

**UNIVERSIDAD DE VALPARAÍSO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**



**Análisis de Comportamiento y Falla de Sellos de  
Alta Fricción en Carpetas Asfálticas y de Hormigón**

Por

**Alejandra Nicole González González**

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

Profesor Guía: Mauricio Pinto Quintana

Enero, 2016

## Agradecimientos

*Agradezco en esta memoria a todas las personas que estuvieron a lo largo de este proceso y me brindaron todo su apoyo. Agradezco a mis compañeros de colegio que estuvieron en constante apoyo y preocupación. Mis compañeros de universidad Oscar, Rodrigo, Salvador, Jorge y Jared que compartimos estos años de esfuerzo y sacrificio. A mi estimado profesor Mauricio Pinto por su paciencia, apoyo y muchísima ayuda en realizar este último paso para ser profesional. Al profesor Guillermo Brante y todas las personas del laboratorio de vialidad por su preocupación e infinita ayuda, sobre todos a los practicantes que sin ellos todo hubiera sido más difícil. A Jaime Campos y Patricio Appel por toda la ayuda y disposición.*

*Agradezco a mi familia que siempre se preocuparon por mí, debido a la distancia fuera del hogar. A mis tíos y tías, primos y primas que me deseaban la mejor de las suertes. A mis abuelos Ana y Rubén, que siempre me inculcaron estudiar para salir adelante. Mis padres Ramón y Ana que me dieron su amor y preocupación a su manera, y más, me enseñaron a ser fuerte, valiente y demostrarles de lo que era capaz. A mis bisabuelos Orlando y María Isabel que estuvieron apoyándome siempre y a pesar que no están conmigo en vida, estarán en mi corazón para siempre. A mi amor Jonathan por ser fundamental en todos estos momentos difíciles, ser incondicional, mi cable a tierra y darme la fuerza necesaria para terminar esta gran etapa.*

*Finalmente, mi mayor agradecimiento es a una de las personas más importantes en mi vida, a mi abuelita María Cristina. La persona que ha estado conmigo toda mi vida apoyándome, dándome fuerzas, enseñándome y que posee toda mi admiración, por ser la persona más maravillosa de este mundo. A pesar de todas las situaciones, está aún a mi lado y espero que estemos juntas por varios años más.*

*“Nunca dejes que nadie te diga que no puedes hacer algo” En búsqueda de la felicidad.*

# Índice

Ítem	pág.
Glosario .....	6
Lista de abreviaturas y siglas .....	7
Lista de símbolos .....	8
Lista de Figuras .....	9
Lista de Tablas .....	10
Resumen de la memoria .....	11
1 Introducción.....	12
1.1 Planteamiento del Problema .....	12
1.2 Objetivos.....	13
1.2.1 General.....	13
1.2.2 Específicos .....	13
1.3 Alcances de la Investigación .....	14
2 Marco teórico .....	15
2.1 Pavimentos.....	15
2.1.1 Tipos de pavimentos .....	16
2.1.1.1 Pavimentos flexibles.....	16
2.1.1.2 Pavimentos rígidos.....	17
2.2 Mezclas asfálticas .....	17
2.3 Hormigón.....	19
2.4 Superficie de los pavimentos .....	20
2.4.1 Coeficiente de resistencia al deslizamiento .....	20
2.4.2 Abrasión .....	21
2.4.3 Trituración.....	21
2.5 Sello de alta fricción .....	22
2.5.1 Adhesivos .....	22
2.5.1.1 Unión adhesiva.....	23
2.5.1.2 Teorías de adhesión.....	25
2.5.1.3 Modos de falla de la unión adhesiva.....	26
2.5.1.4 Propiedades mecánicas de los adhesivos .....	27
2.5.1.5 Poliuretano .....	28
2.5.2 Bauxita calcinada .....	29
2.5.3 Deterioro y accidentabilidad .....	30
2.5.4 Fallas sello alta fricción .....	33
2.5.4.1 Ruta 60, camino la pólvora.....	33
2.5.4.2 Ruta 60, sector cordillera .....	34

2.5.4.3	Otras experiencias de falla.....	35
2.6	Materiales nacionales.....	37
2.6.1	Adhesivo.....	37
2.6.1.1	Emulsión asfáltica .....	37
2.6.2	Áridos .....	37
2.6.2.1	Escoria de cobre .....	37
2.6.2.2	Gravilla .....	38
3	Metodología de trabajo .....	39
3.1	Sello de alta fricción con materiales nacionales .....	39
3.1.1	Densidad .....	39
3.1.2	Granulometría .....	40
3.1.3	Índice de trituración total .....	40
3.1.4	Ensayo de abrasión húmeda.....	41
3.1.5	Coefficiente de resistencia al deslizamiento .....	43
3.2	Fallas sello alta fricción v/s ensayos de laboratorio .....	45
3.3	Costos sello de alta fricción.....	46
4	Conclusiones y comentarios .....	50
	Referencias bibliográficas y bibliografía.....	52
	Anexos .....	53
I.	Sellos de alta fricción .....	53
II.	Ensayo densidad de partículas sólida.....	56
III.	Ensayo de granulometría .....	57
IV.	Ensayo índice de trituración .....	58
V.	Ensayo de abrasión húmeda.....	60
VI.	Coefficiente de resistencia al deslizamiento .....	62

## Glosario

**Base granular:** Base construida con escoria, roca, grava y/o arena trituradas o sin triturar, o cualquier combinación de estos materiales.

**Capacidad de soporte:** Capacidad de un material que forma parte de la fundación de un pavimento, para resistir los esfuerzos que le son transmitidos.

**Compresión:** Resultante de las fuerzas internas de un cuerpo sometido a presiones con el objetivo de acortar su longitud o reducir su volumen.

**Densidad:** Masa de un material por unidad de volumen.

**Elastomérico:** Tipos de compuestos con propiedades elásticas.

**Flexotracción:** Resultante de las fuerzas internas de un cuerpo sometido a presiones con el objetivo de deformarse y alargar su longitud.

**Fricción:** Resistencia desarrollada en la interfaz neumático-pavimento que evita el deslizamiento cuando se aplican fuerzas de frenado al neumático.

**Granulometría:** Distribución dimensional de las partículas de un suelo o agregado, expresada por la proporción en peso de material existente de cada tamaño según tamices determinados.

**Porosidad:** Relación entre el volumen de los vacíos de un material y el volumen total del mismo.

**Ramales:** Similar a una bifurcación o salida y/o entrada de un camino.

**Rigidez:** Característica de un material que le permite soportar esfuerzos de alta magnitud sin deformaciones apreciables.

**Roce:** Fuerzas producidas entre cuerpos en contacto, y que por su naturaleza oponen resistencia a cualquier tipo de movimiento de uno respecto al otro.

**Rugosidad:** Irregularidades superficiales de un camino debido al uso de vehículos.

**Subbase granular:** Capa de un pavimento asfáltico que se encuentra inmediatamente debajo de la base granular con similares características y materialidad.

**Subrasante:** Capa de suelo preparada para soportar la estructura del pavimento.

**Tamiz:** Malla metálica o plancha perforada destinada a separar agregados o suelos, según los tamaños de sus partículas.

**Tracción:** Resultante de las fuerzas internas de un cuerpo sometido a presiones con el objetivo de alargar su longitud.

**TMDA:** Volumen de tránsito promedio diario a lo largo de un año.

**Viga:** Elemento estructural de tipo horizontal.

## Lista de abreviaturas y siglas

G/m<sup>2</sup>: Gramos por metro cuadrado

Hrs: Horas

IMDp: Intensidades medias diarias de vehículos pesados

IVA: Impuesto al valor agregado

Kg/m<sup>2</sup>: Kilogramos por metro cuadrado

Kg/m<sup>3</sup>: Kilogramos por metro cúbico

Km: Kilómetros

M: Metros

M.s.n.m: Metros sobre el nivel del mar

M<sup>2</sup>: Metros cuadrados

MC-V5: Manual de carreteras volumen 5

MC-V8: Manual de carreteras volumen 8

Mín: Mínimo

Mm: Milímetros

NCh: Norma chilena

PG-3: Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes

T máx: Tamaño máximo

TMDA: Tránsito Medio Diario Anual

U.F.: Unidad de Fomento

V/s: Versus

## Lista de símbolos

%: Porcentaje

T°: Temperatura

°: Grados

≥: Mayor o igual

>: Mayor que

<: Menor que

": Pulgadas

\$: Pesos chilenos

## Lista de Figuras

Figura 2.1-1 - Capas básicas de un pavimento flexible .....	16
Figura 2.5-1 - Esquema unión adhesiva .....	22
Figura 2.5-2 - Adhesión y cohesión .....	23
Figura 2.5-3 - Fallas de uniones adhesivas .....	26
Figura 2.5-4 - Diagrama tensión - deformación adhesivo elastoplástico .....	27
Figura 2.5-5 - Bauxita .....	29
Figura 2.5-6 - Fricción v/s años .....	31
Figura 2.5-7 - Accidentabilidad ruta 60, cuesta balmaceda .....	32
Figura 2.5-8 - Desprendimiento sello de alta fricción .....	33
Figura 3.1-1 - Índice de trituración .....	41
Figura 3.1-2 - Abrasión húmeda de áridos con adhesivo de poliuretano .....	42
Figura 3.1-3 - Abrasión húmeda de áridos con emulsión asfáltica .....	42
Figura 3.1-4 - Coeficiente de resistencia al deslizamiento de áridos con adhesivo de poliuretano .....	43
Figura 3.1-5 - Coeficiente de resistencia al deslizamiento de áridos con emulsión asfáltica .....	44
Figura 3.2-1 - Costos sello de alta fricción .....	49
Figura I-1 - Bauxita calcinada sobre resina incolora (china gris) .....	53
Figura I-2 - Bauxita calcinada sobre resina incolora (china) .....	53
Figura I-3 - Bauxita calcinada teñida sobre resina pigmentada (rojo) .....	54
Figura I-4 - Bauxita calcinada teñida sobre resina pigmentada (burdeos) .....	54
Figura I-5 - Bauxita calcinada sobre resina incolora (guayana) .....	55
Figura II-1 - Densidad de partículas sólidas bauxita calcinada .....	56
Figura III-1 - Granulometría gravilla para sello de alta fricción .....	57
Figura IV-1 - Ensayo de trituración escoria de cobre .....	59
Figura IV-2 - Instrumento ensayo de trituración .....	59
Figura V-1 - Muestras ensayo de abrasión húmeda .....	61
Figura V-2 - Instrumento ensayo de abrasión .....	61
Figura VI-1 - Péndulo de fricción británico .....	62

