiente mojado o húmedo entregó cifras mayores a aquellas ensayadas en seco, esto puede ser causado por el fenómeno de “*Stripping*”. Este fenómeno sucede cuando el ligante (comúnmente en emulsiones y cementos asfálticos) se rigidiza en presencia de agua, lo que conlleva a una contracción y por ende una separación con el agregado, disminuyendo la superficie de contacto entre estos dos materiales [54]. La Figura 7.20 muestra una noción del efecto producido por este fenómeno.

En base a los resultados obtenidos por la escoria de cobre, se observa que posee un buen comportamiento con la resina de poliuretano, tanto en condiciones secas y húmedas, pero no así en el caso de las emulsiones asfálticas cuyos valores indican que estos ligantes no calificarían como alternativa duradera para ser usados como Sellos de alta fricción.



Figura 7.20- Fenómeno de Contracción de las Emulsiones denominado “*Stripping*”.

Comparación Ensayo de Abrasión en Medio Seco y Húmedo

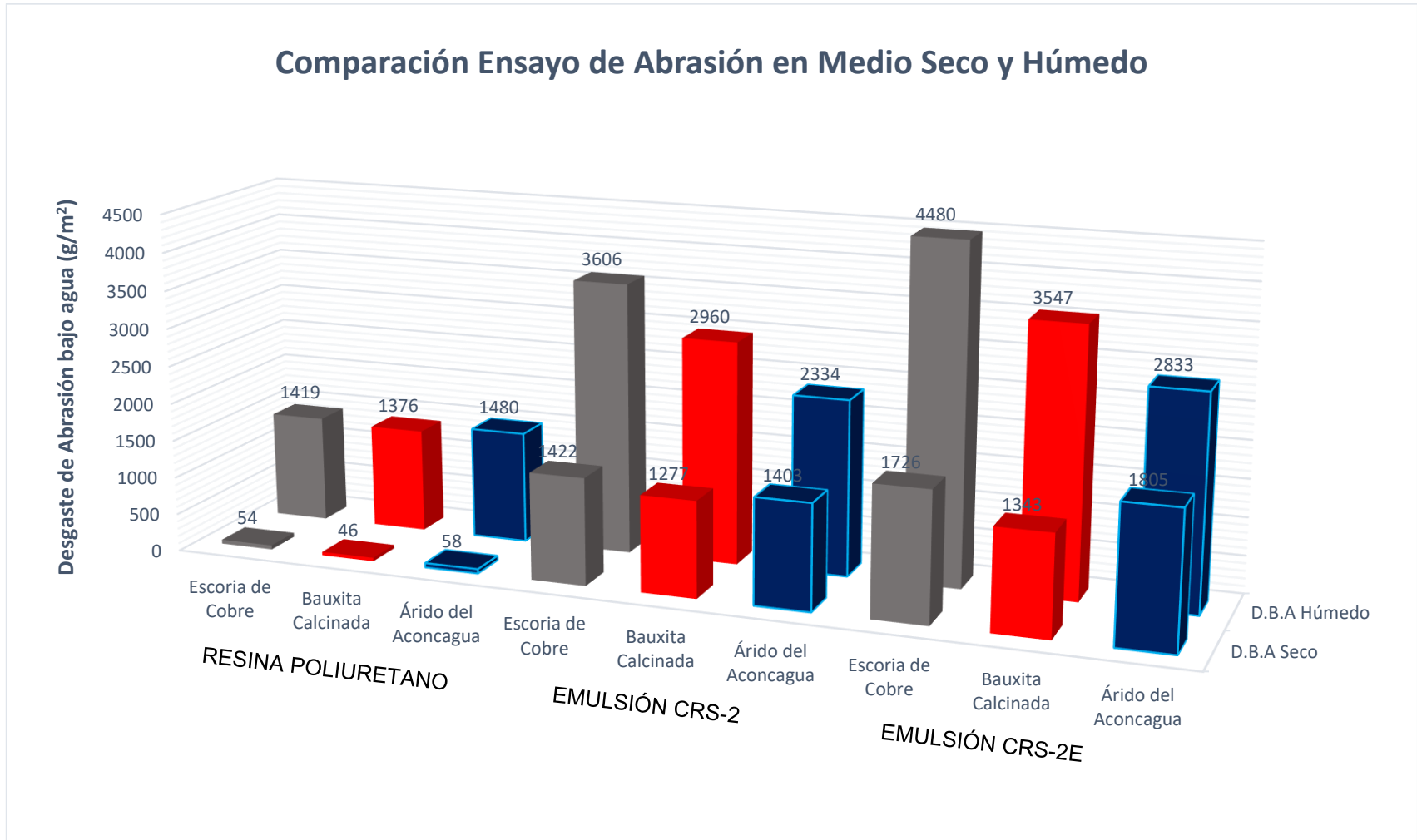


Figura 7.21- Comparación de Resultados del Ensayo de Abrasión en Condiciones Húmedas y Secas para los tres Ligantes en conjunto con los tres Agregados Utilizados.

7.6. Evaluación de la Micro y Macro Textura de la Escoria de Cobre y los otros Agregados.

7.6.1. Determinación de la Resistencia al Deslizamiento Utilizando el Péndulo Británico.

En esta sección, se confeccionarán probetas utilizando el ligante de mejor desempeño en las pruebas de desgaste y abrasión. Estos especímenes serán sometidos nuevamente a los ensayos de la rueda cargada y abrasión en medio húmedo, simulando en teoría el desgaste que puede generar los neumáticos sobre el pavimento, por ende, las probetas tendrán las mismas dimensiones inicialmente. Sin embargo, al momento de medir la resistencia al deslizamiento posterior al desgaste producido por las máquinas será necesario confeccionar probetas cuya superficie sea menor (para el caso de las probetas de la rueda cargada). Además, en esta sección se realizará una corrección para los valores obtenidos en el péndulo británico, cuyo factor depende de la temperatura del agua.



Figura 7.22- Instrumento: "Péndulo Británico".

DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO:

Este ensayo consiste en medir la pérdida de energía de un péndulo de características conocidas, provisto en su extremo de una zapata de goma cuyas dimensiones son 76,2 mm de longitud, 25,4 mm de ancho y 6,5 mm de espesor. Una de las aristas de esta goma roza con una presión determinada sobre la superficie a ensayar y en una longitud fija. La pérdida de energía refleja las características antideslizantes de la superficie y se mide por el complemento del ángulo de oscilación del péndulo. En la Figura 7.22 se aprecian las características generales de este instrumento de medición.

Estas medidas pueden emplearse para medidas en pavimentos de edificaciones industriales, ensayos de laboratorio de probetas, baldosas o cualquier tipo de muestra de superficie plana terminada [4].

PROCEDIMIENTO.

El procedimiento para realizar correctamente este ensayo consiste en primera instancia en el ensamblado del instrumento. En este punto se verifica la nivelación y calibración de los tornillos del aparato, además se ajusta la altura vertical y el posicionamiento de las probetas, con el propósito de asegurar un recorrido del péndulo lo más fluido posible. Las especificaciones técnicas y detalles de calibración se encuentran en el capítulo 8.502.16 del Volumen 8 del Manual de Carretera.

Una vez realizados los procedimientos anteriores, se procede a realizar el ensayo, aplicando la siguiente secuencia en cada medición:

- Llevar el brazo y la aguja a la posición horizontal.
- Esparcir suficiente agua sobre la superficie a medir y sobre la zapata de goma. Se recomienda utilizar para ello un dispositivo rociador. Se debe registrar la temperatura del agua para cada medición.
- Se sujeta el péndulo con una ligera presión de la mano izquierda sobre la parte superior de la columna vertical, con el propósito de evitar movimientos o vibraciones en la base del instrumento.
- Presionar el pulsador de disparo, lo que suelta el brazo libremente. Posteriormente, se recoge el brazo oscilante en su recorrido de regreso antes de que pase por la posición vertical y de este modo evitar el arrastre de la aguja indicadora.
- La posición de la aguja indicará el valor obtenido en el ensayo.
- La primera medición se ejecuta sin registrar el dato.
- Luego, se ejecutan 5 mediciones consecutivas.
- Se verifica la tolerancia, en donde un solo valor de las cinco mediciones se elimina si este está fuera del rango, sin embargo, si existen 2 o 3 mediciones fuera de rango, el ensayo se repetirá nuevamente con 5 mediciones nuevas.

CÁLCULOS.

Los cálculos para determinar el BPN promedio se realizan usando la ecuación 7.7:

$$BPN = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n BPN_i \quad (\text{Ec. 7.7})$$

En que BPN_i es cada lectura individual y "n" es igual a 4 ó 5.

Estos cálculos también poseen un ajuste por temperatura. Esto sucede cuando las medidas en pavimentos se ven afectadas por las variaciones de temperatura de la zapata y de la superficie ensayada y para asegurar la uniformidad de las medidas en cada probeta los valores de BPN se deben corregir mediante la ecuación 7.8 propuesta por el TRRL⁵, para llevar los resultados a una temperatura de 20°C. (Ver Anexo D.7)

$$F_A = \frac{1}{1 - 0.00525(t - 20)} \quad (\text{Ec. 7.8})$$

⁵ TRRL: Transport and Road Research Laboratory.

Donde

F_A : Factor de ajuste
 t : Temperatura °C

Por lo tanto, el Valor de BPN corregido se determina usando la ecuación 7.9:

$$BPN_A = BPN * F_A(20^\circ C) \quad (\text{Ec. 7.9})$$

Finalmente, los valores de resistencia al deslizamiento de las probetas ensayadas y medidas con el instrumento son el resultado de dividir el valor del péndulo británico entre 100, tal como se muestra en la ecuación 7.10, asegurándose de obtener valores con dos decimales.

$$RD = \frac{BPN_A}{100} \quad (\text{Ec. 7.10})$$

CONFECCIONAMIENTO PROBETAS.

El confeccionamiento de las probetas fue ejecutado de la misma manera que en las secciones anteriores, con solo una singularidad en las probetas hechas para el ensayo de rueda cargada. Se decidió reducir el área impuesta para el sello de alta fricción, adaptándose al ancho de la rueda de carga, y de este modo generar un desgaste localizado en una franja de 2,5 cm de ancho, con el fin de medir la micro textura con el péndulo británico sin alteraciones. En las Figuras 7.23.A y 7.23.B se aprecia la forma final de las probetas con forma circular y rectangular.

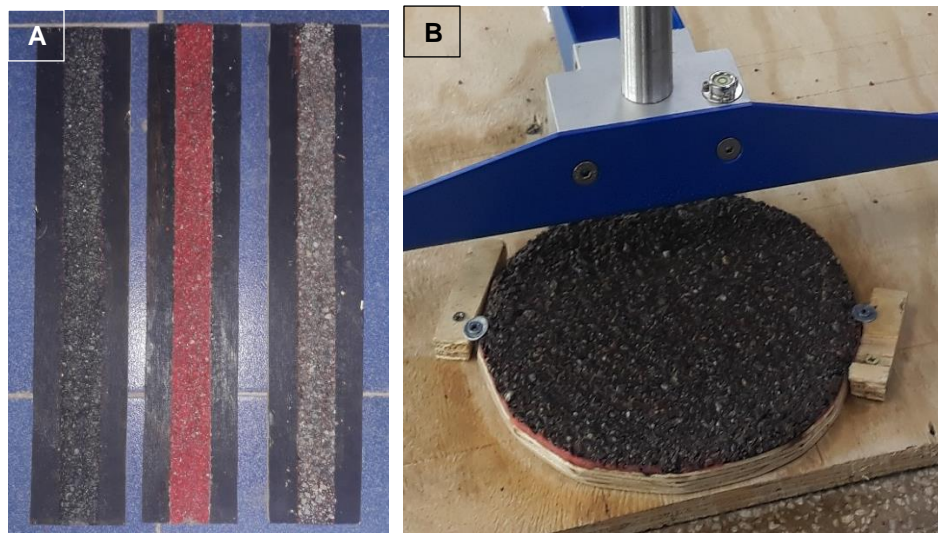


Figura 7.23- A) Probetas para Ensayo de Rueda Cargada y B) Abrasión en Medio Húmedo.

RESULTADOS.

- **Resultados de probetas ensayadas en rueda cargada.**

La evaluación de las probetas ensayadas en la máquina de rueda cargada consistió en registrar la masa de estas, antes, después 1000 pasadas de rueda y posterior a 2000 pasadas de rueda, y de esta manera visualizar el porcentaje de pérdida de agregado. Los resultados mostrados en la Tabla 7.8 indican que el porcentaje de pérdida fue despreciable para todos los especímenes ensayados, cuyos valores no superaron el 1% respecto a la masa inicial.

a) Pérdida de agregado

Tabla 7.8- Porcentaje de Pérdida de Agregado para 1000 y 2000 pasadas de Rueda en la Máquina de Rueda Cargada.

Promedios de Pérdida de agregado		P 1000	P2000
		[%]	[%]
1	Escoria de cobre	0,33	0,49
2	Bauxita Calcinada	0,20	0,32
3	Árido del Aconcagua	0,31	0,43

Al momento de medir la micro textura usando el Método del Péndulo Británico considerando los aspectos y recomendaciones entregados en el Volumen 8 del Manual de Carretera, se observa en la Figura 7.24 que los resultados poseen un descenso a las 1000 pasadas de rueda, sin embargo, los valores medidos a las 2000 pasadas de rueda registran un aumento en la resistencia al deslizamiento. Este fenómeno suele suceder debido a que al principio los agregados aplicados sobre el ligante no experimentan ningún desprendimiento, pero después de los 1000 ciclos de rueda, algunas partículas pierden adherencia con el ligante, generando pequeñas alteraciones en las lecturas de resistencia al deslizamiento, posteriormente a los 2000 ciclos de rueda estos valores aumentan, ya que el peso generado por la rueda moldea las partículas evitando de este modo el desprendimiento de estas.

b) Micro textura

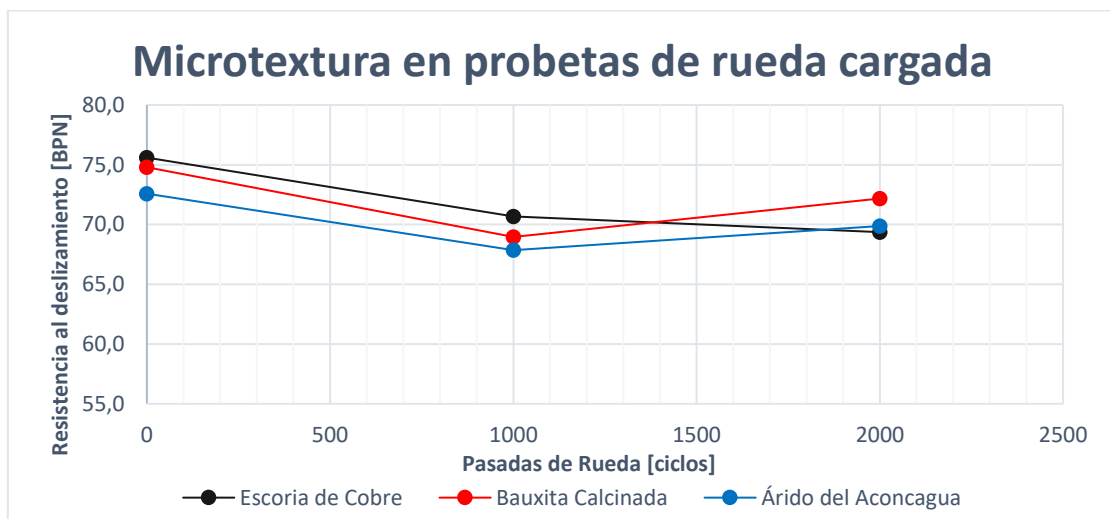


Figura 7.24- Mediciones de Resistencia al Deslizamiento en Probetas Ensayadas en la Rueda de Carga.

De la Figura 7.24, es importante mencionar que los tres sellos de alta fricción confeccionados con distintos agregados presentan inicialmente una resistencia al deslizamiento superior a 65 BPN, esta cifra es el requisito mínimo indicado por el Manual de Carreteras Volumen 5, sección 5.422 para sellos de alta fricción. Además, se aprecia que el sello creado con la escoria de cobre posee una tendencia casi lineal y que antes de los 1400 ciclos de rueda su resistencia al deslizamiento presentaba las cifras más altas. Luego, estos valores disminuyeron considerablemente en relación con aquellos mostrados por la bauxita calcinada, la cual mantuvo una resistencia muy similar a las mediciones iniciales. La misma situación sucedió para el árido del Aconcagua, donde se vio un descenso a los 1000 ciclos y luego un aumento luego de los 2000 ciclos sin cambiar en gran medida las cifras iniciales de resistencia. (Ver Anexo E.7.1)

Observación: Algunas probetas sometidas a 2000 pasadas de rueda, presentaron un deterioro del sello. En estas se logra observar una pérdida de adherencia entre la superficie imprimada y capa superficial del SAF. Esta singularidad también se puede apreciar en las rutas con SSAF aplicados, donde circulan vehículos de gran tamaño y que además ya han cumplido con su vida útil. El detalle se muestra en la Figura 7.25.



Figura 7.25- Falla Presentada en algunas Probetas, debido a la falta de Adherencia y Ahuellamiento.

- **Resultados de probetas ensayadas a máquina de abrasión.**

- a) Abrasión

Tabla 7.9- Resultados de Abrasión en probetas sometidas a abrasión en un medio húmedo y seco.

Valores promedios de abrasión	D.B.A	Valores promedios de abrasión	D.S.A
“Condiciones Húmedas”	[g/m ²]	“Condiciones Secas”	[g/m ²]
1 Escoria de cobre	1103,6	Escoria de cobre	102,9
2 Bauxita Calcinada	1360,2	Bauxita Calcinada	51,1
3 Árido del Aconcagua	1534,2	Árido del Aconcagua	114,8

La abrasión presentada por las probetas ensayadas en condiciones húmedas y secas se muestran en la Tabla 7.9. En ésta, se observa una tendencia similar que aquellas probetas ensayadas en la sección 7.5.2 y 7.5.3, donde los valores de abrasión fueron mayores cuando los especímenes eran sometidos a un ambiente húmedo, con cifras mayores a 1000 g/m². La abrasión a la cual fue sometido el sello conformado por escoria tuvo mejores resultados en un ambiente húmedo, puesto que en condiciones secas dobló los resultados de la bauxita calcinada, este aspecto puede ser un indicio de que la escoria puede ser un material apto para los sellos de alta fricción, puesto que además presenta bajos porcentajes de absorción.

b) Micro textura de Probetas ensayadas en “Condiciones Húmedas”

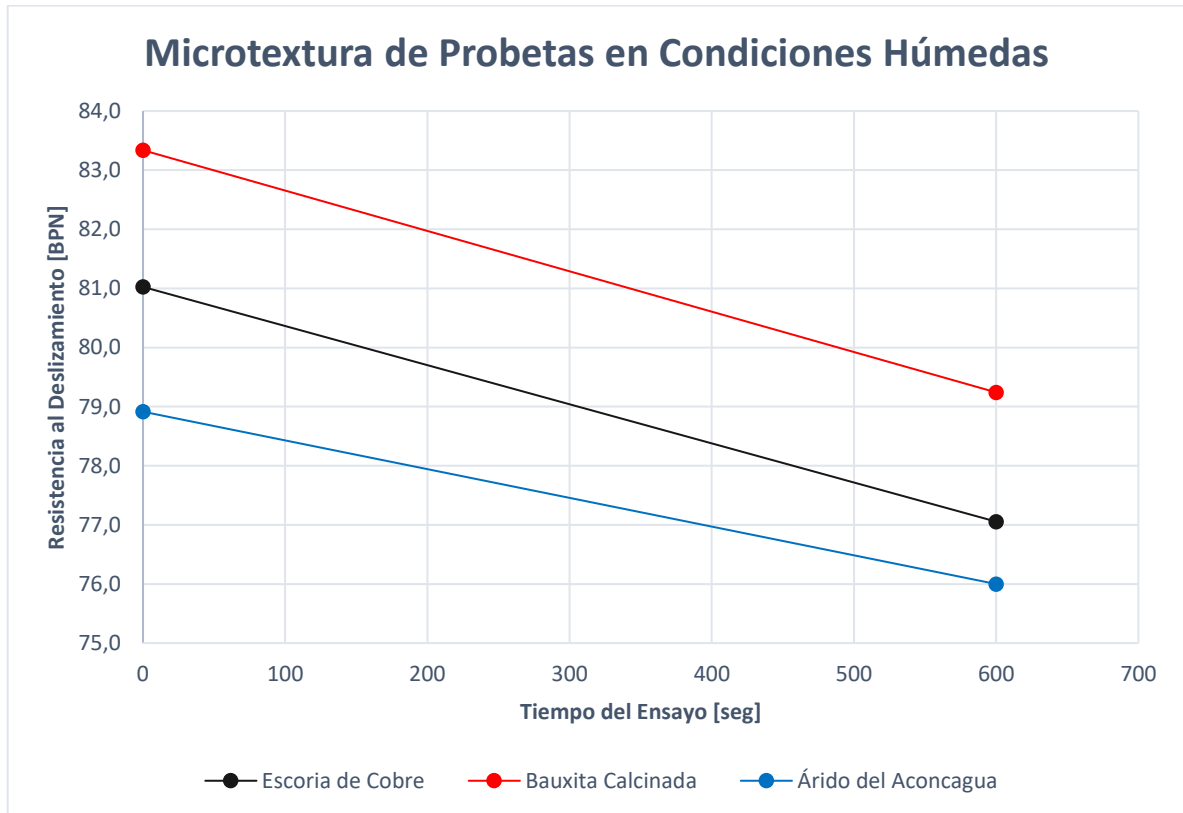


Figura 7.26- Resistencia al Deslizamiento en Probetas Sometidas a Abrasión en Medio Húmedo.

De la Figura 7.26 se observa que la resistencia al deslizamiento de la escoria de cobre disminuyó en un 4,82% luego de ser sometida a 10 minutos en la máquina de abrasión. Valor similar presentó la bauxita calcinada con un 4,92% de disminución en su resistencia al deslizamiento. Por último, el árido del Aconcagua presentó una disminución del 3,67%, dicho valor es inferior a los otros dos, pero es importante tener en cuenta que este agregado posee las cifras más bajas. De todas maneras, los tres agregados estudiados y medidos con el péndulo británico superan el requisito mínimo establecido por el Manual de Carretera Volumen 5.

c) Micro textura de probetas ensayadas en “Condiciones Secas”

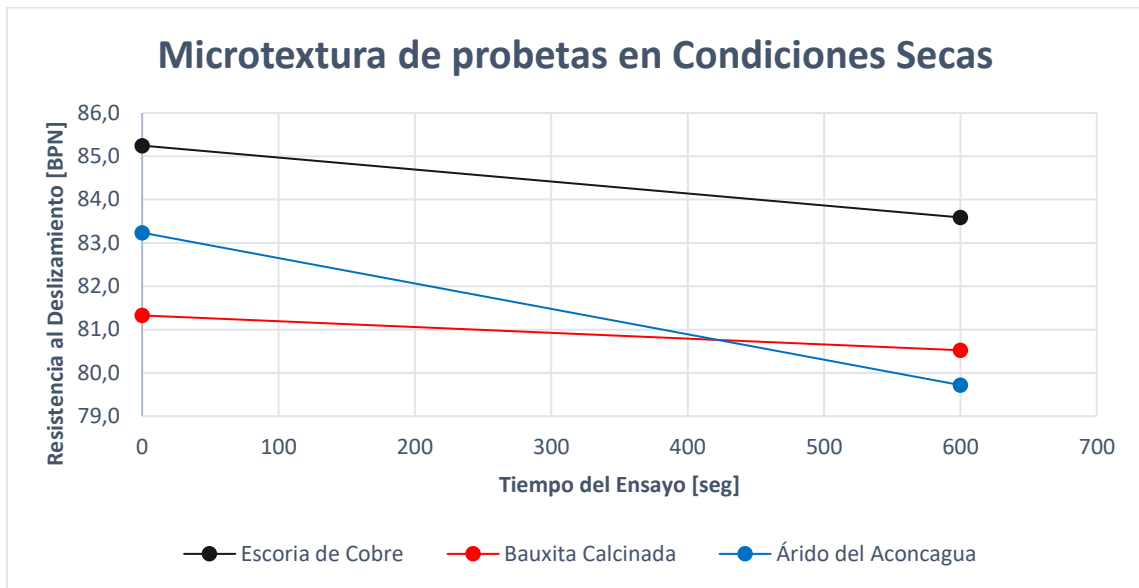


Figura 7.27- Resistencia al Deslizamiento en Probetas Sometidas a Abrasión en Medio Seco.

La Figura 7.27 muestra los resultados de aquellas mediciones realizadas a las probetas que fueron sometidas a la máquina de abrasión, pero en condiciones secas. Al visualizar la forma decreciente de las rectas, se observa que la pendiente de la recta de aquellas probetas confeccionadas con escoria de cobre tiende a ser similar a la pendiente de las probetas hechas con bauxita calcinada, dicho comportamiento puede indicar que los sellos de escoria de cobre presenten características friccionales iguales que los sellos de bauxita calcinada bajo las mismas condiciones de desgaste y abrasión.

Observación: Las probetas creadas para ser ensayadas en la máquina de abrasión fueron sometidas a 2 periodos de 5 minutos cada uno, dando un total de 10 minutos. El motivo de realizar estos dos periodos fue porque en base a la inspección visual de las probetas confeccionadas con la Resina de Poliuretano de las secciones 7.5.2 y 7.5.3, estas no presentaron una variación significativa en la superficie desgastada cuando eran sometidas a un solo período. Sin embargo, a los 10 minutos fue posible observar un pulimento de los agregados, pero en consecuencia las gomas utilizada en el ensayo sufrieron un desgaste severo. Las condiciones de estas gomas se visualizan en la Figura 7.28.



Figura 7.28- Desgaste excesivo de Gomas Utilizadas en la Máquina de Abrasión.

7.6.2. Determinación de la Macro Textura Utilizando el Circulo de Arena.

La macro textura será medida usando el círculo de arena o también denominado mancha de arena. Este instrumento es el que se muestra en la Figura 7.29 y con este se determinará la macro textura de las probetas del ensayo de abrasión en medio húmedo y seco. El área donde será medida la macro textura ronda los 18 centímetros de diámetro.

Para el caso de las probetas que se utilizan en el ensayo de rueda cargada la superficie no permite realizar este ensayo de manera correcta, dadas las dimensiones que poseen estas probetas.



Figura 7.29- Instrumento para Medir la Macro Textura (Circulo de Arena).

DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO:

Este ensayo describe el procedimiento para determinar la profundidad de la macro textura de la superficie de un pavimento, mediante la aplicación de un volumen conocido de material y la subsecuente medición del área total cubierta por éste. Este método está sólo pensado para obtener un valor promedio de la profundidad de textura y no se considera sensible a la micro textura de las superficies del pavimento [4].

PROCEDIMIENTO.

El procedimiento consiste en esparcir un volumen de material conocido sobre una superficie de pavimento limpia y seca, midiendo el área cubierta, y posteriormente, calcular el promedio de profundidad entre la parte inferior de los huecos en la superficie y las partes más altas de los áridos de superficie de los pavimentos. Esta medición de la profundidad de textura refleja las características de macro textura. De esta manera se podrá medir dichos valores en las probetas circulares creadas para el ensayo de abrasión en medio húmedo.

En primera instancia, se medirá la profundidad de textura de las probetas antes de ser sometidas al ensayo de abrasión, luego se repetirán las mediciones de estas posterior a dos ciclos de ensayos, lo que corresponde a 10 minutos de contacto entre la goma y la superficie, además, se registrarán las pérdidas de agregado antes y después de dicho ensayo.

MATERIALES.

- Arenas normalizadas, con material retenido en tamiz N°100 y que pasa el tamiz N°80 o con material retenido en tamiz N°200 y que pasa tamiz N°100.
- Cilindro contenedor de material, con un volumen predeterminado de al menos 25000 mm³
- Disco plano y rígido de espesor 25 mm y entre 60 y 75 mm de diámetro, este disco debe contener una cubierta de goma lisa en la parte inferior.
- Escobilla, para limpiar superficie a medir.
- Regla, de al menos 300 mm de longitud.
- Balanza con precisión a 0,1 g.

CALCULOS.

Los cálculos por considerar para la medición mediante este método son los mostrados en las ecuaciones 7.11 y 7.12:

- Volumen del Cilindro

$$V_c = \frac{\pi * d^2 * h}{4} \quad (\text{Ec. 7. 11})$$

- Profundidad media de macro textura

$$MTD = \frac{4 * V}{\pi * D^2} \quad (\text{Ec. 7. 12})$$

V_c : Volumen interno del cilindro en mm³.
d : Diámetro interno del cilindro en mm.
h : Altura del cilindro en mm.
MTD : Profundidad media de macro textura en mm.
V : Volumen de arena utilizada en mm³.
D : Diámetro promedio del área cubierta por la arena en mm.