## Lista de Tablas

Tabla 2.2-1 - Clasificación de mezclas asfálticas .....	17
Tabla 2.3-1 - Clasificación del hormigón .....	19
Tabla 2.4-1 - Coeficiente de resistencia al deslizamiento con equipo SCRIM .....	20
Tabla 2.4-2 - Coeficiente de resistencia al deslizamiento con péndulo TRRL .....	21
Tabla 2.4-3 - Exigencias para abrasión .....	21
Tabla 2.5-1 - Clasificación de los adhesivos .....	23
Tabla 3.1-1 - Densidad de partículas sólidas para los áridos analizados .....	39
Tabla 3.1-2 - Granulometría bauxita calcinada .....	40
Tabla 3.1-3 - Índices de trituración para los áridos analizados .....	40
Tabla 3.1-4 - Pérdida de material por ensayo de abrasión húmeda (Kg/m <sup>2</sup> ) .....	41
Tabla 3.1-5 - Coeficiente de resistencia al deslizamiento .....	43
Tabla 3.2-1 - Costos y rendimiento sello alta fricción cuesta balmaceda (año 2011) .....	46
Tabla 3.2-2 - Valores U.F. 2011 y 2015 .....	46
Tabla 3.2-3 - Costos y rendimiento sello alta fricción cuesta balmaceda (año 2015) .....	47
Tabla 3.2-4 - Costos y rendimientos sello alta fricción con gravilla .....	48
Tabla 3.2-5 - Costos y rendimientos sello alta fricción con escoria de cobre .....	49
Tabla III-1 - Granulometría gravilla .....	57
Tabla III-2 - Granulometría escoria de cobre .....	57
Tabla IV-1 - Datos trituración bauxita calcinada .....	58
Tabla IV-2 - Datos trituración escoria de cobre .....	58
Tabla IV-3 - Datos trituración escoria de cobre .....	58
Tabla V-1 - Datos abrasión húmeda bauxita calcinada .....	60
Tabla V-2 - Datos abrasión húmeda escoria de cobre .....	60
Tabla V-3 - Datos abrasión húmeda gravilla .....	60
Tabla VI-1 - Datos coeficiente de resistencia al deslizamiento (TRRL) bauxita calcinada .....	62
Tabla VI-2 - Datos coeficiente de resistencia al deslizamiento (TRRL) escoria de cobre .....	62
Tabla VI-3 - Datos coeficiente de resistencia al deslizamiento (TRRL) gravilla .....	62

## Resumen de la memoria

Se considera analizar el uso de una nueva técnica importada desde Europa para la disminución de los accidentes automovilísticos, llamados sellos de alta fricción. Estos sellos compuestos de adhesivo de poliuretano y árido conocido como bauxita calcinada, proporcionan una mejor adherencia entre pavimento y neumático.

Al aplicar estos sellos en la Ruta 60, camino La Pólvora en la región de Valparaíso, se determina su efectividad a partir de datos de accidentes automovilísticos, destacando su disminución a cero, y manteniendo el coeficiente de fricción sobre el mínimo establecido por el manual de carreteras, desde su etapa inicial hasta cuatro años después de su uso por el tráfico. Además, en Chile es el único lugar donde el sello de alta fricción presenta fallas en pavimentos de hormigón y asfalto, determinando que la falla principal es porque se utiliza en caminos que ya su vida útil finalizó o hubo aumento de tráfico vehicular, generando un deterioro por fatiga, y el sello no resiste presiones ya que no es un apoyo estructural.

Con el objetivo de proponer un nuevo sello de alta fricción con materiales chilenos, el sello original se somete a ensayos de trituración, abrasión y coeficiente de fricción. En un principio, se considera utilizar ensayos propios del país de origen de los materiales (Inglaterra), pero se opta por realizar los ensayos nacionales ya que se debe regir por las normas donde el sello será utilizado, que en este caso es el manual de carreteras. Los sellos de alta fricción son nuevos en el país, por tanto la legislación no hace referencia a todos los índices exigidos, por tanto, los resultados de los ensayos que el sello original fue sometido, son un indicador para los resultados de los nuevos materiales.

Los materiales a utilizar son escoria de cobre, gravilla y emulsión asfáltica como alternativas. Al ser sometidos al ensayo de trituración, todos los áridos cumplen con la exigencia mínima. El ensayo de abrasión determina que el sello original posee menor pérdida de material, seguido de la escoria de cobre y gravilla, todos ellos con adhesivo; pero los áridos con la emulsión asfáltica no son compatibles ya que la emulsión no es capaz de adherirse a estos como capas sobrepuestas, sino que funcionaría como una mezcla de ellos, pero sería un tratamiento superficial común. Finalmente, el coeficiente de resistencia al deslizamiento determina que la mejor elección es escoria de cobre con el adhesivo original, con un índice más alto.

Los costos asociados al sello de alta fricción hacen una diferencia respecto a los materiales nacionales. Con el resultado de los ensayos de laboratorio, el árido es lo que se puede reemplazar. La bauxita calcinada, con un 35% del valor de los materiales y comparándola con la escoria de cobre, sería una disminución a un 83% del valor por metro cuadrado de este sello. Por tanto, es una alternativa al sello de alta fricción original.

# 1 Introducción

## 1.1 Planteamiento del Problema

Debido a las nuevas tecnologías y a un cambio en el estilo de vida, la sociedad tiene una necesidad de desplazarse más rápidamente por los caminos y carreteras fuera de las ciudades, y también por las calles y avenidas dentro de las áreas urbanas. Además, por el aumento del parque automotriz y las altas velocidades de éstos, se incrementan las probabilidades de accidentes de tránsito.

Chile posee buenas políticas de construcción de carreteras. Los métodos para reducir el riesgo que puede existir, se basan en diseños geométricos y estructurales adecuados a la categoría del camino, basado en las pendientes, los radios de curvas, el tipo de pavimento (de hormigón o asfalto) y los elementos de seguridad vial entre otros.

La problemática existente es que algunos caminos tienen sectores de alta peligrosidad, llamados puntos negros. Las causas de la existencia de estos puntos negros pueden ser por diseño (caminos diseñados geométricamente para condiciones distintas a las actuales, velocidades de operación muy superiores a las velocidades de diseño, etc) o pendientes pronunciadas existentes, que no son fáciles de corregir, y se debe a que los mejoramientos son de alto costo por el hecho que el ámbito de movimiento de tierras es muy oneroso, los proyectos son de limitado presupuesto y/o las rutas no tienen una prioridad alta. Esto significa que hay pocas posibilidades de modificar curvas de tipo horizontal que son potencialmente peligrosas a altas velocidades, ya que los vehículos no siempre cumplen con las reglamentaciones del tránsito con las velocidades máximas establecidas, por tanto aumenta el riesgo de accidentes.

En Europa, se implementa un nuevo método para minimizar los accidentes automovilísticos, identificados como sellos de alta fricción. Su aplicación como tratamiento superficial en los caminos pavimentados permite una mayor adherencia con los vehículos (existe un mayor roce entre el pavimento y los neumáticos) en curvas restrictivas, como también disminuir el tiempo y distancia de frenado de los vehículos en caminos rectos. Además, funciona ante condiciones adversas como hielo y lluvia, donde las posibilidades de accidentes aumentan por la disminución de fricción.

Al importar esta técnica al país, se espera observar su comportamiento tanto en pavimentos asfálticos y de hormigón, y analizar la efectividad en la reducción de los accidentes en caminos de alta peligrosidad donde se han aplicado, tal como es el caso en Nueva Zelanda [1]. También se considera el análisis de las causas de fallas en la aplicación de este método que han redundado en desprendimientos del árido en el país, como ejemplo se produjo una mala adherencia entre sello y pavimento que se ha observado en el camino La Pólvora, y proponer adecuadas soluciones, considerando la posibilidad de implementar esta solución en Chile con materiales nacionales, debido al alto costo del árido que forma parte del sello de alta fricción.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 General

Analizar el uso y comportamiento de los sellos de alta fricción en los caminos de Valparaíso, a partir de los modos de falla observados y proponer un nuevo sello a partir de materiales chilenos.

### 1.2.2 Específicos

- Definir objetivamente el uso de los sellos de alta fricción.
- Observar el funcionamiento de los sellos de alta fricción, estableciendo diferencias y/o similitudes en pavimentos asfálticos y de hormigón.
- Analizar causas de falla de los sellos de alta fricción.
- Analizar el uso de materiales chilenos en los sellos de alta fricción y su comportamiento, para la optimización de costos.

### **1.3 Alcances de la Investigación**

- Esta investigación se realizará en la región de Valparaíso.
- Se analizará la ruta 60, Camino la Pólvora, correspondiente a pavimento asfáltico entre los Km 5,481-5,578 faja izquierda y Km 5,420-5,587 faja derecha sector cuesta Balmaceda.
- En la ruta 60, en el sector cordillera, los Andes al Túnel Cristo Redentor, se analizarán los sellos de alta fricción en pavimentos de hormigón.
- El sello de alta fricción que se analizará corresponde a los instalados por distintos proveedores de la Dirección de Vialidad de la Región de Valparaíso.
- Se analizarán materiales (áridos y adhesivos) presentes en Chile y de menor costo que puedan tener un comportamiento similar (dureza y adhesión).
- Para comprobar el comportamiento de los sellos con materiales chilenos se utilizarán los ensayos de laboratorio de desgaste y trituración, mencionados en Europa y existentes en Chile.

## **2 Marco teórico**

### **2.1 Pavimentos**

Un pavimento se compone por varias capas superpuestas y compactadas, que poseen distintos espesores y materialidad. Esta estructura se apoya sobre el terreno modificado por el movimiento de tierra, y también compactado para evitar deformaciones del mismo. Este conjunto debe ser capaz de soportar las cargas de los vehículos y las condiciones climáticas en el tiempo de vida útil propuesto.

Cada pavimento tiene sus propias especificaciones de espesores determinados por el flujo vehicular proyectado (TMDA) en los años de vida útil y las condiciones del terreno. Así, el pavimento debe soportar las deformaciones que se incrementan con el clima y proporcionar seguridad para los usuarios.

Con su uso, el mismo pavimento sufre deterioros que deben ser anticipados y que se solucionan con una mantención adecuada en el tiempo.

Por lo tanto, básicamente un pavimento debe proporcionar una superficie segura para los vehículos, cómoda y permanente durante el tiempo, sin deformaciones que no hayan sido consideradas en el proyecto. Para eso, debe resistir las cargas de tráfico y las presiones entre sí, de tal forma que sean repartidas en la estructura dependiendo de la capacidad de soporte que tenga cada capa, y considerar los efectos del clima en la superficie del camino que puede provocar baches y pérdida de textura.

## 2.1.1 Tipos de pavimentos

### 2.1.1.1 Pavimentos flexibles

Los pavimentos de tipo flexible se identifican debido a que una de sus capas contienen rodadoras bituminosas o asfalto. Su rigidez es mínima o casi nula y las deformaciones son decrecientes desde la superficie a la base de la estructura, lo mismo para las presiones desde la superficie. Las capas básicas de este pavimento son capa de rodadura (pavimento), base y subbase granular, como se presenta en la siguiente figura.

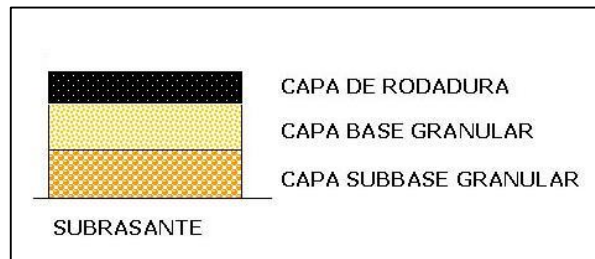


Figura 2.1-1 - Capas básicas de un pavimento flexible

La capa de rodadura bituminosa tiene el contacto con los vehículos. Debe tener una superficie geoméricamente uniforme, una rugosidad suficiente para evitar el deslizamiento de los neumáticos e impedir la penetración de agua a las capas inferiores. Es principalmente una mezcla asfáltica con agregados áridos en caliente que proporciona una buena resistencia y flexibilidad al pavimento, para tránsito medio y pesado. También hay otros tipos de mezclas conocidos como tratamientos superficiales.

- Las lechadas son mezclas en frío de emulsiones asfálticas, áridos, agua y aditivos usadas para mantenimiento de pavimentos, sellado de fisuras, reparación de baches y estabilización de bases y subbases.
- Las emulsiones asfálticas son básicamente asfalto, agua y un agente emulsificante para estabilizar la mezcla, con el mismo propósito que las lechadas.
- La imprimación es un riego de material asfáltico entre una capa de rodadura base y una capa asfáltica, con el objetivo de unir estas capas.

La base granular debe resistir la mayor parte de las cargas verticales de tránsito, sin deformaciones permanentes y compuesta por áridos, que debe cumplir condiciones de granulometría, densidad, capacidad de soporte, entre otras.

La subbase granular debe proporcionar un cimiento fuerte y uniforme para la base, formada por agregados áridos, cumpliendo condiciones al igual que la base granular, pero en menor grado.

### 2.1.1.2 Pavimentos rígidos

Los pavimentos rígidos se componen por una capa superior de hormigón hidráulico. Su rigidez es mayor, por tanto las cargas se distribuyen en una mayor área, proporcionando menores presiones. Tiene un comportamiento de viga, llevándose la mayor parte de la carga. Se utilizan barras de acero para transmitir las tensiones de una losa a otra.

La mayoría de las veces posee una capa de hormigón sobre una subbase granular inmediatamente sobre la subrasante.

## 2.2 Mezclas asfálticas

Las mezclas asfálticas están compuestas por materiales de diferentes características, formado por una combinación de áridos y un ligante a base de hidrocarburos. Su combinación proporciona una masa densa y homogénea. Esta mezcla puede ser realizada por máquinas fijas o móviles; se transportan a la obra, y son extendidas y compactadas.

Poco ligante proporciona poca adhesión de los áridos y mucho, provoca pocos vacíos en la mezcla, por consecuencia los agregados sobresalen. Los agregados se escogen para que las cargas se distribuyan por contacto y una buena mezcla con el ligante, provoca el mecanismo de trabazón de agregados. En la siguiente tabla se presentan algunos criterios de clasificación de las mezclas asfálticas.

Tabla 2.2-1 - Clasificación de mezclas asfálticas

Parámetro	Tipo de Mezcla
Tº de puesta en obra	En frío En caliente
% huecos en mezcla	Densas ( $h > 3$ ) Gruesas ( $10 < h < 15$ ) Porosas ( $h < 28$ )
Tamaño textura superficial	Gruesas ( $T \text{ máx} > 8 \text{ mm}$ ) Finas ( $T \text{ máx} < 8 \text{ mm}$ )
Estructura del árido	Con esqueleto mineral Sin esqueleto mineral
Granulometría del árido	Continua Discontinua

Fuente: Adaptado de [2]

A partir de la clasificación de las mezclas, se especifica:

- Las mezclas en caliente son sobre 150° celsius. Dependiendo de la viscosidad del ligante, se calientan los áridos para evitar el enfriamiento de este. La extensión y compactación, se realiza a temperaturas mayores a la ambiente para lograr una buena efectividad. Las mezclas en frío suelen ser emulsiones y su puesta en obra es a temperatura ambiente.
- El porcentaje de huecos es muy importante ya que se evita las deformaciones plásticas por las cargas y las variaciones térmicas.
- El tamaño del árido determina el espesor mínimo de la capa asfáltica.
- La estructura del árido determina la resistencia interna de los áridos en la mezcla (con esqueleto, mayor resistencia).
- La granulometría es continua cuando los áridos de diferentes tamaños, son distribuidos uniformemente.

Principalmente, el ligante asfáltico tiene consistencia semisólida a temperaturas normales con alto grado de adhesividad, durabilidad e impermeabilidad, además de resistencia a los ácidos y sales, y es altamente hidrófugo. Pero a alturas mayores a 3.000 metros, sufre degradaciones debido a la radiación solar o temperaturas sobre los 220° celsius y puede ser diluido por otros componentes del petróleo (diésel, gasolina).

El inconveniente más grande de la mezcla asfáltica es debido a su ligante, ya que es un material termoplástico (su estado depende de la temperatura). A bajas temperaturas es un sólido elástico, en intermedias (25°-65° celsius) su condición es viscoelástica y a medida que se eleva la temperatura, se convierte en un material de flujo plástico muy viscoso hasta ser líquido. Al sumar las cargas de tránsito y el clima, la mezcla asfáltica tiene altas probabilidades de falla debido a las deformaciones que puede sufrir.

## 2.3 Hormigón

El hormigón es un material cuya composición generalmente es agregados pétreos y un aglomerante (pasta de cemento), compuesto por cemento, agua y aditivos. El hormigón hidráulico, conformado en proporciones adecuadas de los componentes, su objetivo es una buena resistencia ante situaciones acuosas. El hormigón puede ser clasificado, como se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 2.3-1 - Clasificación del hormigón

Parámetros de Clasificación	Tipo de Hormigón
Resistencia a la Compresión	Según el grado
Resistencia a la flexotracción	Según el grado
Presencia de Armaduras	Simple
	Armado
	Pretensado
Densidad Aparente	Liviano
	Corriente
	Pesado

Fuente: Adaptado de [3]

A partir de la clasificación del hormigón, se obtiene:

- La resistencia a la compresión se establece a partir de la resistencia especificada a la ruptura por compresión a los 28 días (laboratorio)
- La resistencia a la flexotracción se establece según la resistencia especificada a la flexotracción a los 28 días (laboratorio).
- Hormigón simple no posee armaduras, armado con enfierraduras y pretensado es armadura tensada.
- Hormigón liviano corresponde entre 300-1.800 Kg/m<sup>3</sup>, corriente entre 2.000-2.800 Kg/m<sup>3</sup> y pesado entre 3.000-4.500 kg/m<sup>3</sup>.

Las complicaciones que se identifican en el hormigón es la baja resistencia a la tracción, sufre cambios por efectos térmicos y de humedad. Los sulfatos y cloruros disminuyen la resistencia al igual que una alta cantidad de agua. Al complementar con armadura, la corrosión de estos provoca disminución de la resistencia debido a la desintegración de los fierros y el aumento de presión que provoca fisuras en el interior de la mezcla. Los ciclos de hielo y deshielo producen graves daños por las variaciones de volumen como lo hace la retracción del mismo material.

## 2.4 Superficie de los pavimentos

A pesar de todas las variables que se consideran en los proyectos de pavimentación, las importantes para los usuarios son aquellas relacionadas con la comodidad y la seguridad, y se basan en la superficie de rodadura, y la interacción con los neumáticos de los vehículos. Esto se traduce en el concepto de resistencia al deslizamiento del pavimento y el desgaste del pavimento, estipulados por los siguientes términos.