RESULTADOS.

a) Macro textura de probetas sometidas a abrasión en “Condiciones Húmedas”

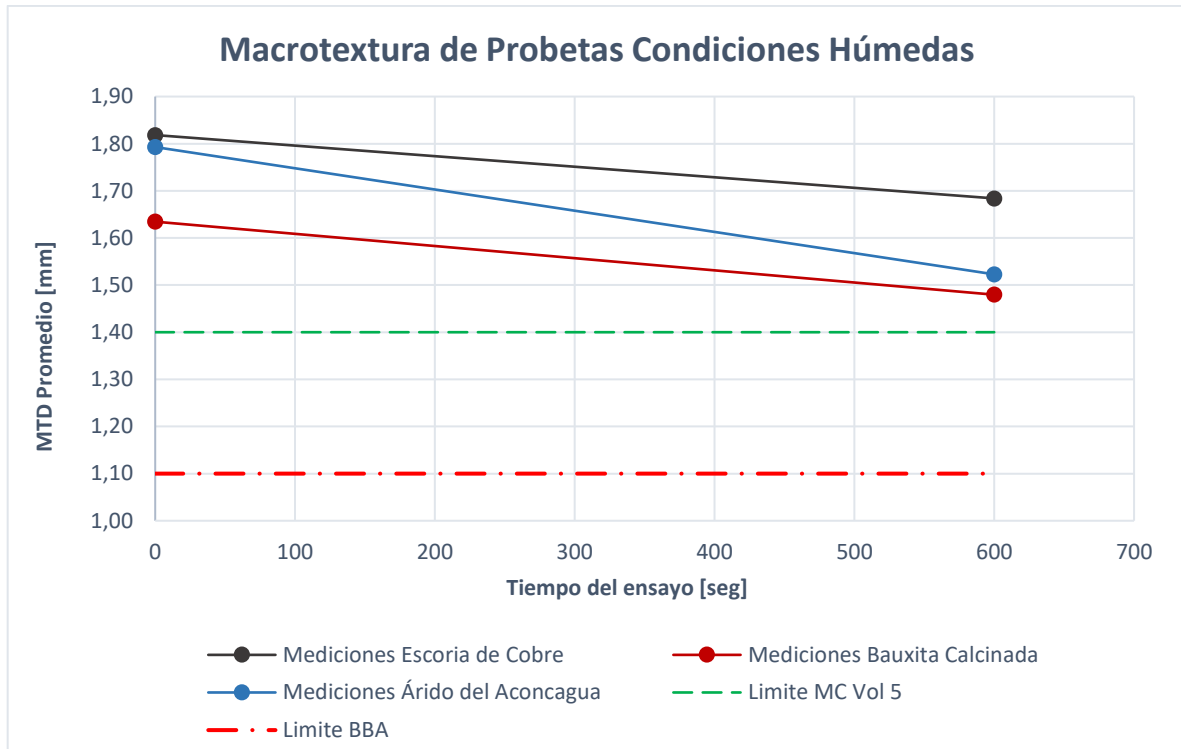


Figura 7.30- Profundidad de Textura (Macro Textura) de Probetas Sometidas a Abrasión en Medio Húmedo.

La profundidad de textura obtenida de las probetas sometidas a una abrasión en condiciones húmedas se aprecian en la Figura 7.30, en esta se muestra a grandes rasgos tres sellos de alta fricción que cumplen con los requisitos iniciales mínimos de macro textura establecidos en el Manual de Carretera Volumen 5, y además, se observa que después de los 2 periodos de abrasión la textura de estos sellos permaneció sobre el límite del M.C y el límite requerido por la BBA para sellos sometidos a 100.000 pasos de rueda.

Además, se aprecia una macro textura inicial mayor para el sello que contiene escoria de cobre y árido del Aconcagua, esto se debe a que podrían existir dentro de la granulometría partículas sobre 3,5 mm que generarían una superficie de mayor espesor. Posterior a los dos periodos, la máquina de abrasión producto de su movimiento orbital, se encargó de desprender algunas de estas partículas, viéndose los efectos en la disminución de la macro textura en los sellos conformados por el árido del Aconcagua. En cuanto a los sellos conformados por escoria de cobre, al compararlos con la curva de los sellos de bauxita calcinada, se logra apreciar una tendencia muy similar. Esto indicaría que la escoria de cobre es un material con gran resistencia a la abrasión al igual que la bauxita calcinada. Otro aspecto positivo, es la buena adherencia entre la escoria y la resina de poliuretano, ya que los resultados mostraron una pequeña pérdida de agregado y un bajo deterioro de las probetas al ser sometidas al ensayo en condiciones húmedas.

b) Macro textura de probetas sometidas a abrasión en “Condiciones Secas”

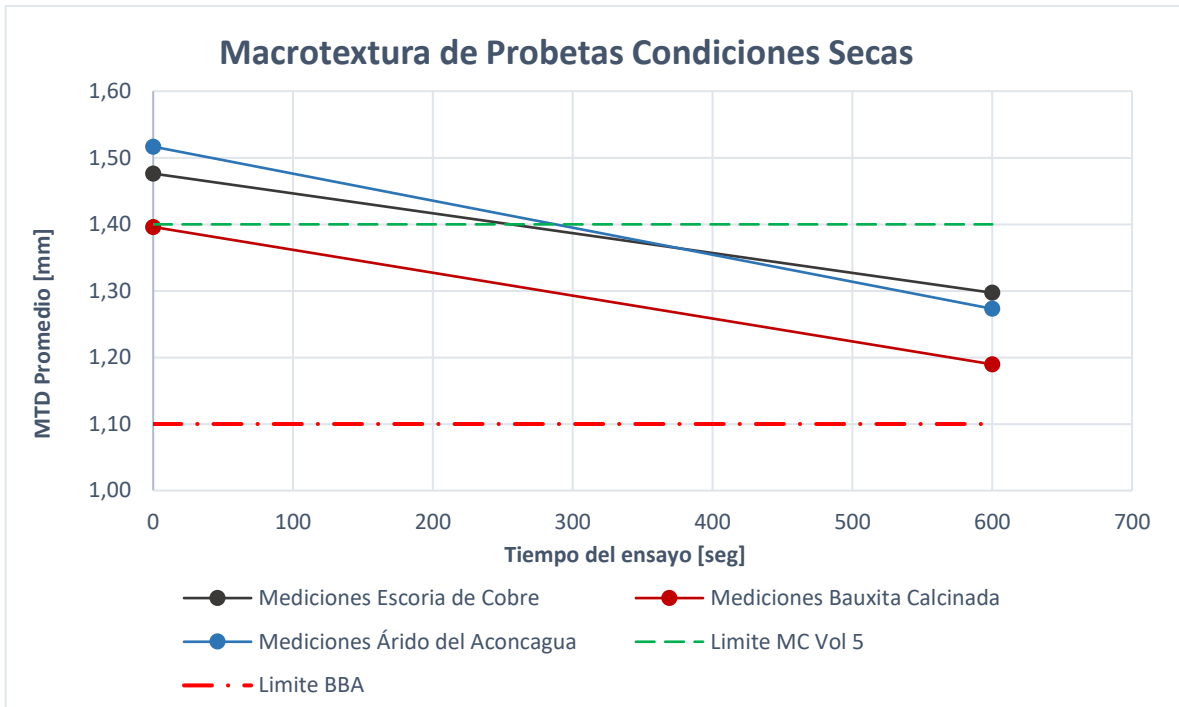


Figura 7.31- Profundidad de Textura (Macro Textura) de Probetas Sometidas a Abrasión en Medio Seco.

La macro textura presente en las probetas sometidas a abrasión en condiciones secas, mostraron profundidades de texturas menores que aquellas ensayadas en condiciones húmedas, esta diferencia solo se debe a la cantidad de ligante utilizado, puesto que en estas probetas la tasa de aplicación de la resina de poliuretano fue mayor. Esta diferencia es netamente una consecuencia de la confección de las probetas y no de la granulometría de los materiales.

Los tres Sellos que se muestran en la Figura 7.31 poseen una profundidad de textura inicial igual o superior al requisito mínimo del M.C. asimismo, se observa que los sellos conformados por escoria de cobre presentan un descenso en su textura superficial similar al presentado por el sello de bauxita calcinada, esta particularidad también se vio reflejada en la macro textura de las probetas ensayadas en condiciones húmedas.

Estos resultados de micro y macro textura son importantes al momento de clasificar a estos Sellos como superficies de alta fricción, puesto que es posible determinar con ellos el índice de fricción internacional (IFI) y de esta manera estimar las propiedades friccionales de un pavimento mejorado con los SSAF para cualquier velocidad bajo condiciones desfavorables (pavimentos mojados).

7.6.3. Cálculo del Índice de Fricción Internacional (IFI).

El índice de fricción internacional, o mejor conocido como IFI, es el segundo de una larga lista de indicadores internacionales que definen el estado de una carretera. El uso de este índice presenta la gran ventaja de permitir la comparación entre los pavimentos empleados en cualquier país del mundo y, por lo tanto, el intercambio de información entre profesionales y las administraciones.

El IFI se puede describir como una escala de referencia, de aplicación internacional de la fricción y de la textura de un pavimento, y viene indicado por dos números expresados entre paréntesis separados por una coma, el primero representa la fricción y el segundo la macro textura. El término de textura hace referencia a la geometría más fina del perfil longitudinal de una carretera. Según la definición entregada por la AIPCR⁶ este índice corresponde a las irregularidades cuya longitud de onda se encuentra entre 0 y 0,5 m y a estas longitudes de onda les corresponden amplitudes que suelen variar entre 0 y 20 mm [41].

Estudios realizados han demostrado que para interpretar los fenómenos que suceden cuando existe contacto neumático- pavimento y que están asociados a situaciones de riesgo durante las operaciones de frenado en pavimentos mojados, es conveniente clasificar la textura en tres tipos: mega textura (amplitudes 0,1-50 mm), macro textura (amplitudes 0,01-20 mm) y micro textura (amplitudes 0,001-0,5 mm) [41].

La necesidad de representar en un solo índice las características relacionadas con la seguridad vial en condiciones de frenado han llevado a representar el IFI por dos números procedentes de dos medidas, una de fricción y la otra de macro textura. De este modo, el modelo presentado por la AIPCR, que relaciona la fricción con la velocidad de desplazamiento, ha servido para estimar constantes de referencias, tales como: la velocidad (S_p) y la fricción a 60 [km/hr] (F_{60}). Estos dos parámetros permiten calcular el valor de fricción $F(S)$ a cualquier velocidad de desplazamiento mediante las ecuaciones 7.13, 7.14, 7.15 y 7.16 [41].

- Constante “ S_p ” de la Velocidad:

$$S_p = a + b * T_x \quad (\text{Ec. 7.13})$$

Donde

- a : Constante dependiente del método utilizado para medir la macro textura (círculo de arena a= -11.6)
- b : Constante dependiente del método utilizado para medir la macro textura (círculo de arena b= 113.6)
- T_x : Lectura realizada con el círculo de arena en mm.

⁶ AIPCR: Asociación Internacional Permanente de Congresos de Carreteras.

- Constante de la medida de fricción a los 60 km/hr (FR60):

$$FR60 = FRS * e^{\frac{S-60}{Sp}} \quad (\text{Ec. 7. 14})$$

Donde

- Sp : Constante de velocidad.
- S : Velocidad del equipo de ensayo para el péndulo británico (S= 10 km/hr)
- FRS : Lectura realizada con el péndulo británico.

- La constante de fricción a 60 km/hr (F60) se determina a partir de la ecuación 7.15:

$$F60 = A + B * FR60 \quad (\text{Ec. 7. 15})$$

Con

- A : Constante ligada con el equipo para medir la fricción para péndulo británico A=0,056.
- B : Constante ligada con el equipo para medir la fricción para péndulo británico B=0,008.

- La ecuación 7.16 se utiliza para obtener el IFI a cualquier velocidad de desplazamiento F(S):

$$F(S') = F60 * e^{\frac{60-S'}{Sp}} \quad (\text{Ec. 7. 16})$$

Con

- F60 : Constante de fricción a 60 km/hr.
- S' : Velocidad de desplazamiento en km/hr.
- Sp : Constante de velocidad.

Estas ecuaciones serán aplicadas utilizando los resultados obtenidos en las mediciones realizadas con el péndulo británico y el círculo de arena, para aquellas probetas sometidas a la máquina de abrasión en condiciones húmedas y secas. Para estas mediciones se elaborará una ecuación F(S) para los valores de antes y después del ensayo de abrasión, para ambas condiciones y tipo de agregado.

Las Figuras 7.32 y 7.33 muestran las curvas IFI (F60 vs S') para los distintos sellos confeccionados con diferentes agregados, en estas es posible apreciar el comportamiento descendente de la fricción al aumentar la velocidad de los vehículos en condiciones de pavimento mojado.

7.6.3.1. Curva IFI para probetas sometidas a abrasión en medio húmedo.

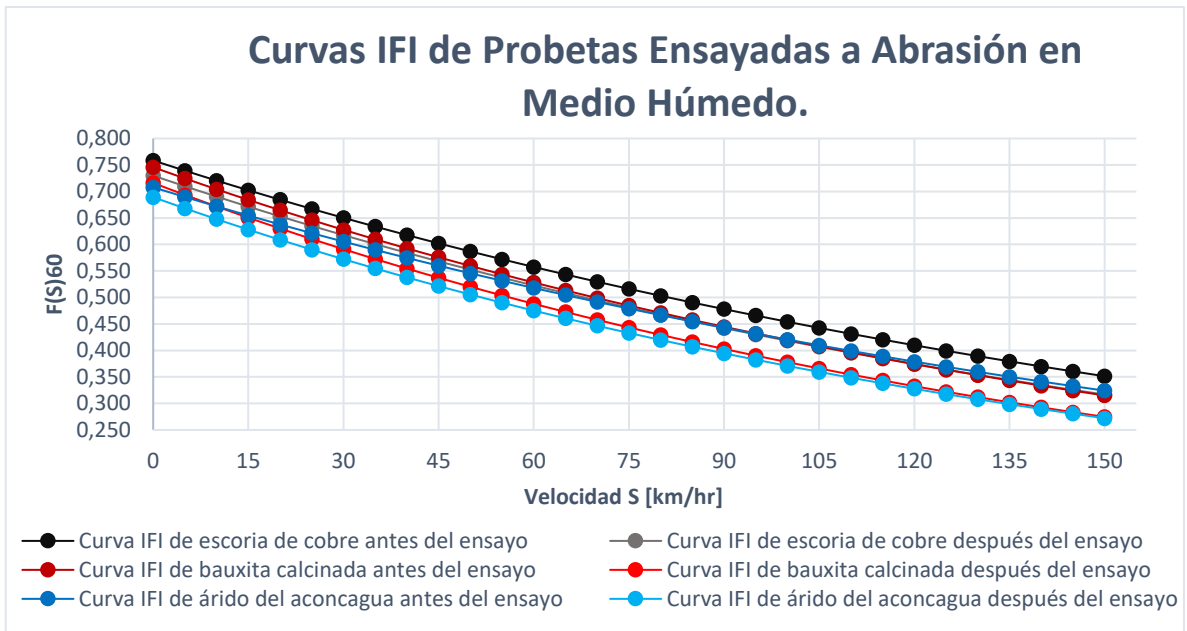


Figura 7.32- Curvas IFI de Probetas de Abrasión en Condiciones Húmedas.

7.6.3.2. Curva IFI para probetas sometidas a abrasión en medio seco.

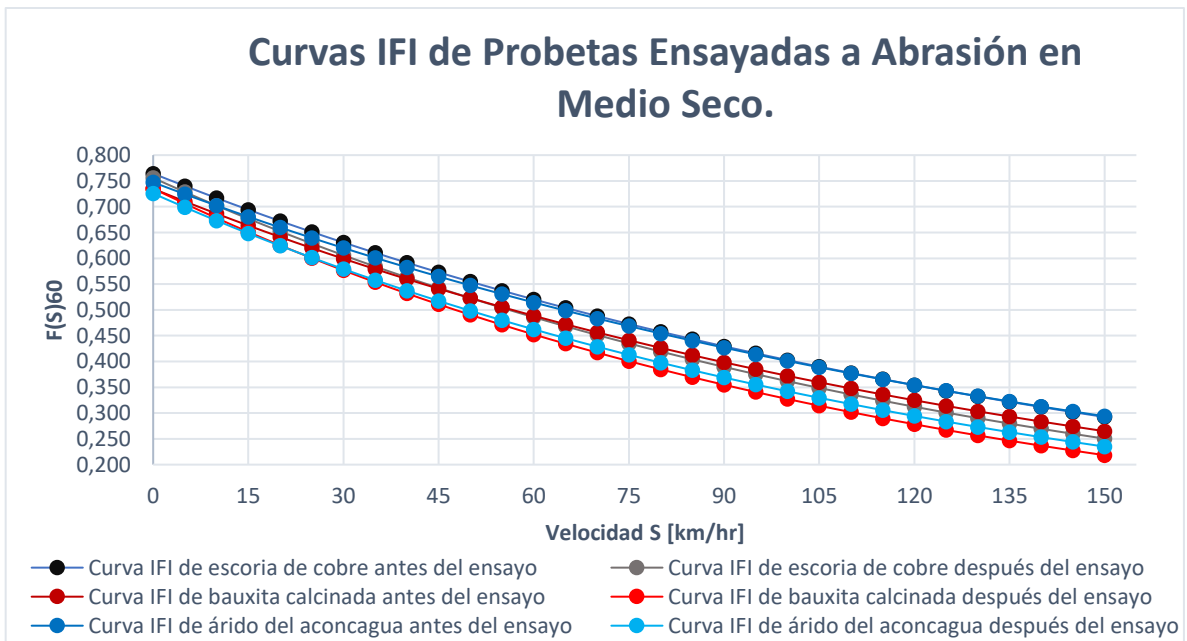


Figura 7.33- Curvas IFI Probetas de Abrasión en Condiciones Secas.