### 2.4.1 Coeficiente de resistencia al deslizamiento

El coeficiente de resistencia al deslizamiento entre el pavimento y el neumático, se relaciona con los conceptos de microtextura y macrotextura:

- La microtextura se considera como *“la textura propia de los agregados pétreos. Esta textura es la fundamental para la resistencia al deslizamiento a bajas velocidades”* [4].
- La macrotextura se considera como *“la textura superficial del pavimento, proveniente del efecto conjunto de las partículas de los agregados pétreos debido a su distribución (separación entre partículas) y a la mayor o menor elevación de las partículas por sobre el plano base de la superficie del pavimento”* [4].

En MC-V5, se definen los parámetros mínimos del coeficiente de resistencia al deslizamiento al utilizar el equipo SCRIM o el péndulo de fricción TRRL, dependiente del instrumento que la dirección de vialidad estime conveniente utilizar. En las siguientes tablas, se presentan las consideraciones mínimas para cada equipo de medición.

Tabla 2.4-1 - Coeficiente de resistencia al deslizamiento con equipo SCRIM

Descripción del Sector		SFC
Sectores con Singularidades	Curvas de radio inferior a 100 m	0,55
	Pendientes $\geq 10\%$	
	Aproximación a Intersecciones	
	Intersecciones	
	Aproximaciones a Semáforos	
	Aproximación a Señalización de Prioridad	
Sectores sin Singularidades	Ramales	0,40

Fuente: Tabla 5.408.303.B de [5]

Tabla 2.4-2 - Coeficiente de resistencia al deslizamiento con péndulo TRRL

Descripción del Sector		
Sectores con Singularidades	Curvas de radio inferior a 100 m	Mín 65
	Pendientes $\geq 10\%$	
	Aproximación a Intersecciones	
	Intersecciones	
	Aproximaciones a Semáforos	
Aproximación a Señalización de Prioridad		
Ramales		
Sectores sin Singularidades		Mín 55

Fuente: Tabla 5.408.303.C de [5]

Este parámetro es determinado para pavimentos asfálticos y de hormigón hidráulico.

## 2.4.2 Abrasión

La abrasión considera el desgaste de la superficie debido al tránsito de vehículos sobre el pavimento. El MC-V5 define este parámetro por medio de abrasión húmeda y sus exigencias de pérdidas de material se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 2.4-3 - Exigencias para abrasión

Ensaye	Exigencias
Abrasión Húmeda (1 hr)	Máximo 550 g/m <sup>2</sup>
Abrasión Húmeda (6 días)	Máximo 800 g/m <sup>2</sup>

Fuente: Adaptado de tabla 5.406.301.B de [5]

Estas exigencias son consideradas para lechadas asfálticas. Para el caso de emulsiones elastoméricas, se considera una pérdida de 400 g/m<sup>2</sup>.

## 2.4.3 Trituración

La trituración de los áridos, forma parte del desgaste del pavimento, por tanto es importante para la resistencia de la mezcla árido-asfalto u hormigón, según corresponda. En MC-V5 se especifica que este parámetro se mide por el índice de trituración total y las especificaciones son las siguientes.

- Para lechadas asfálticas, el índice de trituración es máximo 3,5% (Tabla 5.406.202.A [5]).
- Para pavimentos de hormigón, el índice de trituración es máximo 4% para arenas y 20% para áridos gruesos (Sección 5.410.201(2) [5]).

## 2.5 Sello de alta fricción

El sello de alta fricción proveniente de Reino Unido, se compone de un adhesivo y agregado pétreo. A continuación se especifica cada uno de sus componentes, se analiza los objetivos del sello, los resultados de su utilización y las fallas encontradas.

### 2.5.1 Adhesivos

Los adhesivos son sustancias que aplicadas sobre las superficies de dos materiales, permite una unión resistente a la separación. Los materiales que se pretenden unir son llamados sustratos, como se presenta en la siguiente figura [6].

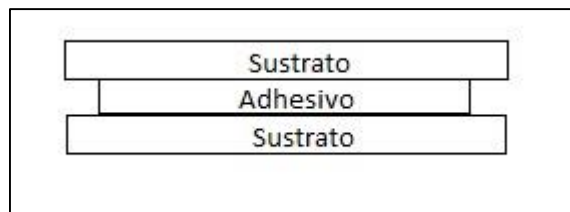


Figura 2.5-1 - Esquema unión adhesiva

Entre las ventajas de los adhesivos se encuentran:

- Permite uniones de sustratos de distintos materiales, tamaños y geometrías.
- No produce deformaciones en los sustratos.
- Distribución uniforme de tensiones.
- Uniones rigidizadas y selladas.
- Proporciona aislamiento.

Entre desventajas o inconvenientes:

- Tiempo de espera para su resistencia final.
- Preparación de las superficies de los sustratos.
- Resistencia al envejecimiento y a temperaturas limitadas.
- Dificultad en el desmontaje de sustratos.
- Precauciones en la seguridad y medioambiente.

Una de las clasificaciones más utilizada para los adhesivos es según el mecanismo de formación de la junta adhesiva. Se identifican dos grupos, los prepolimerizados y los reactivos. Los prepolimerizados son aquellos que el polímero ya existe antes de la unión con los sustratos y los reactivos se deben a que el adhesivo está compuesto de monómeros y que polimerizan al contacto con los sustratos en la unión [6].

En la siguiente tabla se presenta las clasificaciones de los adhesivos.

Tabla 2.5-1 - Clasificación de los adhesivos

<b>Adhesivos prepolimerizados</b>	Fase Líquida	Solución Acuosa	Cementos, colas, almidón
		Soluciones Orgánicas	Caucho natural
		Emulsiones líquidas	En base a PVC
	Fase Sólida	Adhesivos piezosensibles	Cintas adhesivas
		Adhesivos termofusibles	Poliéster
<b>Adhesivos Reactivos</b>	Poliadición		Cianoacrilatos, acrílicos
	Policondensación		epoxis, siliconas

Fuente: Adaptado de [6]

### 2.5.1.1 Unión adhesiva

En base al esquema de la unión adhesiva, se identifican dos conceptos importantes, presentados en la siguiente figura.

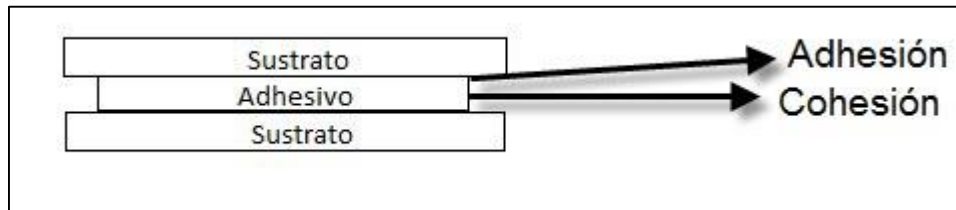


Figura 2.5-2 - Adhesión y cohesión

La adhesión corresponde al conjunto de mecanismos y fuerzas que mantienen unido el sustrato y el adhesivo, situada en una fina capa entre estos dos elementos. Mientras que la cohesión son los mecanismos y fuerzas para mantener la unión del propio adhesivo [6].

Las fuerzas que permiten tanto la adhesión como la cohesión, son los enlaces químicos y las fuerzas intermoleculares. Los enlaces químicos importantes en la unión adhesiva son los enlaces covalentes que son interacciones que ocurren en la capa electrónica de los átomos, uniéndose formando moléculas o compuestos estables. Por otro lado, las fuerzas intermoleculares son las fuerzas repulsivas y atractivas entre las moléculas debido a la ausencia o presencia de electrones [6].

Principalmente la unión adhesiva debe cumplir con características específicas antes y después del ensamblaje [6].

- Antes del ensamblaje, el adhesivo debe ser capaz de igualar la superficie de contacto de los sustratos e introducirse en todas las cavidades existentes en la unión.
- Después del ensamblaje, debe mantener los sustratos unidos y tener la capacidad de evitar el ingreso o salida de cualquier material.

Antes del ensamblaje, hay factores que son importantes para la unión adhesiva y determinantes para las fases posteriores [6].

- Tensión superficial del adhesivo

La tensión superficial es cuando la superficie de un líquido se comporta como una fina capa elástica, y este se resiste a aumentar su superficie. Se identifica como la energía que debe emplear para que una molécula en el interior del líquido, pueda salir al exterior y aumentar la superficie. El valor de la tensión se ve afectada por las temperaturas, ya que a menores índices las fuerzas intermoleculares son menos efectivas, y por la naturaleza del adhesivo [13].

- Energía superficial del sustrato

La energía superficial es la suma de todas las fuerzas intermoleculares del sustrato en su superficie, siendo el grado de atracción o repulsión que una superficie de un material ejerce sobre otro [12].

Para que sea efectiva la unión, la tensión superficial del adhesivo debe ser menor a la energía superficial del sustrato. Además, el ángulo de contacto de ambos materiales debe ser menor a  $90^\circ$  para ser efectiva la unión [13].

- Reología del adhesivo

La reología es la ciencia de la deformación y flujo de la materia, y se caracterizan en propiedades como la viscosidad, consistencia, propiedades elásticas. En este caso depende de cada adhesivo [12].

### 2.5.1.2 Teorías de adhesión

Existen varios modelos que tratan de explicar la adhesión de los adhesivos con los sustratos [6].

- Teoría mecánica

Se debe principalmente a la relación de rugosidad y porosidad del sustrato, y la capacidad de penetración del adhesivo en estas irregularidades por su viscosidad. Básicamente es una unión basada en la topografía superficial del sustrato. Es la teoría más antigua de adhesión [6] [12].

- Teoría de la difusión

Explica la unión debido a las semejanzas entre polímeros. Debido a los movimientos de los mismos polímeros, hay una unión parcial que produce una zona de transición entre sustrato y adhesivo. Se entiende que es poco convencional este tipo de unión, ya que los polímeros deben ser compatibles [6] [12].

- Teoría eléctrica o electroestática

Se basa en la existencia de una doble capa eléctrica entre sustrato y adhesivo. A semeja a un condensador debido a las cargas de signo opuesto por los diferentes materiales a unir. Se puede visualizar uniones covalentes o de Van der Waals [6] [12].

- Teoría de la adsorción termodinámica o mojado superficial

Es la unión mediante fuerzas intermoleculares entre sustrato y adhesivo, principalmente por la capacidad de contacto del adhesivo. Las diferentes fuerzas involucradas son Van der Waals, puentes de hidrógeno, enlaces iónicos y covalentes. Esta teoría tiene validez para cualquier tipo de unión [6] [12].

### 2.5.1.3 Modos de falla de la unión adhesiva

Para evaluar la unión entre dos sustratos, la forma más simple es someter a un ensayo de rotura. Las posibles formas de falla e ilustradas en la figura, se presentan a continuación [6].

- Fallo cohesivo: Cuando existe rotura del adhesivo.
- Fallo adhesivo: Cuando la separación es en la interfase sustrato-adhesivo.
- Fallo del sustrato: Cuando falla el sustrato antes que la unión adhesiva.

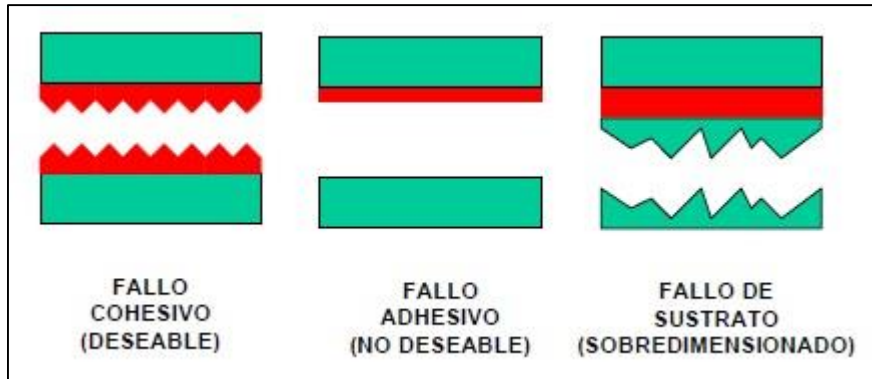


Figura 2.5-3 - Fallas de uniones adhesivas

De todos los modos de falla indicados, el modo menos deseable es el adhesivo, debido a que se debe a una mala adherencia entre el adhesivo y el sustrato, y fundamentalmente se basa en las teorías de adhesión antes mencionadas (muchas variables consideradas). El fallo cohesivo, que es el deseable, se basa en las condiciones mecánicas del adhesivo y que son manejables. Por último, el fallo de sustrato es básicamente la utilización de una gran cantidad de adhesivo [6]

### 2.5.1.4 Propiedades mecánicas de los adhesivos

Los adhesivos más utilizados en aplicaciones ingenieriles son los reactivos. Principalmente, se debe a que la polimerización comienza con la unión al sustrato. Entre sus características mecánicas, se destaca su viscoelasticidad. Se destacan tres tipos de comportamiento mecánico bajo un ensayo de tensión [6] [12].

- Elástico.
- Elástico - frágil.
- Elastoplástico.

El comportamiento elástico es propio de los polímeros conformados por enlaces químicos, llamados elastómeros. Su unión es en forma ligeramente reticulada y debido a esta, poseen un alto grado de elasticidad y flexibilidad antes de fracturarse. Pero a la vez, depende de la temperatura a la que estén sometidos: si al calentarse se deforman son termoplásticos y si no se deforman, son termoestables [6] [12].

El comportamiento elástico-frágil corresponde a los adhesivos termoestables y termoplásticos. Los termoestables son polímeros unidos por enlaces químicos en forma altamente reticular. Esta estructura permite una mayor resistencia frente a temperaturas y cargas, pero baja elasticidad (muy frágiles). Los polímeros termoplásticos están unidos por medio de fuerzas de Van der Waals e intermoleculares, proporcionando una estructuras lineal o ramificada, denominadas cristalinas o amorfas. Las cadenas poliméricas en forma cristalinas proporcionan una alta resistencia (incluso superando a los termoestables), pero bastante frágiles. En cambio, las estructuras amorfas poseen una baja resistencia y una destacable elasticidad [6] [12].

Finalmente, el comportamiento elastoplástico es similar a los metales, con una deformación elástica, zona de deformación plástica y fluencia del adhesivo, como se presenta en la siguiente figura.

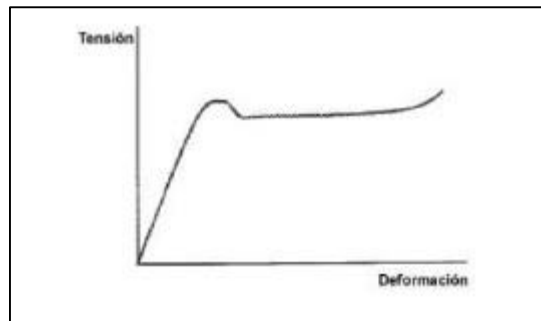


Figura 2.5-4 - Diagrama tensión - deformación adhesivo elastoplástico

### 2.5.1.5 Poliuretano

El Poliuretano recibe su nombre debido a que su cadena principal está compuesto de enlaces de uretano. El poliuretano como adhesivo está compuesto principalmente de [14]:

- Polioles

Se componen a base de glicoles, que son diferentes dioles que otorgan diversas características al poliuretano. Entre ellos se conocen los ésteres, éteres y carbonatos.

- Diisocianatos

Compuesto principalmente por el grupo isocianato (-NCO) que otorga características mecánicas y estructurales.

Este adhesivo se considera reactivo ya que depende de otras sustancias para ser polimerizado. Dentro de las reacciones del poliuretano, se obtiene dos tipos [14].

- Poliuretano monocomponente

Este poliuretano se basa en las reacciones del isocianato con la humedad.

- Poliuretano de dos componentes

Este poliuretano se basa en las reacciones del isocianato con polioles y otros aditivos que pueden acelerar el proceso de polimerización.

En el caso del sello de alta fricción, se utiliza un adhesivo de poliuretano de dos componentes, considerando una resina base y un activador [7]:

- Resina base

Mezcla de polioles ramificados, con poliésteres y poliésteres combinadas con prepolímeros y aditivos

- Activador

Endurecedor de poliisocianato, consistente en diisocianato de difenilmetano

Estos componentes se mezclan en proporción adecuada (50% cada uno) y con una dosis adecuada de 1,7 Kg/m<sup>2</sup>. Dentro de los aditivos de la resina base, se puede pigmentar de diferentes colores.

Particularmente, se considera una imprimación antes de la aplicación del sello en pavimento de hormigón, consistente en una preparación de isómeros de diisocianato de difenilmetano, con xileno como disolvente de líquidos provenientes de los vehículos en tránsito.

## 2.5.2 Bauxita calcinada

La Bauxita es la materia prima del aluminio, *“producida por la meteorización de rocas ígneas en condiciones geomorfológicas favorables”* [8]. Compuesta por óxido de aluminio hidratada con impurezas como el hierro. En la siguiente figura se ilustra la bauxita en estado natural.



Figura 2.5-5 - Bauxita

Para el proceso de obtención de aluminio, la bauxita es sometida al proceso Bayer para convertirse en alúmina y mediante un proceso de electrólisis, llega al producto final de aluminio [15].

El proceso de Bayer consiste en someter a la bauxita triturada a una solución de hidróxido de sodio a altas temperaturas. Los sólidos no disueltos se separan de la mezcla y el resto es sometido a precipitación para formar hidróxido de aluminio. Este último es sometido a hornos que nos entregan la alúmina [15].

El agregado pétreo de los sellos de alta fricción llamado bauxita calcinada es en realidad alúmina obtenida a más de 1.500° celsius.

Con un contenido mínimo de óxido de aluminio ( $Al_2O_3$ ) de un 75% en peso y un 4% en peso máximo de óxido férrico ( $Fe_2O_3$ ), se obtiene una resistencia a altas temperaturas sin deformarse. La dosis especificada es de 10 Kg/m<sup>2</sup> [7] y puede ser pigmentada en diferentes colores.

### 2.5.3 Deterioro y accidentabilidad

Los pavimentos tiene una vida útil definida, que proporciona seguridad y comodidad a los usuarios, pero a lo largo de su utilización, estas percepciones se van perdiendo. Dentro de los factores de riesgo se destaca el objetivo, aquel que el conductor capta por sus sentidos (visual, auditiva, etc); el subjetivo que es lo que el conductor interpreta y finalmente un tipo de riesgo que no es susceptible por el conductor, como las condiciones del pavimento [18].

Una de las condiciones del pavimento que consideramos un riesgo potencial, es la resistencia al deslizamiento o fricción. A partir de los índices de fricción propuestos en el MC-V5, por debajo del mínimo los accidentes son 100% seguros y por encima de estos, da seguridad plena de que no habrá problemas de adherencia entre el vehículo y el pavimento.

Pero en el tiempo, las condiciones climáticas y el tráfico, esta condición de fricción va en descenso. La pérdida de fricción tiene un comportamiento del tipo potencial en el tiempo y los sellos buscan recuperar fricción.

En pavimentos existentes es recuperar esa fricción (micro y macrotextura) y en pavimentos nuevos, maximizar. En la siguiente figura, se ilustra la fricción en el tiempo, considerando el sello en pavimento existente.