De las curvas IFI calculadas a partir de los valores de micro y macro textura se logra apreciar que la fricción de las probetas creadas con los distintos sellos de alta fricción, poseen un comportamiento muy similar entre sí, para ambas condiciones de ensaye (húmedo y seco). Sin embargo, comparando ambos gráficos se logra observar que en las condiciones húmedas los valores de fricción (F60) poseen un margen más amplio que aquellos mostrados en el ensaye en condiciones secas, puesto que los valores de fricción difieren en 0,06 aproximadamente entre la curva IFI de la escoria de cobre antes del ensayo y la curva IFI del árido del Aconcagua después del ensayo.

A grandes rasgos se aprecia que todas las curvas IFI determinadas tienen un comportamiento similar para los tres agregados usados en este estudio. A partir de la Tabla 7.10 se logra identificar los límites según [55] establecidos para micro y macro textura, y se observa que a partir de una velocidad superior a 70 km/hr aproximadamente, los valores de fricción son considerados malos o prohibidos, independiente de la macro textura superficial del Sello de alta fricción. En un caso muy extremo, en el cual la velocidad supere los 120 km/hr, se produce una pérdida de adherencia entre el neumático y la superficie, debido a la presencia de una lámina de agua y al casi nulo proceso de evacuación del agua que presentan los sellos y las hendiduras de los neumáticos en situaciones de grandes velocidades.

Tabla 7.10- Ejemplo de Límites para Micro y Macro Textura. Fuente [48].

Micro Textura		Macro Textura	
Fricción, Valor de CDR	Evaluación	Textura (mm)	Evaluación
<0,32	Prohibido	<0,43	Prohibido
0,32-0,52	Malo	0,43-0,63	Malo
0,42-0,52	Bueno	0,63-0,83	Bueno
>0,52	Muy Bueno	>0,83	Muy Bueno

8. CAPITULO VIII

Conclusiones

Con respecto al análisis de las componentes de la escoria de cobre como agregado pétreo se puede concluir lo siguiente:

- De los muestreos realizados en el centro de acopio de escoria de cobre, se logró obtener una gran cantidad de árido fino, correspondiente a una granulometría entre 1,3 y 3,5 milímetros. Estas muestras no evidenciaron materiales externos, como sustancias peligrosas, ni suelos de otro material, por lo que se pudo realizar análisis de caracterización y la confección de probetas sin problemas.
- En esta memoria de título, la escoria de cobre se analizó en base a algunos ensayos descritos en el Volumen 8 del Manual de Carretera. De los resultados obtenidos, aquellos pertenecientes a la escoria de cobre entregaron valores similares al agregado de bauxita calcinada. En estos destaca la densidad, con valores sobre los 3000 kg/m³ y la baja absorción.

Con respecto a los ensayos de desgaste y abrasión para los sellos diseñados con los agregados y ligantes se tienen las siguientes conclusiones:

- El diseño de sellos de alta fricción con escoria de cobre como agregado presentó un bajo porcentaje de pérdida másica en los ensayos de desgaste y abrasión en condiciones secas, sin embargo, en condiciones húmedas este mostró un incremento para los tres ligantes utilizados, esto indica que la escoria de cobre sin importar el aditivo no posee una buena adherencia en condiciones húmedas.
- Además, se observó que los resultados de las probetas ensayadas en distintas condiciones presenciaron valores muy diferentes, por lo que al analizar detalladamente esta situación se llega a la conclusión que en presencia de un fluido la superficie compuesta por un SSAF sufre mayores daños que en una condición seca. Esto es respaldado por los resultados determinados de aquellos ensayos de rueda cargada y de abrasión, en donde aquellos valores de las probetas diseñadas con resina de poliuretano tuvieron un aumento de 30 veces su desgaste de condiciones secas a húmedas. Por otro lado, las emulsiones asfálticas mostraron un aumento de 2 a 3 veces el desgaste, desde condiciones secas a húmedas. Esta particularidad deja en evidencia que las resinas de poliuretano tienden a presentar fallas en condiciones húmedas o mojadas.

En base al análisis y evaluación del comportamiento de los sellos de alta fricción conformados con los distintos agregados, principalmente de escoria de cobre, se concluye lo siguiente:

- De la comparación realizada entre sellos de alta fricción conformados por escoria de cobre, bauxita calcinada y árido del Aconcagua, destaca la presencia de tres ligantes como aditivo, estos fueron utilizados para confeccionar las probetas que posteriormente se ensayaron. De las combinaciones ligante – agregado se observaron que aquellas probetas conformadas con la resina de poliuretano presentaron un desempeño eficiente sin sufrir daños significativos, esto implica que los SSAF que se implementen con este ligante podrían ofrecer

un producto de mayor duración ante cargas abrasivas repetitivas en comparación con sellos diseñados con emulsiones asfálticas.

- Para el caso de los ligantes, se observaron en este estudio que el desempeño de estos cambia según las condiciones climáticas. Para climas caluroso los sellos compuestos por resina de poliuretano se desempeñan de gran manera, pero si son sometidas a climas con un ambiente húmedo durante un periodo de tiempo prolongado (sur de Chile) su vida útil disminuiría considerablemente, debido al pronto desprendimiento del material. Por este motivo que una opción ante este problema podrían ser las emulsiones asfálticas CRS-2 y CRS-2 elast. usadas para tratamientos superficiales, pues se observaron resultados que abalan un comportamiento menos invasivo cuando estas mezclas eran sometidas a abrasión en medio húmedo con respecto a los resultados en seco.
- El desarrollo de los ensayos para someter a las probetas definitivas a un desgaste tuvo como principal objetivo comparar probetas confeccionadas con un mismo ligante. Estas acciones se cumplieron a cabalidad y permitieron determinar la micro y macro textura mediante dos métodos conocidos. De las mediciones realizadas a los distintos especímenes, se llegó a la conclusión que la resistencia al deslizamiento de los sellos diseñados con escoria de cobre presentó un comportamiento similar a aquellos creados con bauxita calcinada, dada las pendientes de las curvas y la tasa de decaimiento en la micro textura en ambas condiciones (seco y húmedo) que estas mostraron. Para el caso de los sellos de árido del Aconcagua la pendiente de sus curvas, muestran un decaimiento más acelerado en su resistencia al deslizamiento, lo que a largo plazo significaría una gran pérdida de las cualidades friccionales de un sello de alta fricción.

Con respecto al desarrollo de alternativas para el caso que el material propuesto no cumpliera con las expectativas se tiene la siguiente conclusión:

- La escoria de cobre cumplió con todas las expectativas de este estudio. Ésta presentó comportamientos y desempeños adecuados para ser una alternativa de la bauxita calcinada, los resultados de las mediciones de micro y macro textura posteriores a los ensayos de desgaste y abrasión así lo abalan, por este motivo que se decidió concluir estos análisis con la representación de las curvas IFI. La clasificación que entregan las curvas IFI respecto a las propiedades friccionales de un pavimento o sello, permite tener una noción sobre el comportamiento que estos pueden tener bajo diferentes solicitaciones de tráfico vehicular, puesto que en la mayoría de los resultados presentados en las curvas se muestran comportamiento muy parecidos para los tres agregados, tanto para las situaciones iniciales como para un desgaste previo. Del análisis se observó que en ocasiones las propiedades friccionales de los áridos usados como alternativa, fueron mayores a los mostrados por la bauxita, indicando que estos agregados son una opción para una aplicación en sectores de baja demanda

Comentarios

Del análisis y evaluación del comportamiento de los sellos de alta fricción conformados con los distintos agregados se tiene el siguiente comentario:

- Las mediciones de la macro textura de todas probetas sometidas a abrasión presentaron valores iniciales sobre los límites requeridos en Chile según el Volumen 5 del M.C. Algunos valores correspondientes a la escoria de cobre y árido del Aconcagua evidenciaron profundidades de textura superiores a los SSAF de bauxita calcinada, esto se debe a que existían partículas de agregado con dimensiones superiores a 4 milímetros. Si bien se intentó eliminar la gran mayoría de estas, la falta de un tamiz definido para partículas inferiores a 4 milímetros imposibilitó dicha labor. Por este motivo que las texturas iniciales fueron de mayor espesor que aquellas obtenidas de los sellos diseñados con bauxita calcinada.

En lo que respecta a futuras aplicaciones y a la opción de utilizar escoria de cobre para la conformación de sellos de alta fricción se tienen los siguientes comentarios:

- A lo que respecta a una futura aplicación de sellos confeccionados con agregados distintos a la bauxita, se recomienda realizar estudios que provoquen una mayor influencia sobre estos, ya que los ensayos realizados en esta investigación fueron pensados para observar un comportamiento a corto plazo y que además no provocaron grandes cambios físicos sobre las probetas ensayadas. Un aspecto positivo de estos ensayos y mediciones es que permiten analizar y estimar un futuro comportamiento de los diferentes agregados usados en el diseño de estos sellos, y de esta manera dar a conocer las posibles aplicaciones en terreno.
- Las posibles aplicaciones, dependerán de condiciones y factores externos que están ligados con la serviciabilidad de los caminos o carreteras y los distintos climas presentes en cada sector del País. Para sectores de alto tráfico vehicular y que además presenten un gran índice de accidentes, será recomendable usar un SSAF que permita mantener sus propiedades el mayor tiempo posible. Para el caso de sectores en los cuales el tráfico vehicular sea considerado medio o bajo y se presenten condiciones riesgosas, es posible usar como alternativa un SSAF con un agregado diferente. Por este motivo que esta investigación se enfocó principalmente en el uso de alternativas que permitieran reemplazar el agregado de bauxita calcinada por otro árido que tuviera propiedades similares a dicho material.
- La opción de utilizar escoria de cobre en sellos de alta fricción, es recomendable, pero en Chile no existe una institución que certifique el uso de agregados para SSAF, por ende sería necesario un estudio más minucioso y sofisticado para analizar realmente el comportamiento a largo plazo de las alternativas presentadas, pues estos futuros resultados permitirían concluir con mayor precisión si este desecho de Codelco cumple con las características mecánicas y químicas suficientes para reemplazar a la bauxita calcinada en obras pequeñas o en mejoramiento de caminos desgastados con el paso del tiempo. Y de esta manera, disminuir las grandes toneladas de escoria acumuladas, obteniendo este material a un precio despreciable en comparación con los elevados valores comerciales de la bauxita calcinada.

Referencias

- [1] CODELCO, «Informe de Sustentabilidad,» 2018.
- [2] Comisión Nacional de Seguridad de Tránsito, «Estadísticas Generales, Causas de los siniestros (2000-2019),» Diciembre 2019. [En línea]. Available: <https://www.conaset.cl/programa/observatorio-datos-estadistica/biblioteca-observatorio/estadisticas-generales/>.
- [3] Ministerio de Obras Públicas y Dirección de Vialidad, «Manual de Carretera,» vol. 5, nº 5.442, p. 725, 2018.
- [4] Miniterio de Obras Públicas y Dirección de Vialidad, «Manual de Carretera,» vol. 8, nº 8.502, 2018.
- [5] British Board of Agrément, «GUIDELINES DOCUMENT FOR THE ASSESSMENT AND CERTIFICATION OF HIGH-FRICTION SURFACING FOR HIGHWAYS,» *BBA approval inspection testing certification*, p. 32, 2017.
- [6] Yu, DM (Yu, Demei) y et al., «Laboratory Evaluation of Critical Properties and Attributes of Calcined Bauxite and Steel Slag Aggregates for Pavement Friction Surfacing,» *JOURNAL OF MATERIALS IN CIVIL ENGINEERING*, vol. 31, nº 8, 2019.
- [7] F. Shaun y D. Woodward, «High Friction Surfacing Systems Using Blends of Natural Aggregate and Calcined Bauxite,» *Coatings*, pp. 1-16, 7 Febrero 2019.
- [8] CODELCO, «Codelco, la empresa de todos los chilenos y chilenas,» 2019. [En línea]. Available: https://www.codelco.com/codelco-la-empresa-de-todos-los-chilenos-y-chilenas/prontus_codelco/2015-12-30/171746.html.
- [9] CODELCO, «Historia de CODELCO División Ventanas,» 2019. [En línea]. Available: https://www.codelco.com/historia-ventanas/prontus_codelco/2016-04-06/083504.html.
- [10] CODELCO, «Proyectos e inversiones Ventanas,» 2019. [En línea]. Available: https://www.codelco.com/proyectos-e-inversiones/prontus_codelco/2016-03-30/130203.html.
- [11] C. M. C. B. A. Shi, «Utilization of copper slag in cement and concrete,» *Science Direct*, vol. 52, nº 10, pp. 1115-1120, 2008.
- [12] CODELCO, «Todo sobre la minería del cobre,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/edic/base/port/molienda.html>.
- [13] C. . A. SEPÚLVEDA ESTAY, «UTILIZACIÓN DE ESCORIAS DE FUNDICIÓN PARA LA PRODUCCIÓN DE COMPUESTOS DE HIERRO,» Universidad de Chile, Santtiago de Chile, 2006.
- [14] P. . R. CARRASCO CORREA, «PROPUESTA DE RECICLAJE DE LA ESCORIA DE COBRE DE LA FUNDICIÓN VENTANAS DE CODELCO, PARA MITIGAR EL IMPACTO AMBIENTAL,» Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, 2017.