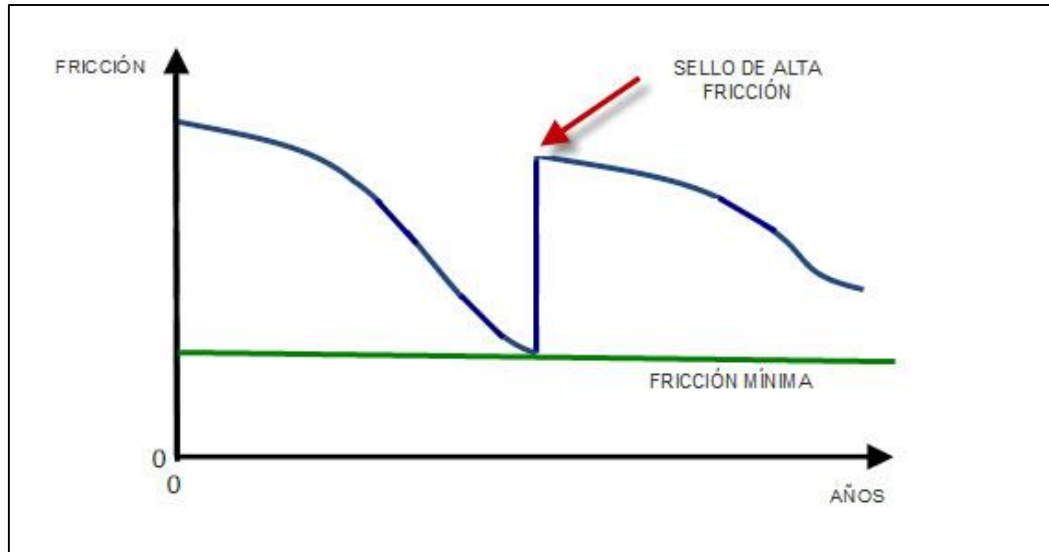


Figura 2.5-6 - Fricción v/s años

Se considera de mayor importancia utilizar los sellos de alta fricción en zonas de mayor complejidad desde el punto de vista de seguridad como se especifica en los siguientes puntos, especificados en la tabla 5.408.303.B de la sección 5.408 de MC-V5.

- Curvas de radio inferior a 100 m
- Pendientes iguales o superiores al 10%
- Aproximación a intersecciones
- Aproximación a semáforos
- Aproximación a señalización de prioridad
- Ramales
- Acceso a pistas de emergencia
- Aproximación a rotondas

Considerando estas singularidades, se considera el caso de la Ruta 60 en la Cuesta Balmaceda, Camino La Pólvara en la región de Valparaíso.

En la siguiente figura, se demuestra la accidentabilidad de este tramo entre septiembre de 2008 y mayo de 2011, considerados antes de la aplicación del sello de alta fricción.

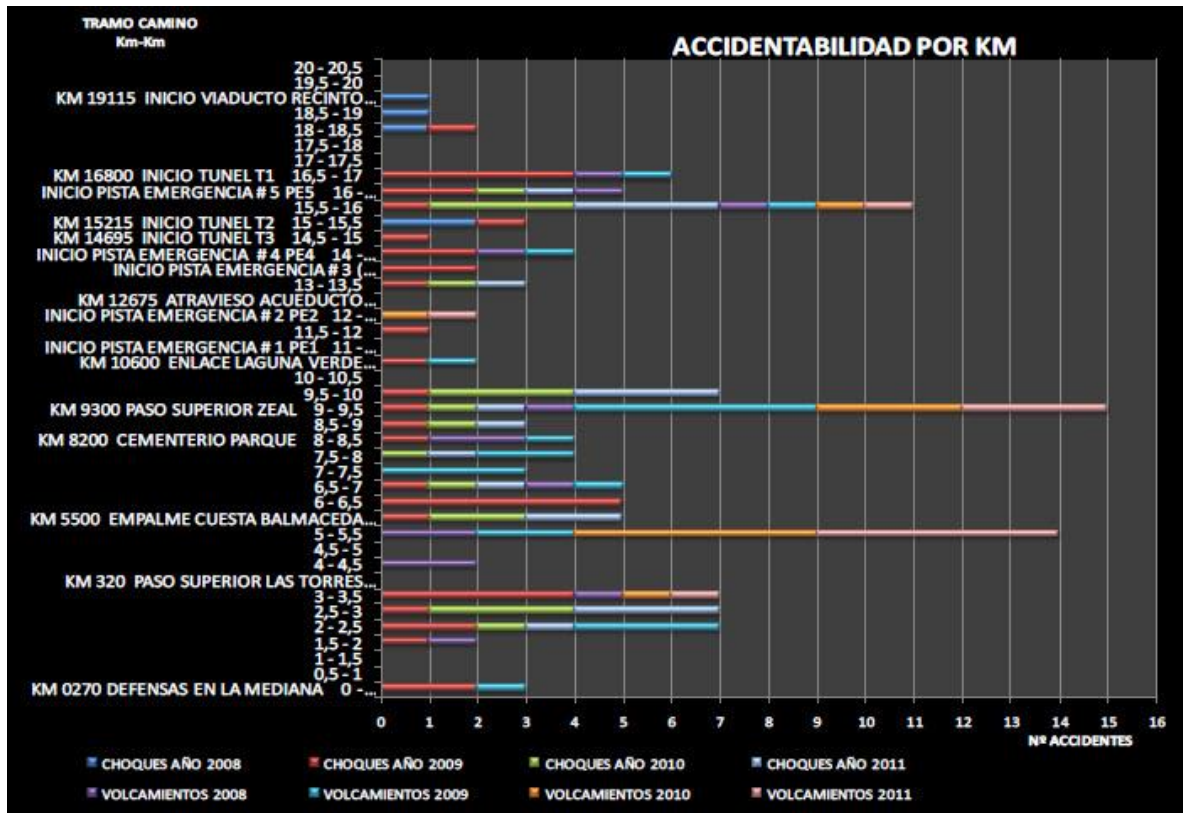


Figura 2.5-7 - Accidentabilidad ruta 60, cuesta balmaceda

A modo de resumen, en el período comprendido se obtiene la información de cinco choques y catorce volcamientos. Además, esta ruta comprende un 75% de flujo vehicular de camiones de carga de importación y exportación por el Puerto de Valparaíso.

Luego de la implementación del sello de alta fricción, los accidentes en el tramo especificado disminuyeron a cero.

Además, al inicio de la aplicación del sello, el coeficiente de fricción fue 90 (con péndulo británico TRRL) y luego de cuatro años, fue de 80 en el tramo que no fue afectado por el desprendimiento del sello.

## 2.5.4 Fallas sello alta fricción

A partir del uso de sellos de alta fricción en el país, se han observado fallas considerables interfiriendo en el objetivo de su utilización. A continuación, se especifica las fallas de dos rutas observadas de pavimento asfáltico y de hormigón, además se especifican otras fallas encontradas en otras rutas de gran relevancia.

### 2.5.4.1 Ruta 60, camino la pólvora

En esta ruta concurrida por camiones de alto tonelaje, debido a la conexión al puerto de Valparaíso, presenta una serie de curvas de alta peligrosidad debido a sus radios de menor longitud. Este camino de pavimento asfáltico, considera una curva horizontal entre los kilómetros 5,48 y 5,58 localizada en la cuesta Balmaceda. El sello fue aplicado en los dos sentidos de tránsito.

Pronto a la colocación del sello de alta fricción, se observaron desprendimientos del tratamiento en su totalidad como se ilustra en la siguiente figura.



Figura 2.5-8 - Desprendimiento sello de alta fricción

A partir de esta falla, se inicia una investigación del área tratada, encontrando agua en el pavimento ya que en el sector hay existencia de napas subterráneas. Con este antecedente muy influyente, se considera dos formas de fallo.

- Falla por presiones internas

Si la aplicación del sello de fricción fue en pavimento seco, el pegamento fue correctamente polimerizado. Por tanto, la capa de pavimento fue totalmente sellada.

Considerando que el pavimento estaba en buen estado, el agua presente en el sector en conjunto con las presiones ejercidas por los vehículos en tránsito, se presentan altas presiones desde el interior al exterior del pavimento, lo que trae por consecuencia que el pavimento en conjunto con el sello sufran fallas.

- Falla por humedad

El agua presente en las napas subterráneas al salir a la superficie, sea en forma líquida o vapor, puede interactuar con el adhesivo afectando su curado, debido a que afecta el funcionamiento del activador en la reacción química considerando una falla del tipo cohesiva. Por tanto, no existe adherencia con el pavimento ni la bauxita calcinada.

Dentro de las consideraciones técnicas del sello de alta fricción, se considera como máximo una humedad basal de 4% hasta un 6% (de acuerdo a experiencias) para evitar que falle el activador.

#### **2.5.4.2 Ruta 60, sector cordillera**

Esta ruta de alto tránsito debido a su conexión con Argentina, presenta curvas peligrosas por ser una zona montañosa, con una altura de aproximadamente 3200 m.s.n.m. y clima extremo como nieve.

Este pavimento de hormigón presentó fallas debido a la implementación del sello, por falta de experiencia de las personas a cargo, ya que no estaban informados de la utilización de un imprimante para pavimentos de hormigón, que impidiera la absorción del adhesivo por el hormigón, por tanto la bauxita quedó libre en la superficie.

### 2.5.4.3 Otras experiencias de falla

A partir de las experiencias en otras rutas, se especifican otras fallas del sello de alta fricción.

- Falla por temperatura

La aplicación del sello está limitado por las temperaturas del pavimento, considerando las especificaciones determinadas en la sección 5.704.305(5) "*Limitaciones climáticas*" [5]. La falla por temperatura es importante para la polimerización del adhesivo, ya que una alta temperatura ayudaría a un quiebre rápido de la mezcla siendo una falla del tipo cohesiva.

- Falla por vida útil del pavimento

El sello de alta fricción es una ayuda para aumentar la fricción en los pavimentos, pero no para aumentar la vida útil de los pavimentos. Las fallas de este tipo de deben principalmente a mayores aceleraciones sobre el sello de vehículos pesados y menores desaceleraciones, ya que las presiones que se ejercen sobre el sello son transmitidos al pavimento. Como el pavimento no es capaz de soportar tales presiones ni las capas subsiguientes, el sello adquiere los esfuerzos por tanto falla. Esta falla de acrecienta cuando el pavimento tiene desgaste en su superficie como ahuellamiento, piel de cocodrilo, agrietamiento y baches entre otras.

- Fallas por mala aplicación

Las etapas de construcción del sello del alta fricción son bastante simples, pero es importante los detalles antes de su aplicación. Como fue explicado anteriormente, una de las fallas fue porque no se utiliza la imprimación en pavimentos de hormigón. En el caso de asfaltos, se debe utilizar una fresadora con el objetivo de regularizar la superficie del pavimento sacando la suciedad como bencina y aceites y obtener un mayor grado de contacto entre adhesivo y el pavimento, para lograr la adherencia.

Al momento de la aplicación del sello, se debe considerar las proporciones entre la resina base y activador, el tiempo de mezcla y los instrumentos a utilizar para conseguir un espesor uniforme sobre el pavimento. El uso de la bauxita calcinada se debe proporcionar cubriendo en su totalidad el adhesivo. Por último, el sello no debe ser compactado y sólo un barrido final para quitar el exceso de material árido.

Considerando la falta de mantenimiento de los pavimentos, en especial el asfalto, se considera la opción que se utiliza en España para mantener el objetivo de los sellos de alta fricción. El capítulo 542 "*Mezclas Bituminosas en Caliente Tipo Hormigón Bituminoso*" [10], exige utilizar exclusivamente asfaltos modificados para las categorías T0 y T00 de tráfico pesado (IMDp >2000). Esto se debe al comportamiento que tiene el asfalto frente a las variaciones de temperaturas.

Además, el PG-3 exige para las mismas categorías de tráfico pesado, el 100% de partículas total o parcialmente trituradas de la fracción del árido grueso del pavimento (según Norma Europea EN 933-5 para la definición de partículas total (>90% de las caras) y parcialmente (>50%, <90% de las caras trituradas).

Esto último, a diferencia de lo especificado en la sección 5.408 "*Mezclas Asfálticas en Caliente*" [5], donde solo se exige un 90% de partículas con las caras chancadas, (según definición del método 8.202-6 del MC-V8, aquellas que tengan dos o más caras fracturadas, y por tanto una arista mínimo ya basta). Este contraste se considera para una mayor trabazón de agregados con el asfalto y una mayor adherencia con el sello. Esto se refleja en particular en los pavimentos de Valparaíso, porque el agregado pétreo es del tipo huevillo (se debe a la forma del árido) y al considerar el uso de sellos de alta fricción, la adherencia es casi nula.

## **2.6 Materiales nacionales**

A continuación se especifica los materiales seleccionados como alternativas al sello de alta fricción original tanto para adhesivo como agregado pétreo.

### **2.6.1 Adhesivo**

#### **2.6.1.1 Emulsión asfáltica**

La emulsión asfáltica de clasificación CRS-2 se considera del tipo catiónica, de quiebre rápido y alta viscosidad. Utilizada como sello o tratamiento superficial, y aplicación en frío.

Su dosificación es de 1 Kg/m<sup>2</sup>, utilizando a 70° celsius y con una temperatura ambiente sobre 10° celsius [9].

### **2.6.2 Áridos**

#### **2.6.2.1 Escoria de cobre**

La escoria de cobre proviene del proceso de obtención del cobre sulfurado. Los procesos para su obtención son las siguientes [16] [17].

- Exploración geológica

Es necesaria para el descubrimiento de yacimientos potenciales para la obtención del mineral.

- Extracción, carguío y transporte

A partir de la extracción de rocas desde la mina a tajo abierto o cerrado por perforaciones y tronaduras, estas son cargadas en camiones y transportadas a las plantas de chancado.

- Chancado

Se realiza el chancado o trituración de las rocas, separando los diferentes tamaños de este.

- Fundición

En esta etapa el material chancado es sometido a hornos especiales a altas temperaturas para obtener el concentrado de cobre separado de otros minerales como sílice, hierro y azufre. Por tanto, se obtiene la escoria de cobre.

### **2.6.2.2 Gravilla**

La gravilla es proveniente de los áridos extraídos del Estero La Patagua en la Región de Valparaíso. Este árido de gran tamaño es sometido a una máquina trituradora o chancadora ubicada en La Ligua, con el objetivo de obtener menores tamaños de árido. En específico, se considera gravilla 3/8" fino.

### 3 Metodología de trabajo

#### 3.1 Sello de alta fricción con materiales nacionales

Debido al alto costo de los materiales originales del sello de alta fricción, se considera realizar nuevos sellos combinando los componentes originales y nacionales como se indica a continuación.

- Adhesivo de poliuretano con bauxita calcinada
- Adhesivo de poliuretano con escoria de cobre
- Adhesivo de poliuretano con gravilla
- Emulsión asfáltica con bauxita calcinada
- Emulsión asfáltica con escoria de cobre
- Emulsión asfáltica con gravilla

Se analiza igualmente el sello original, debido a que los ensayos realizados y detallados por las empresas importadoras, son propios de las normas inglesas. Por tanto, se analizan desde la perspectiva de la normativa chilena para obtener parámetros comparativos con los otros materiales escogidos opcionalmente.

A continuación se precisa los ensayos realizados a todos los materiales antes mencionados, considerando una excelente aplicación de los materiales.

##### 3.1.1 Densidad

Es importante para determinar dosificaciones de los áridos, obtener la densidad que posee. Para ello, se determina a partir de lo especificado en la sección 8.102.10 “*Suelos: Método para determinar la densidad de partículas sólida (LNV 93)*” [11]. Los resultados obtenidos se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 3.1-1 - Densidad de partículas sólidas para los áridos analizados

Áridos	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )
Bauxita Calcinada	2.774
Ruta	3.800
Gravilla	2.720

### 3.1.2 Granulometría

Para comparar los áridos especificados, es necesario determinar su granulometría. A partir de lo especificado en la sección 8.202.3 “*Agregados Pétreos: Método para tamizar y determinar granulometría (LNV 65)*” [11], se determina este parámetro para el árido principal del sello de alta fricción presentada en la siguiente tabla.

Tabla 3.1-2 - Granulometría bauxita calcinada

<b>NCh (mm)</b>	<b>ASTM (inch)</b>	<b>% Retenido</b>	<b>% Que Pasa</b>
5	N° 4	-	100
2,5	N° 8	46	54
1,25	N° 16	52	2
0,63	N° 30	2	0
Residuo		0	0

A partir de la granulometría de la bauxita calcinada, los otros áridos son proporcionados con los mismos tamaños de árido. Se realiza para que los ensayos siguientes tengan un punto de comparación.

### 3.1.3 Índice de trituración total

El ensayo que determina el índice de trituración total, especifica la resistencia de los áridos a la desintegración física por compresión. Se realiza a partir de lo especificado en la sección 8.202.8 “*Agregados Pétreos: Método para determinar el índice de trituración total (LNV 7)*” [11]. Los resultados de los áridos se presentan en la siguiente tabla y figura.

Tabla 3.1-3 - Índices de trituración para los áridos analizados

<b>Áridos</b>	<b>Índice de Trituración Total (%)</b>
Bauxita Calcinada	0,24
Escoria de Cobre	2,49
Gravilla	2,88

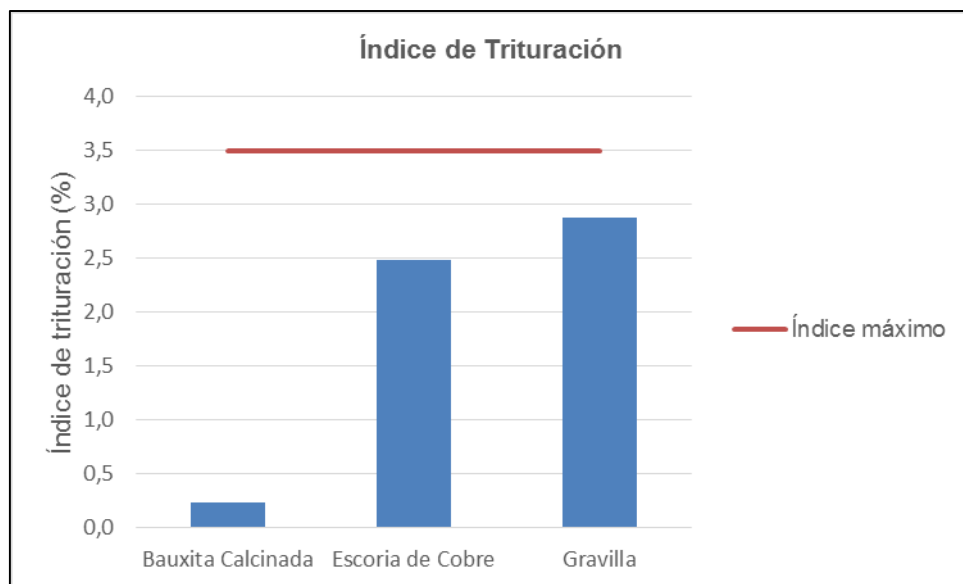


Figura 3.1-1 - Índice de trituración

### 3.1.4 Ensayo de abrasión húmeda

Este ensayo determina el desgaste por abrasión bajo el agua, producido el comportamiento a escala real. Se realiza según lo especificado en la sección 8.302.46 "Asfaltos: Método de abrasión en medio húmedo para lechadas asfálticas" [11].

Para el procedimiento del ensayo, las probetas poseen un área de 0,047 m<sup>2</sup> cada una, por tanto el material se dosifica de la siguiente manera.

- Adhesivo de poliuretano se utiliza 80 gr
- Emulsión asfáltica se utiliza 47 gr
- Bauxita calcinada y gravilla se utiliza 470 gr
- Escoria de cobre, debido a su mayor densidad, se iguala el volumen utilizado para bauxita calcinada, por tanto la masa a utilizar es 633 gr

Los resultados de pérdida de material se especifican en la siguiente tabla y figuras.