- [15] P. Cendoya, «EFECTO EN LA RESISTENCIA DE LAS ESCORIAS DE FUNDICIÓN DE COBRE COMO AGREGADO FINO EN EL COMPORTAMIENTO RESISTENTE DEL HORMIGÓN,» *Revista Chilena de ingeniería*, vol. 17, nº 1, pp. 85-94, 2009.
- [16] Y. E. A. PÉREZ MEJÍAS, «Utilización de la escoria de cobre de Codelco Ventanas como agregado pétreo para tratamientos superficiales asfálticos simples en la región de Valparaíso,» USM, Valparaíso, 2017.
- [17] L. T. HERRERA SEGUEL, «UTILIZACION DE ESCORIA DE COBRE EN REMPLAZO A LA ARENA PARA LADRILLOS DE HORMIGON,» USM, Valparaíso, 2018.
- [18] S. Herrera Bustos, «Evaluación de la escoria de cobre, producto de la extracción de cobre, como árido para pavimentos flexibles,» UV, Valparaíso, 2014.
- [19] Universidad de Alicante, «ESPECTROSCOPIA DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X,» 2020. [En línea]. Available: <https://ssti.ua.es/es/instrumentacion-cientifica/unidad-de-rayos-x/espectroscopia-de-fluorescencia-de-rayos-x.html>.
- [20] María Guadalupe López Domínguez y Alfonso Pérez Salazar, «PRUEBAS DE LIXIVIACIÓN COMO EVALUACIÓN AMBIENTAL DE MATERIALES,» Instituto mexicano de transporte, Sanfandila, Qro, 2018.
- [21] Ministerio de Salud, «Decreto 148 - APRUEBA REGLAMENTO SANITARIO SOBRE MANEJO DE RESIDUOS PELIGROSOS.,» 16 Junio 2004. [En línea]. Available: <https://www.leychile.cl/N?i=226458&f=2004-06-16&p=>.
- [22] Comisión Chilena del Cobre, "Resumen descriptivo de las tecnologías y operación de las fundiciones primarias de concentrados de cobre de Chile", Santiago, 2004.
- [23] MINISTERIO SECRETARÍA GENERAL DE LA PRESIDENCIA, «Decreto 165: "ESTABLECE NORMA DE EMISION PARA LA REGULACION DEL CONTAMINANTE ARSENICO EMITIDO AL AIRE",» 12 Diciembre 2013. [En línea]. Available: <https://www.leychile.cl/N?i=137269&f=2013-12-12&p=>.
- [24] Teik Thye (T-T) Lim y Jian Chu, «Assessment of the use of spent copper slag for land reclamation,» *ResearchGate*, 2006.
- [25] Tran Thi Thu Dung, Valérie Cappuyns, Rudy Swennen, Elvira Vassilieva y Nguyen Ky Phung, «Leachability of arsenic and heavy metals from blasted copper slag and contamination of marine sediment and soil in Ninh Hoa district, south central of Vietnam,» *Elsevier*, pp. 80-92, 2014.
- [26] MINISTERIO SECRETARÍA GENERAL DE LA PRESIDENCIA, «LEY SOBRE BASES GENERALES DEL MEDIO AMBIENTE,» Biblioteca del Congreso Nacional de Chile BCN, Santiago, 2020.
- [27] CODELCO, «Informe de Sustentabilidad,» Valparaíso, 2019.
- [28] Gobierno de Chile y Ministerio de Obras Públicas, «DIAGNOSTICO Y CLASIFICACION DE LOS CURSOS Y CUERPOS DE AGUA SEGUN OBJETIVOS DE CALIDAD- CUENCA DEL RIO ACONCAGUA,» Cade Idepe- Consultores en Ingeniería, Santiago, 2004.

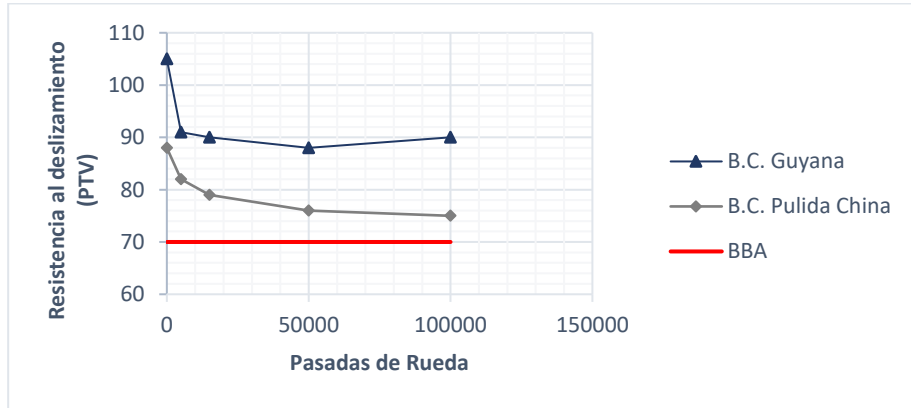
- [29] AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS LTDA, «PLAN DIRECTOR PARA LA GESTIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN LA CUENCA DEL RÍO ACONCAGUA,» Ministerio de Obras Públicas- Dirección general de aguas, Santiago, 2001.
- [30] Comisión Nacional de Áridos y Corporación del desarrollo tecnológico, «Industria del Árido- Tomo I, Sistematización de antecedentes técnicos y ambientales,» Convenio MOP- MINVU- C.Ch.C, Santiago, 2001.
- [31] Carlos Rafael Villar Gutiérrez, «Superficies de Alta Fricción, Antideslizamiento efectivo,» 2011.
- [32] Colorvial, «colorvialchile.cl,» 2011. [En línea]. Available: <https://www.colorvialchile.cl/quienes-somos/>.
- [33] A. m. y. minerales, «Minerales- Bauxita Calcinada,» 2020. [En línea]. Available: <http://www.acomet.es/index.php/pages-5/bauxitacalcinada#:~:text=El%20mineral%20proviene%20principalmente%20de,%2C%20cimiento%2C%20qu%C3%ADmica%20y%20refractaria..>
- [34] F. Deambrosi, L. Deambrosi, J. Hrabowski y T. Lipski, «Información de producto - Bauxita, calcinada,» Possehl Erzkontor GmbH & Co.KG-Cremer, 2020. [En línea]. Available: <https://www.erzkontor.com/es/productos/industrias/feuerfestindustrie/bauxita-calcinada.html>.
- [35] Rube Productos técnicos SL, «¿Qué es la resina de poliuretano?,» 27 Junio 2014. [En línea]. Available: <http://rubept.com/es/que-es-la-resina-de-poliuretano/#:~:text=Las%20resinas%20de%20poliuretano%20se%20dividen%20en%20dos%20tipos%2C%20bas%C3%A1ndose,A%E2%80%9C%20o%20%E2%80%9Ciso%E2%80%9C..>
- [36] Textos Científicos, «RESINAS DE POLIURETANO, SILICONAS Y VINÍLICAS,» 6 Febrero 2008. [En línea]. Available: <https://www.textoscientificos.com/polimeros/plasticos/sinteticos/resinas-poliuretano-siliconas-vinilicas>.
- [37] P. Luque, D. Álvarez y C. Vera, «Ingeniería del automóvil. Sistemas y comportamiento dinámico,» Thomson, España, 2008.
- [38] M. E. O. M. - S. A. R. MADRID, «ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS DISTRIBUCIONES DE CARGAS DE TRÁFICO ENTRE PAVIMENTOS CON CARPETA DE RODADURA LIBRE DE SELLO SUPERFICIAL Y PAVIMENTOS CON LA APLICACIÓN DE SELLO SUPERFICIAL DE ALTA FRICCIÓN,» UNIVERSIDAD CENTRAL DE CHILE, Santiago, 2014.
- [39] N. Nasa, «Información sobre neumáticos. Adherencia 3,» 10 Agosto 2014. [En línea]. Available: <https://neumaticosnasa.blogspot.com/2014/07/adherencia-2.htm>.
- [40] A. C. S. d. R. d. C.V., «HIDROPLANEAMIENTO y Cómo Evitarlo en Temporadas Lluviosas,» [En línea]. Available: <http://acsio-consultores.blogspot.com/2018/10/hidroplaneo-y-como-evitarlo-en.html>.
- [41] F. Leiva, «Normativa para evaluar la resistencia al deslizamiento superficial de los pavimentos,» Julio 2005. [En línea]. Available: <https://es.slideshare.net/castilloaroni/evaluacion-de-la-resistencia-al-deslizamiento-superficial-de-los-pavimentos>.

- [42] José Alejandro Torres Flores., «ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS DISTRIBUCIONES DE CARGAS DE TRÁFICO ENTRE PAVIMENTOS CON CARPETA DE RODADURA LIBRE DE SELLO SUPERFICIAL Y PAVIMENTOS CON LA APLICACIÓN DE SELLO SUPERFICIAL DE ALTA FRICCIÓN,» Universidad Central, Santiago, 2014.
- [43] DEPARTAMENTO DE ADMINISTRACIÓN Y EVALUACIÓN DE PAV, «IDENTIFICACIÓN DE FALLAS EN PAVIMENTOS Y TÉCNICAS DE REPARACIÓN,» MOPC, 2016.
- [44] Julian, F y S. Moler, «Gaining Traction in Roadway Safety. Public Roads,» *Federal Highway Administration*, vol. 2, nº 1, 2008.
- [45] Hatherly, L.W. y A.E. Young, «The Location and Treatment of Urban Skidding Hazard Sites,» *Transportation Research Board*, nº 623, pp. 21-28, 1976.
- [46] Dunlop, R.J, «Experience Gained in Road Safety in Implementing Safer Surfacing,» de *International Surface Friction Conference*, Gold Coast, Australia, 2011.
- [47] Brad Brimley y Paul Carlson, «Using High Friction Surface Treatments to Improve Safety at Horizontal Curves,» DBI Services, Texas, 2012.
- [48] Tecnología Innovación Urbana, «Ficha Técnica, Superficie de Alta Fricción,» ADYGRIP, Puebla.
- [49] METSO'S Mining and Construction Technology, «Guía de Aplicación de piezas de Desgaste,» *Materiales y desgaste*, p. 4, 2012.
- [50] Leeson Polyurethanes Ltd, «SUPERFICIE DECORATIVA ADHERIDA CON RESINA LEESON, ficha de certificación BBA,» 2019.
- [51] ASFALCOM, «EMULSION ASFALTICA CRS-2 Ficha Técnica,» ASFALTOS QUÍMICOS Y CONSTRUCCIONES ASFALCOM S.A., Quintero, Región Valparaíso.
- [52] ASFALCOM, «CRS-2 ELASTOMERICA, Ficha Técnica,» ASFALTOS QUÍMICOS Y CONSTRUCCIONES ASFALCOM S.A, Quintero, Región de Valparaíso.
- [53] Leeson Polyurethanes, «Sistema de superficie adherida con Resina (Ficha Técnica),» 2019.
- [54] Hugo Alexander Rondón Quintana, Juan Carlos Ruge Cárdenas y Luis Ángel Moreno Anselmi, «Efecto del agua sobre el asfalto y su posible influencia en el daño por humedad en una mezcla asfáltica porosa.,» *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, vol. 24, nº 4, 2016.
- [55] Dr. Carlos Humberto Fonseca Rodríguez, «MEDICIÓN DEL ÍNDICE DE FRICCIÓN INTERNACIONAL, IFI, EN SUPERFICIES DE RODAMIENTO DEL ÁREA METROPOLITANA DE MONTERREY PARA DEFINIR LAS ÁREAS CON MAYOR ÍNDICE DE ACCIDENTES.».

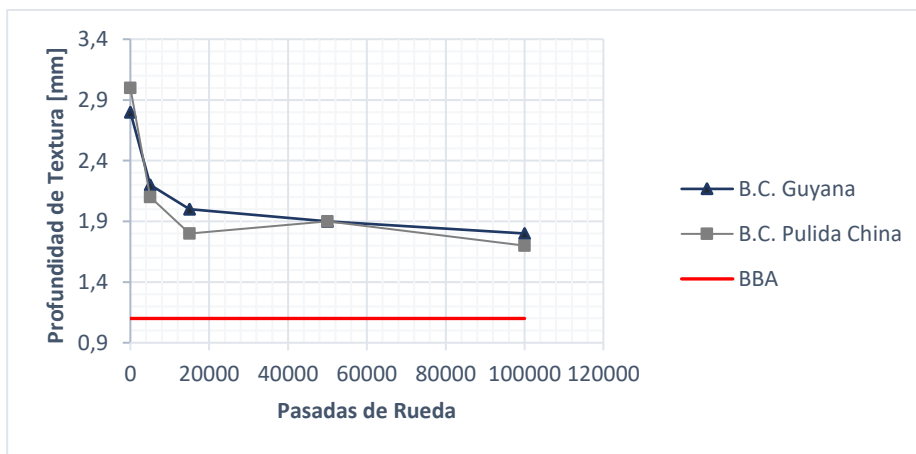
Anexos

Anexo Capítulo V.

A.5. Experimento 1 Realizado por [7].

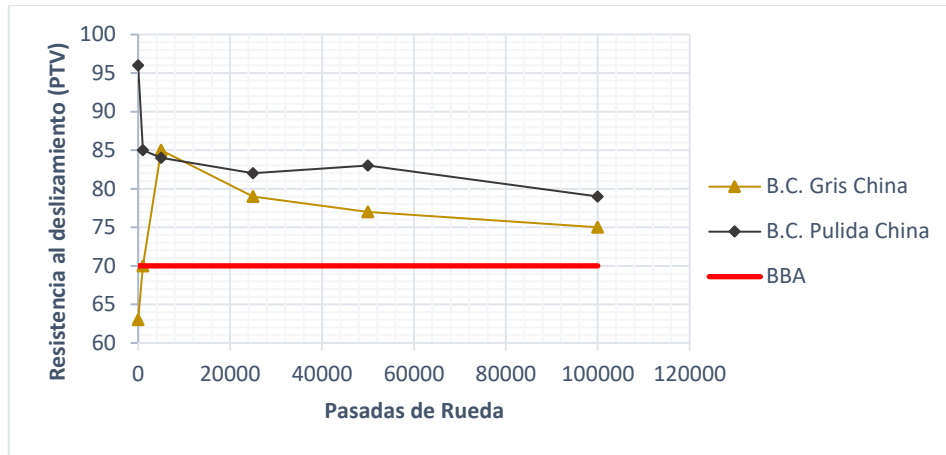


Agregados/ Pasos de Rueda	Resistencia al deslizamiento (PTV)				
	0	5000	15000	50000	100000
Bauxita Calcinada de Guyana	105	91	90	88	90
Bauxita Calcinada pulida de China	88	82	79	76	75

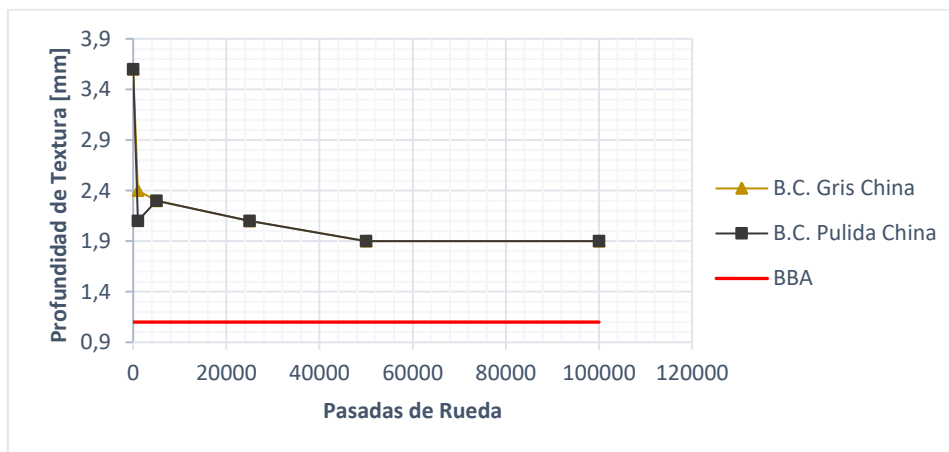


Agregados/ Pasos de Rueda	Profundidad de Textura [mm]				
	0	5000	15000	50000	100000
Bauxita Calcinada de Guyana	2,8	2,2	2,0	1,9	1,8
Bauxita Calcinada pulida de China	3,0	2,1	1,8	1,9	1,7

B.5 Experimento 2.

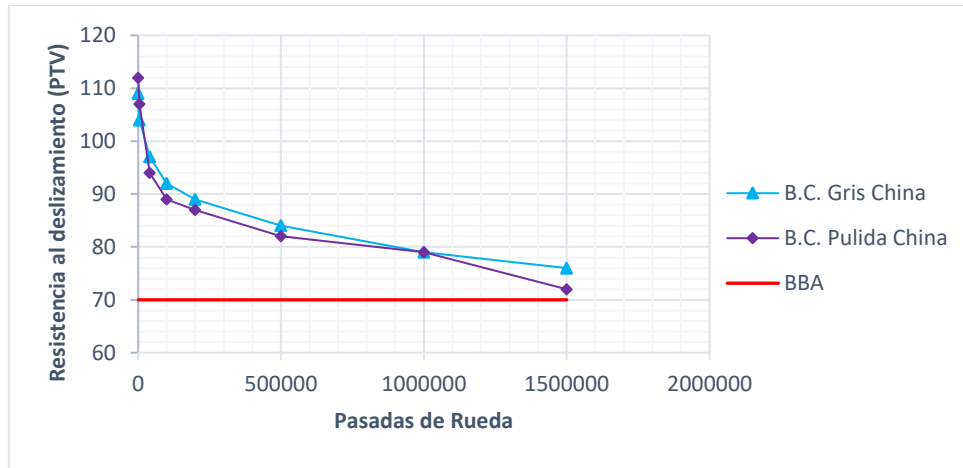


Agregados/ Pasos de Rueda	Resistencia al deslizamiento (PTV)					
	0	1000	5000	25000	50000	100000
Bauxita Calcinada Gris China	63	70	85	79	77	75
Bauxita Calcinada pulida China	96	85	84	82	83	79

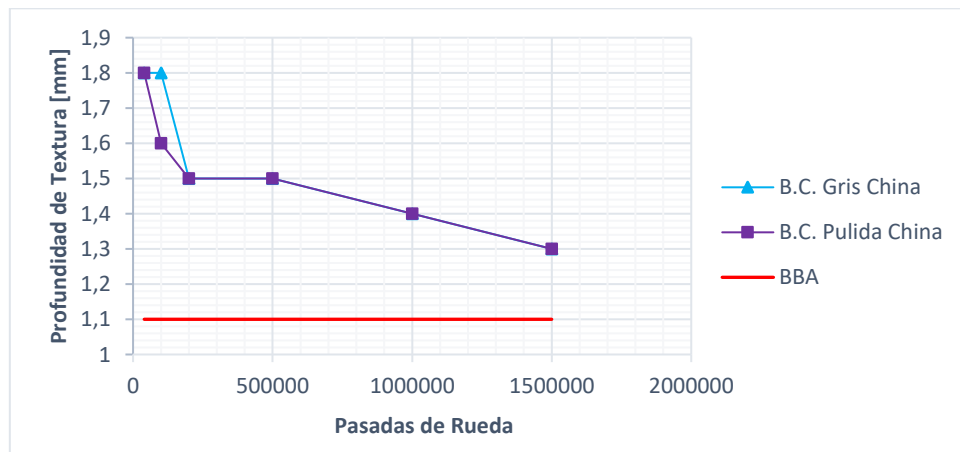


Agregado/ Pasos de Rueda	Profundidad de Textura [mm]					
	0	1000	5000	25000	50000	100000
Bauxita Calcinada Gris China	3,6	2,4	2,3	2,1	1,9	1,9
Bauxita Calcinada pulida China	3,6	2,1	2,3	2,1	1,9	1,9

C.5 Experimento 3.



Agregado/ Paso de Rueda	Resistencia al deslizamiento (PTV)							
	0	5000	40000	100000	200000	500000	1000000	1500000
Bauxita Calcinada pulida China	112	107	94	89	87	82	79	72
Bauxita Calcinada Gris China	109	104	97	92	89	84	79	76



Agregado/ Paso de Rueda	Resistencia al deslizamiento (PTV)					
	40000	100000	200000	500000	1000000	1500000
Bauxita Calcinada pulida China	1,8	1,6	1,5	1,5	1,4	1,3
Bauxita Calcinada Gris China	1,8	1,8	1,5	1,5	1,4	1,3

Anexos Capítulo VI.

A.6- Granulometría:

Material:	Bauxita Calcinada			
Masa Inicial:	638,5	[gramos]		
Nch	ASTM	Peso Retenido	Retenido Acumulado	Pasa Acumulado
[mm]		[gramos]	[%]	[%]
80	3"	0	0%	100%
63	2 1/2"	0	0%	100%
50	2"	0	0%	100%
40	1 1/2"	0	0%	100%
25	1"	0	0%	100%
20	3/4"	0	0%	100%
12,5	1/2"	0	0%	100%
10	3/8"	0	0%	100%
6,3	1/4"	0	0%	100%
5	N°4	0	0%	100%
2,5	N°8	180,9	28%	72%
1,25	N°16	430,6	67%	4%
0,63	N°30	26,8	4%	0%
0,315	N°50	0,2	0%	0%
0,16	N°100	0	0%	0%
0,08	N°200	0	0%	0%

Tabla de Clasificación de Suelos.

Sistema	Silt			Sand			Gravel			Cobbles	Boulders
	Fine	Medium	Coarse	Fine	Medium	Coarse	Fine	Medium	Coarse		
BS	0.002	0.006	0.02	0.06	0.2	0.6	2	6	20	60	200
USCS	Fines (silt, clay)			Sand			Gravel			Cobbles	Boulders
				Fine	Medium	Coarse	Fine	Coarse			
				0.075	0.425	2	4.75	19	75	300	
AASHTO	Clay	Silt		Sand		Gravel			Boulders		
	0.005	0.075	0.425	2	75						
ASTM	Clay	Silt		Sand			Gravel			Cobbles	Boulders
				Fine	Medium	Coarse					

Grain size (mm)

B.6- Densidad Real, Neta y Absorción de agua.

B.6.1- Agregado Grueso.

- Comparación 1:

		Bauxita Calcinada		Escoria de Cobre	
		Pétreo Grueso		Pétreo Grueso	
	Unidad	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2
Peso SSS (M_{SSS})	gramos	2100,0	2138,0	2106,0	2194,0
Peso Sumergido (M_{sum})	gramos	1473,3	1500,6	1552,0	1619,4
Peso Seco (M_s)	gramos	2089,0	2125,0	2097,0	2186,0
Densidad Real SSS	kg/m ³	3350,9	3354,3	3801,4	3818,3
Densidad Real S	Kg/m ³	3333,3	3333,9	3785,2	3804,4
Densidad Neta	kg/m ³	3392,9	3403,3	3847,7	3858,1
Absorción	%	0,5	0,6	0,4	0,4
Densidad Real SSS Promedio	kg/m ³	3352,6		3809,9	
Densidad Real S Promedio	kg/m ³	3333,6		3794,8	
Densidad Neta Promedio	kg/m ³	3398,1		3852,9	
Absorción Promedio	%	0,57		0,40	

- Comparación 2:

		Árido del Aconcagua		Escoria de Cobre	
		Pétreo Grueso		Pétreo Grueso	
	Unidad	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2
Peso SSS (M_{SSS})	gramos	2225,9	2318,2	2106,0	2194,0
Peso Sumergido (M_{sum})	gramos	1392	1450,2	1552,0	1619,4
Peso Seco (M_s)	gramos	2185	2280	2097,0	2186,0
Densidad Real SSS	kg/m ³	2669,3	2670,7	3801,4	3818,3
Densidad Real S	kg/m ³	2620,2	2626,7	3785,2	3804,4
Densidad Neta	kg/m ³	2755,4	2747,7	3847,7	3858,1
Absorción	%	1,87	1,68	0,4	0,4
Densidad Real SSS Promedio	kg/m ³	2670,0		3809,9	
Densidad Real S Promedio	kg/m ³	2623,5		3794,8	
Densidad Neta Promedio	kg/m ³	2751,5		3852,9	
Absorción Promedio	%	1,77		0,40	

Confección de muestras para ensayo de densidades reales, netas y absorción de agua para agregados GRUESOS.



Canastillo para determinar peso sumergido de los agregados



B.6.2- Agregado Fino.

- Comparación 1:

		Bauxita Calcinada		Escoria de Cobre	
		Pétreo Fino		Pétreo Fino	
	Unidad	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2
Peso SSS (Msss)	gramos	199,9	199,9	191,4	191,4
Peso Sumergido (Mm)	gramos	783,5	783,5	788,3	788,3
Peso Agua (Ma)	gramos	645,5	645,5	647,4	647,4
Peso Seco (Ms)	gramos	198,1	198,1	190,7	190,7
Densidad Real SSS	kg/m ³	3228,3	3228,3	3789,5	3789,5
Densidad Real S	kg/m ³	3198,8	3198,8	3775,5	3775,5
Densidad Neta	kg/m ³	3296,2	3296,2	3829,3	3829,3
Absorción	%	0,9	0,9	0,4	0,4
Densidad Real SSS Prom	kg/m ³	3228,3		3789,5	
Densidad Real S Prom	kg/m ³	3198,8		3775,5	
Densidad Neta Prom	kg/m ³	3296,2		3829,3	
Absorción Promedio	%	0,9		0,4	

- Comparación 2:

		Árido del Aconcagua		Escoria de Cobre	
		Pétreo Fino		Pétreo Fino	
	Unidad	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2
Peso SSS (Msss)	gramos	165,1	165,1	191,4	191,4
Peso Sumergido (Mm)	gramos	749,6	749,6	788,3	788,3
Peso Agua (Ma)	gramos	647,6	647,6	647,4	647,4
Peso Seco (Ms)	gramos	162,2	162,2	190,7	190,7
Densidad Real SSS	kg/m ³	2617,0	2617,0	3789,5	3789,5
Densidad Real S	kg/m ³	2571,3	2571,3	3775,5	3775,5
Densidad Neta	kg/m ³	2694,4	2694,4	3829,3	3829,3
Absorción	%	1,8	1,8	0,4	0,4
Densidad Real SSS Prom	kg/m ³	2617,0		3789,5	
Densidad Real S Prom	kg/m ³	2571,3		3775,5	
Densidad Neta Prom	kg/m ³	2694,4		3829,3	
Absorción Promedio	%	1,8		0,4	

Desarrollo y confección de muestras para ensayo de densidades reales, netas y absorción de agua para agregados FINOS.



B: Árido del Aconcagua

C: Escoria de Cobre

E: Bauxita Calcinada

C.6- Densidad Aparente Suelta.

Volumen recipiente	[m ³]	3,003				
Peso Recipiente	[g]	3534		Densidad Aparente Suelta [kg/m ³]		
Masa suelta Escoria de Cobre	[g]	9890	9820	2116,6	2093,2	2104,9
Masa suelta Bauxita Calcinada	[g]	9086	9076	1848,8	1845,5	1847,2
Masa suelta Árido Aconcagua	[g]	7905	7870	1455,5	1443,9	1449,7



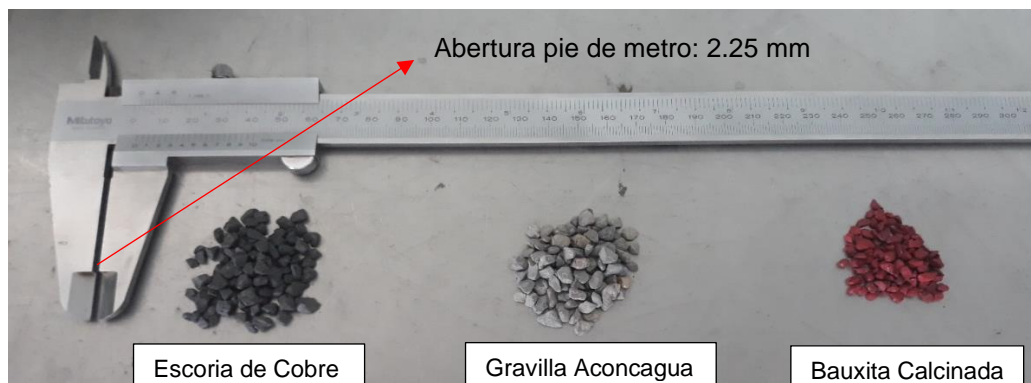
- Procedimiento Ensayo Densidad Aparente Suelta



D.6- Índice de Lajas.

Nch	ASTM	Peso Retenido	Retenido Acumulado	Pasa Acumulado
[mm]		[gramos]	[%]	[%]
10	3/8"	0	0%	100%
6,3	1/4"	0	0%	100%
5	N°4	0	0%	100%
2,5	N°8	180,9	28%	72%
1,25	N°16	430,6	67%	4%
0,63	N°30	26,8	4%	0%
0,315	N°50	0,2	0%	0%
Fracción Mínima para ensaye			6,3 - 5	[mm]
Fracción Adaptada para ensaye			5 - 2,5	[mm]
Cantidad de fracciones			1	[unidad]
Abertura pie de metro			2,25	[mm]

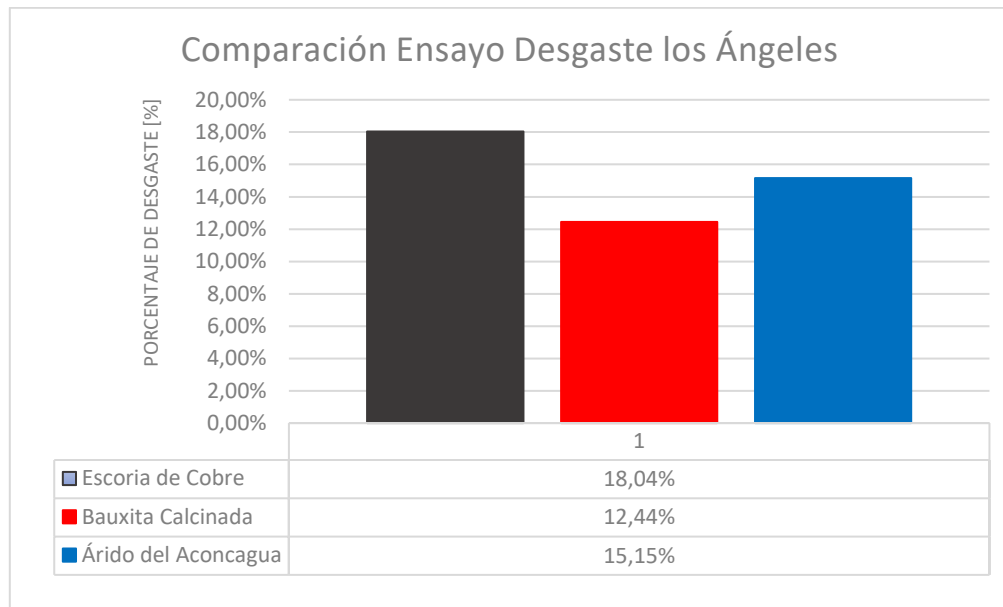
	Partículas Totales	Masa Total	Partículas pasan pie de metro	Masa Partículas que pasan	Índice de Lajas Fracción	Índice de Lajas Agregado	Índice de Lajas Promedio
	[unidades]	[gramos]	[unidades]	[gramos]	[%]	[%]	[%]
Escoria de Cobre							
Muestra 1	102	12,4	20	1,4	11,3%	11,3%	11,0%
Muestra2	102	12,1	18	1,3	10,7%	10,7%	
Bauxita Calcinada							
Muestra 1	102	5,5	39	1,4	25,5%	25,5%	25,2%
Muestra2	102	5,6	37	1,4	25,0%	25,0%	
Árido Aconcagua							
Muestra 1	102	10	13	0,6	6,0%	6,0%	6,4%
Muestra2	102	10,2	14	0,7	6,9%	6,9%	



E.6- Desgaste.

E.6.1- Desgaste de los Ángeles.

Datos del Ensayo			
Grado		7	5-2,5 [mm]
Número de revoluciones		500	vueltas
Número de esferas		6	unidades
Masa total esferas		2508,5	gramos
Material agregado	Masa inicial (Mi) [g]	Masa final (Mf) [g]	Porcentaje desgaste [%]
Escoria de cobre	5000,4	4098	18,05%
Bauxita calcinada	5000,2	4378	12,44%
Árido del Aconcagua	5000	4242,5	15,15%





Máquina de los Ángeles

Carga Abrasiva (bolas de acero)

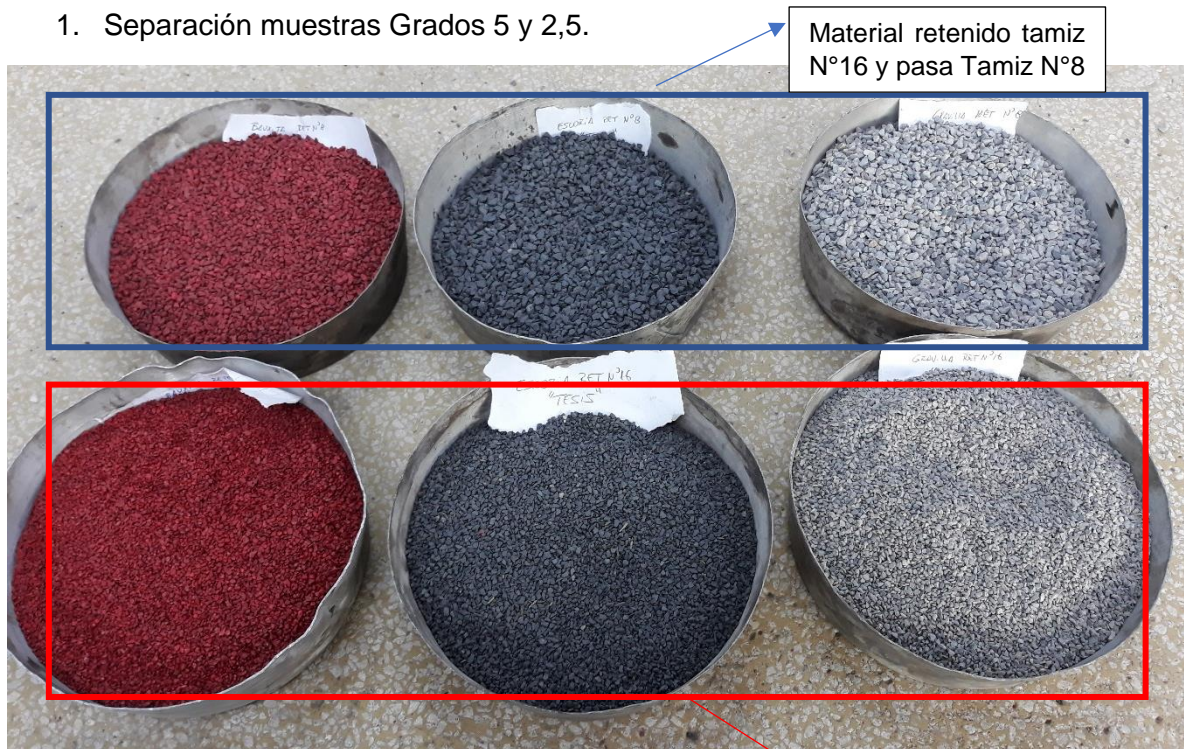


Material retenido tamiz N°12, posterior al ensayo

E.6.2- Índice de Trituración.

Procedimiento.

1. Separación muestras Grados 5 y 2,5.



Material retenido tamiz N°16 y pasa Tamiz N°8

2. Compactación de las Muestras (varilla 25 golpes).

Material retenido tamiz N°8 y pasa tamiz N°4



3. Golpes con Martinete (15 golpes; peso 14 kg; altura 380 mm).



Resultados del Ensayo

Agregado Pétreo	Tipo de Material	Grado	Tamices [mm]	Tamiz de corte para Finos [mm]	Masa Muestra 1 [g]	Masa Muestra 2 [g]	Finos Muestra 1 [g]	Finos Muestra 2 [g]
Escoria de Cobre	Fino	5	5 - 2,5	N°30 (0,63)	888	892	20,9	20,3
		2,5	2,5 - 1,25	N°50 (0,315)	843	833	22,3	22,1
Bauxita Calcinada	Fino	5	5 - 2,5	N°30 (0,63)	770	786	3,3	4,5
		2,5	2,5 - 1,25	N°50 (0,315)	757	758	2	2,1
Árido del Aconcagua	Fino	5	5 - 2,5	N°30 (0,63)	590	592	16,1	15,2
		2,5	2,5 - 1,25	N°50 (0,315)	571	578	16,6	13,7

Agregado Pétreo	ITp Muestra 1 [%]	ITp Muestra 2 [%]	Porcentaje Granulométrico [%]	IT total Muestra 1 [%]	IT total Muestra 2 [%]	IT total Promedio [%]
Escoria de Cobre	2,35	2,28	29	2,56	2,54	2,55
	2,65	2,65	71			
Bauxita Calcinada	0,43	0,57	29	0,31	0,36	0,34
	0,26	0,28	71			
Árido del Aconcagua	2,73	2,57	29	2,86	2,43	2,64
	2,91	2,37	71			

Anexo Capítulo VII.

A.7. Dosificación Componentes de la Resina de Poliuretano.

T (°C)	Comp A	Comp B	Colorante (%) del total
21	2,41	1	5%
20	2,28	1	5%
19	2,15	1	5%
18	2,02	1	5%
17	1,89	1	4%
16	1,76	1	4%
15	1,63	1	4%
14	1,5	1	4%
13	1,37	1	3%
12	1,24	1	3%

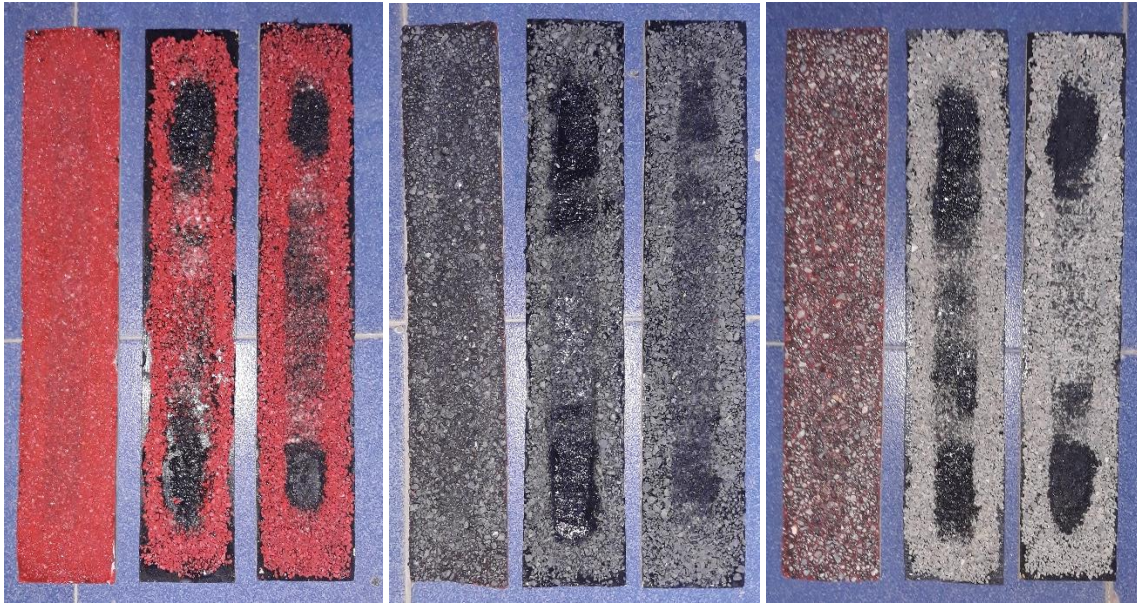
B.7. Resultados Numéricos del Ensayo de Rueda Cargada.

1. Resina Poliuretano	Mi	Mf	P
	(g)	(g)	(%)
Escoria de Cobre	472,7	471,4	0,28%
Bauxita Calcinada	453,2	450,9	0,51%
Árido del Aconcagua	418,6	416,6	0,48%

2. Emulsión Asfáltica CRS-2	Mi	Mf	P
	(g)	(g)	(%)
Escoria de Cobre	359,3	356,6	0,75%
Bauxita Calcinada	358,6	355,8	0,78%
Árido del Aconcagua	350,7	347,2	1,00%

3. Emulsión Asfáltica CRS-2	Mi	Mf	P
	(g)	(g)	(%)
Elastomerica			
Escoria de Cobre	342,2	338,2	1,17%
Bauxita Calcinada	378,5	374,8	0,98%
Árido del Aconcagua	308,1	304,8	1,07%

Probetas Ensayadas en Máquina de Rueda Cargada.



C.7. Resultados Numéricos del Ensayo de Abrasión en Medio Húmedo y Seco.

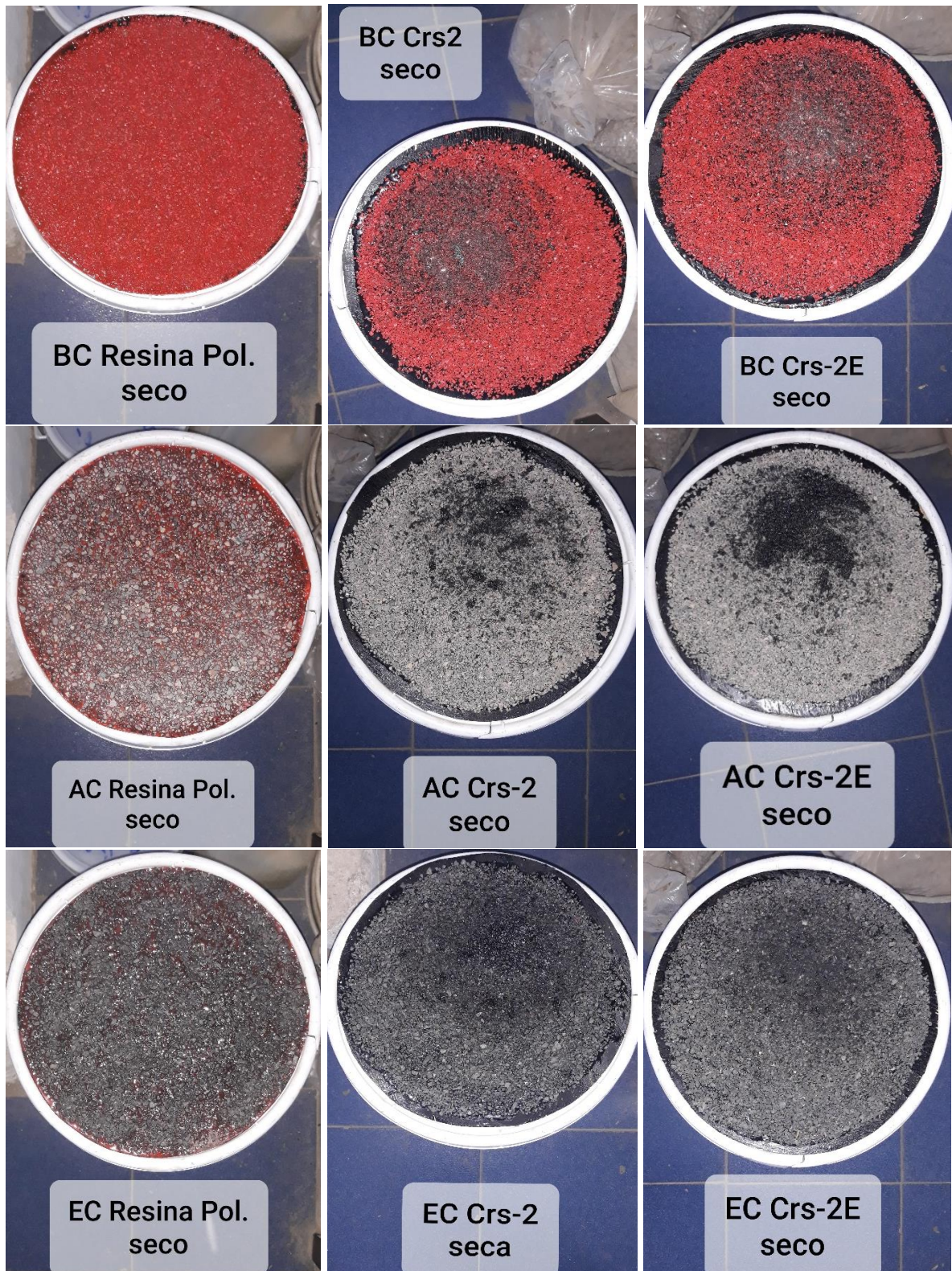
Resultados Numéricos del Ensayo Abrasión en Medio Seco.

1. Resina Poliuretano	Mi	Mf	A	D.S.A
	(g)	(g)	(m ²)	(g/m ²)
Escoria de Cobre	894	892,7	0,0241	54
Bauxita Calcinada	971,2	970,1	0,0241	46
Árido del Aconcagua	845,8	844,4	0,0241	58

2. Emulsión Asfáltica CRS-2	Mi	Mf	A	D.S.A
	(g)	(g)	(m ²)	(g/m ²)
Escoria de Cobre	725,3	694,9	0,0214	1422
Bauxita Calcinada	649,3	622	0,0214	1277
Árido del Aconcagua	649,7	619,7	0,0214	1403

3. Emulsión Asfáltica CRS-2	Mi	Mf	A	D.S.A
	(g)	(g)	(m ²)	(g/m ²)
Elastomérica				
Escoria de Cobre	763,4	728,7	0,0201	1726
Bauxita Calcinada	744,3	717,3	0,0201	1343
Árido del Aconcagua	651,1	614,8	0,0201	1805

Probetas Ensayadas en Máquina de Abrasión en Condiciones Secas

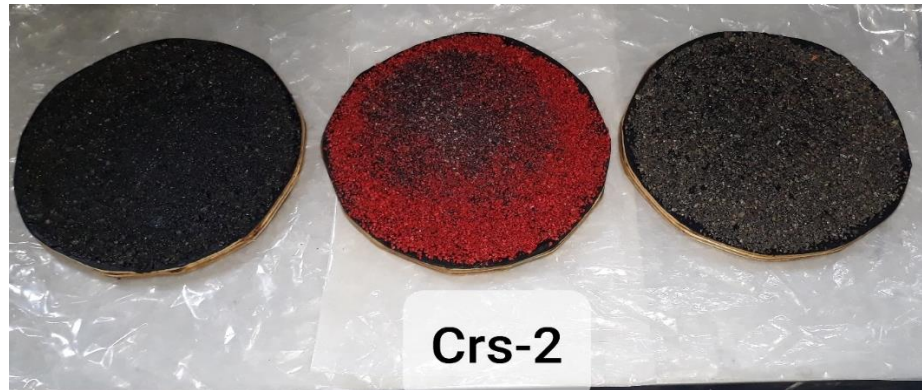


Resultados Numéricos del Ensayo Abrasión en Medio Húmedo.

1. Resina Poliuretano	Mi	Mf	A	D.B.A
	(g)	(g)	(m2)	(g/m2)
Escoria de Cobre	704,2	672	0,0227	1419
Bauxita Calcinada	714,7	681,6	0,0241	1376
Árido del Aconcagua	671,2	637,6	0,0227	1480
2. Emulsión Asfáltica CRS-2	Mi	Mf	A	D.B.A
	(g)	(g)	(m2)	(g/m2)
Escoria de Cobre	570,2	493,1	0,0214	3606
Bauxita Calcinada	583,6	520,3	0,0214	2960
Árido del Aconcagua	475,5	425,6	0,0214	2334
3. Emulsión Asfáltica CRS-2	Mi	Mf	A	D.B.A
Elastomerica	(g)	(g)	(m2)	(g/m2)
Escoria de Cobre	597,3	501,5	0,0214	4480
Bauxita Calcinada	555,5	475	0,0227	3547
Árido del Aconcagua	544,3	480	0,0227	2833

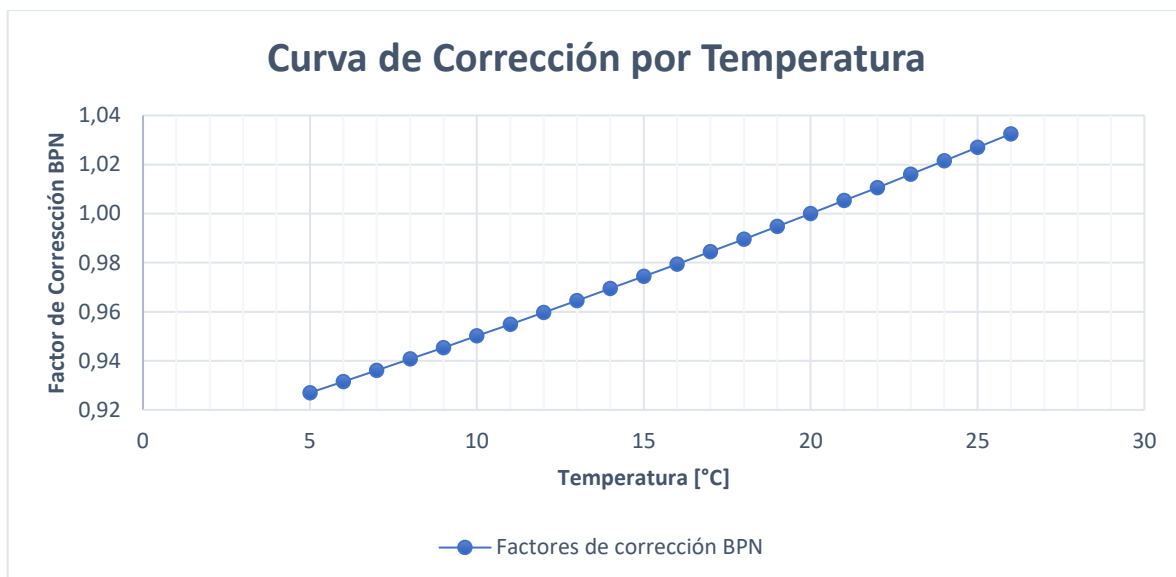
Probetas Ensayadas en Máquina de Abrasión en Condiciones Húmedas.





D.7. Corrección del Valor BPN por Temperatura del Agua según Volumen 8 del Manual de Carreteras.

T° (C)	Fa	T° (C)	Fa
5	0,93	16	0,98
6	0,93	17	0,98
7	0,94	18	0,99
8	0,94	19	0,99
9	0,95	20	1,00
10	0,95	21	1,01
11	0,95	22	1,01
12	0,96	23	1,02
13	0,96	24	1,02
14	0,97	25	1,03
15	0,97	26	1,03



E.7. Micro Textura Medida con el Péndulo Británico.

E.7.1. Resultados Probetas Sometidas a Rueda Cargada.

Muestras 1

Agregado	BPN inicial mojado					BPN Promedio
	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Medición 4	Medición 5	
E.C	73	72	71	71	74	72,2
B.C	77	77	76	75	75	76
A.A	75	73	73	73	73	73,4

Agregado	BPN a los 1000 ciclos mojado					BPN Promedio
	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Medición 4	Medición 5	
E.C	67	70	67	70	69	68,6
B.C	61	62	62	61	63	61,8
A.A	67	65	64	65	64	65

Agregado	BPN a los 2000 ciclos mojado					BPN Promedio
	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Medición 4	Medición 5	
E.C	70	69	69	70	68	69,2
B.C	73	72	72	71	71	71,8
A.A	70	69	69	68	68	68,8

Muestras 2

Agregado	BPN inicial mojado					BPN Promedio
	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Medición 4	Medición 5	
E.C	78	79	79	78	77	78,2
B.C	74	73	73	72	72	72,8
A.A	70	71	73	70	71	71

Agregado	BPN a los 1000 ciclos mojado					BPN Promedio
	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Medición 4	Medición 5	
E.C	72	72	71	73	72	72
B.C	75	76	78	75	73	75,4
A.A	70	71	71	69	69	70

Agregado	BPN a los 2000 ciclos mojado					BPN Promedio
	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Medición 4	Medición 5	
E.C	69	70	67	70	68	68,8
B.C	72	72	73	70	72	71,8
A.A	69	71	70	71	70	70,2

E.7.2. Resultados Probetas Sometidas a Abrasión en Medio Húmedo.

Muestras 1

Agregado	BPN inicial					BPN Promedio
	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Medición 4	Medición 5	
E.C	84	86	87	87	86	86
B.C	83	83	81	80	80	81,4
A.A	76	75	74	76	77	75,6

Agregado	BPN 2 ciclos (10 minutos)					BPN Promedio
	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Medición 4	Medición 5	
E.C	80	76	78	80	80	78,8
B.C	80	79	78	78	77	78,4
A.A	75	75	72	72	72	73,2

Muestra 2

Agregado	BPN inicial					BPN Promedio
	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Medición 4	Medición 5	
E.C	76	75	74	76	75	75,2
B.C	83	85	86	84	84	84,4
A.A	80	80	83	82	82	81,4

Agregado	BPN 2 ciclos 10 (minutos)					BPN Promedio
	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Medición 4	Medición 5	
E.C	75	74	73	76	78	74,5
B.C	78	81	80	78	90	79,25
A.A	77	79	78	78	78	78

E.7.3. Resultados Probetas Sometidas a Abrasión en Medio Seco.**Muestra 1**

Agregado	BPN inicial					BPN Promedio
	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Medición 4	Medición 5	
E.C	80	78	77	78	77	78
B.C	77	78	76	76	79	77,2
A.A	85	86	84	86	84	85

Agregado	BPN 2 ciclos (10 minutos)					BPN Promedio
	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Medición 4	Medición 5	
E.C	81	82	82	81	85	81,5
B.C	80	80	79	77	77	78,6
A.A	80	82	82	82	83	81,8

Muestras 2

Agregado	BPN inicial					BPN Promedio
	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Medición 4	Medición 5	
E.C	90	91	92	92	93	91,6
B.C	84	85	85	83	86	84,6
A.A	80	81	81	81	80	80,6

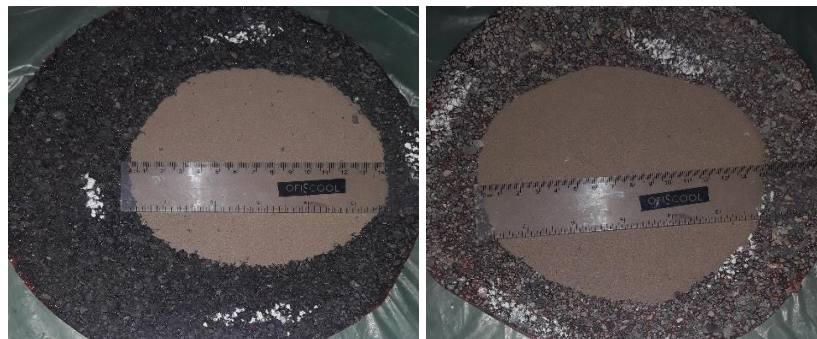
Agregado	BPN 2 ciclos (10 minutos)					BPN Promedio
	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Medición 4	Medición 5	
E.C	85	86	84	84	85	84,8
B.C	83	81	82	82	80	81,6
A.A	78	78	77	76	75	76,8

F.7. Macro Textura Medida con el Método del Círculo de Arena.

F.7.1. Profundidad de Textura de Probetas Sometidas a Abrasión en Medio Húmedo.

1. ANTES DEL ENSAYO	Tiempo 0 [seg]				
Probetas	Diámetro promedio [cm]		MTD [mm]		MTD promedio [mm]
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2	Final
Escoria de Cobre	13,0	13,5	1,88	1,75	1,82
Bauxita Calcinada	13,7	14,2	1,70	1,57	1,63
Árido del Aconcagua	13,3	13,4	1,81	1,78	1,79

2. DESPUES DEL ENSAYO	Tiempo 60 [seg]				
Probetas	Diámetro promedio [cm]		MTD [mm]		MTD promedio [mm]
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2	Final
Escoria de Cobre	13,65	13,85	1,71	1,66	1,68
Bauxita Calcinada	14,40	14,95	1,54	1,42	1,48
Árido del Aconcagua	14,68	14,25	1,48	1,57	1,52



F.7.2. Profundidad de Textura de Probetas Sometidas a Abrasión en Medio Seco.

1. ANTES DEL ENSAYO		Tiempo 0 [seg]			
Probetas		Diámetro promedio [cm]		MTD [mm]	
		Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2
		1			Final
Escoria de Cobre		14,5	14,9	1,51	1,44
Bauxita Calcinada		15,2	15,1	1,39	1,41
Árido del Aconcagua		14,6	14,4	1,50	1,54

2. DESPUES DEL ENSAYO		Tiempo 600 [seg]			
Probetas		Diámetro Promedio [cm]		MTD [mm]	
		Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2
					Final
Escoria de Cobre		15,20	16,18	1,38	1,22
Bauxita Calcinada		16,60	16,13	1,16	1,22
Árido del Aconcagua		15,75	15,88	1,28	1,26



G.7 Cálculos de Curvas IFI.

	FR60 antes	FR60 después	F60 antes	F60 después	Sp antes	Sp después
	62,7	58,3	0,56	0,52	51,74	47,78
	59,0	54,0	0,53	0,49	48,42	43,84
	57,7	52,4	0,52	0,48	47,24	42,38
Abrasión Medio Húmedo						
	Escoria de Cobre		Bauxita Calcinada		Árido de Aconcagua	
Velocidad	F(S) antes	F(S) después	F(S) antes	F(S) después	F(S) antes	F(S) después
[km/hr]						
0	0,759	0,730	0,746	0,716	0,708	0,689
5	0,739	0,710	0,725	0,694	0,690	0,668
10	0,721	0,690	0,704	0,672	0,672	0,648
15	0,702	0,671	0,684	0,651	0,655	0,628
20	0,685	0,653	0,665	0,630	0,638	0,609
25	0,667	0,635	0,646	0,610	0,621	0,590
30	0,650	0,618	0,628	0,591	0,605	0,572
35	0,634	0,601	0,610	0,573	0,590	0,555
40	0,618	0,584	0,593	0,555	0,575	0,538
45	0,602	0,568	0,576	0,537	0,560	0,522
50	0,587	0,553	0,560	0,520	0,546	0,506
55	0,572	0,537	0,544	0,504	0,532	0,490
60	0,558	0,523	0,528	0,488	0,518	0,475
65	0,543	0,508	0,513	0,473	0,505	0,461
70	0,530	0,494	0,499	0,458	0,492	0,447
75	0,516	0,481	0,485	0,443	0,479	0,433
80	0,503	0,468	0,471	0,429	0,467	0,420
85	0,490	0,455	0,458	0,416	0,455	0,407
90	0,478	0,442	0,445	0,403	0,443	0,395
95	0,466	0,430	0,432	0,390	0,432	0,383
100	0,454	0,418	0,420	0,378	0,421	0,371
105	0,443	0,407	0,408	0,366	0,410	0,360
110	0,431	0,396	0,396	0,355	0,399	0,349
115	0,421	0,385	0,385	0,343	0,389	0,338
120	0,410	0,374	0,374	0,333	0,379	0,328
125	0,399	0,364	0,364	0,322	0,369	0,318
130	0,389	0,354	0,353	0,312	0,360	0,308
135	0,380	0,344	0,343	0,302	0,350	0,299
140	0,370	0,335	0,334	0,293	0,341	0,289
145	0,361	0,326	0,324	0,283	0,333	0,281
150	0,351	0,317	0,315	0,275	0,324	0,272

	FR60 antes	FR60 después	F60 antes	F60 después	Sp antes	Sp después
	58,0	53,7	0,52	0,49	47,51	43,59
	54,1	49,5	0,49	0,45	43,90	39,79
	57,3	50,8	0,51	0,46	46,84	40,91
Abrasión Medio Seco						
	Escoria de Cobre		Bauxita Calcinada		Árido de Aconagua	
Velocidad	F(S) antes	F(S) después	F(S) antes	F(S) después	F(S) antes	F(S) después
[km/hr]						
0	0,764	0,756	0,735	0,735	0,747	0,726
5	0,740	0,729	0,710	0,706	0,724	0,699
10	0,717	0,702	0,687	0,678	0,702	0,673
15	0,694	0,677	0,664	0,651	0,681	0,648
20	0,672	0,652	0,641	0,625	0,660	0,624
25	0,651	0,629	0,620	0,601	0,640	0,601
30	0,631	0,606	0,599	0,577	0,620	0,579
35	0,611	0,584	0,579	0,554	0,601	0,558
40	0,591	0,563	0,560	0,532	0,583	0,537
45	0,573	0,543	0,541	0,511	0,565	0,517
50	0,555	0,523	0,523	0,491	0,547	0,498
55	0,537	0,504	0,505	0,471	0,531	0,480
60	0,520	0,486	0,489	0,452	0,514	0,462
65	0,504	0,468	0,472	0,434	0,499	0,445
70	0,488	0,451	0,456	0,417	0,483	0,429
75	0,473	0,435	0,441	0,401	0,469	0,413
80	0,458	0,419	0,426	0,385	0,454	0,398
85	0,443	0,404	0,412	0,369	0,440	0,383
90	0,429	0,390	0,398	0,355	0,427	0,369
95	0,416	0,375	0,385	0,341	0,414	0,355
100	0,403	0,362	0,372	0,327	0,401	0,342
105	0,390	0,349	0,360	0,314	0,389	0,330
110	0,378	0,336	0,348	0,302	0,377	0,317
115	0,366	0,324	0,336	0,290	0,365	0,306
120	0,354	0,312	0,325	0,278	0,354	0,294
125	0,343	0,301	0,314	0,267	0,343	0,284
130	0,332	0,290	0,303	0,257	0,333	0,273
135	0,322	0,280	0,293	0,247	0,323	0,263
140	0,312	0,270	0,284	0,237	0,313	0,253
145	0,302	0,260	0,274	0,227	0,303	0,244
150	0,292	0,250	0,265	0,218	0,294	0,235