Tabla 3.1-4 - Pérdida de material por ensayo de abrasión húmeda (Kg/m<sup>2</sup>)

Árido	Adhesivo de poliuretano	Emulsión asfáltica
Bauxita calcinada	1,79	2,69
Escoria de cobre	2,37	4,98
Gravilla	2,39	6,75

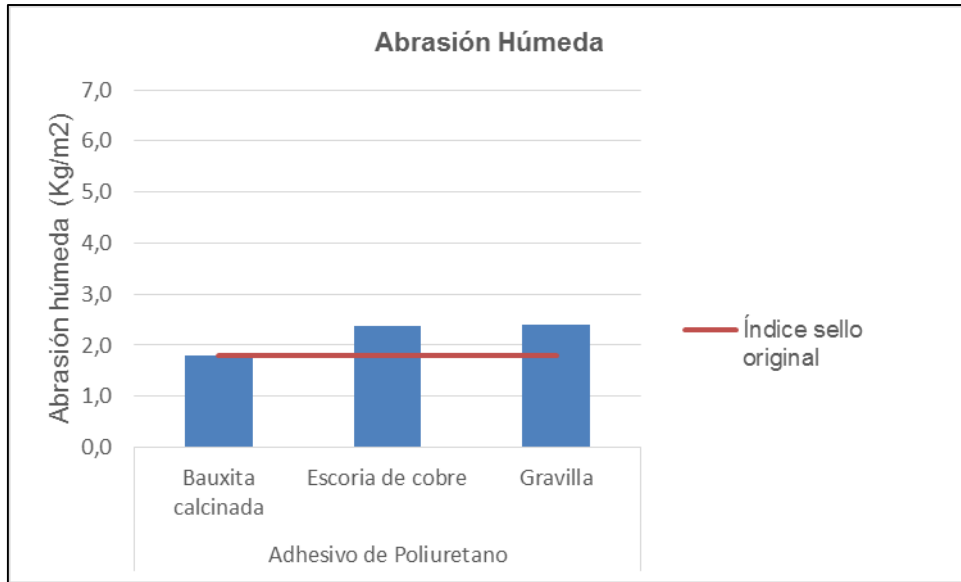


Figura 3.1-2 - Abrasión húmeda de áridos con adhesivo de poliuretano

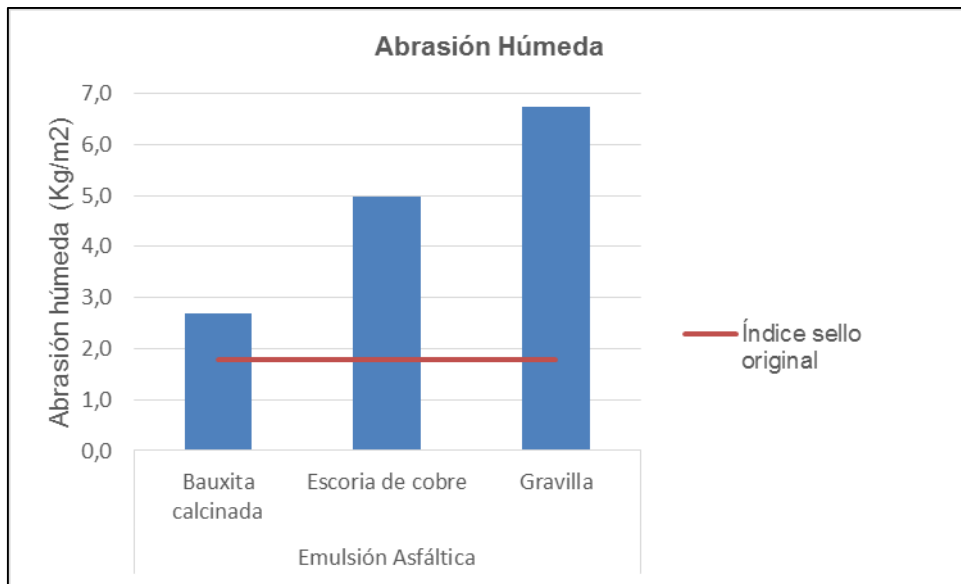


Figura 3.1-3 - Abrasión húmeda de áridos con emulsión asfáltica

### 3.1.5 Coeficiente de resistencia al deslizamiento

Para determinar la resistencia al deslizamiento de los vehículos y pavimento, se utiliza lo especificado en 8.606.24 “Seguridad vial: Método para determinar el coeficiente de resistencia al deslizamiento en el pavimento con péndulo británico (TRRL)” [11].

Debido a que este ensayo se realiza en terreno, se utiliza un molde de 0,25 m<sup>2</sup> para simular condiciones de uso normales. En este caso se realiza cada material en la mitad del molde. La dosificación de los materiales es la siguiente.

- Adhesivo de poliuretano se utiliza 212 gr
- Emulsión asfáltica se utiliza 125 gr
- Bauxita calcinada y gravilla se utiliza 1.250 gr
- Escoria de cobre, debido a su mayor densidad, se iguala el volumen utilizado para bauxita calcinada, por tanto la masa a utilizar es 1.688 gr

Los resultados del coeficiente de fricción se especifican en la siguiente tabla y figuras.

Tabla 3.1-5 - Coeficiente de resistencia al deslizamiento

Árido	Adhesivo de poliuretano	Emulsión asfáltica
Bauxita calcinada	89	64
Escoria de cobre	95	84
Gravilla	83	74

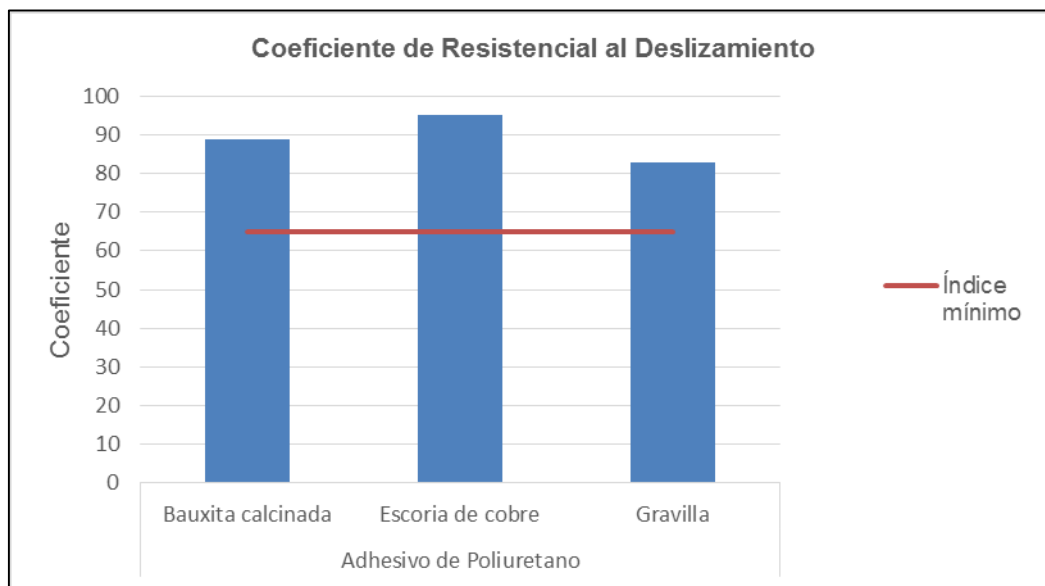


Figura 3.1-4 - Coeficiente de resistencia al deslizamiento de áridos con adhesivo de poliuretano

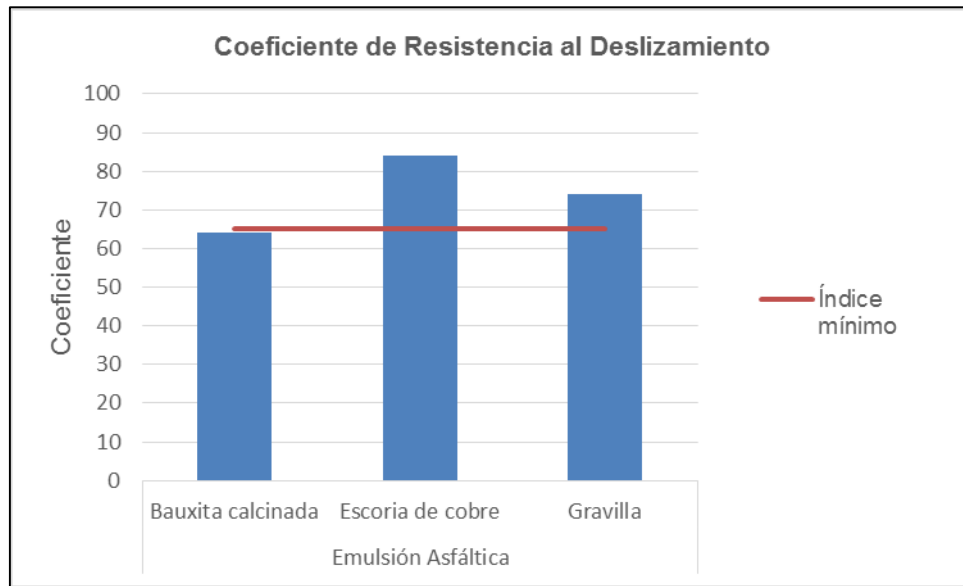


Figura 3.1-5 - Coeficiente de resistencia al deslizamiento de áridos con emulsión asfáltica

## 3.2 Fallas sello alta fricción v/s ensayos de laboratorio

A partir de las fallas del sello de alta fricción descritos y los ensayos de laboratorio efectuados, se establece un análisis de las fallas desde la perspectiva de la experiencia de los ensayos.

Los moldes de prueba de las diferentes variaciones del sello de alta fricción que fueron mal aplicados, mostraron en los ensayos de abrasión húmeda y resistencia al deslizamiento, errores y a veces ni si quiera se pudo terminar la experiencia, ya que las presiones son grandes y tanto el adhesivo como el árido fue desprendido.

Respecto a fallas de temperatura, los moldes con adhesivo de poliuretano resultaron con un aumento de su volumen y encontrando vacíos en el interior del molde, siendo falla en los ensayos. Los moldes con emulsión asfáltica que fueron expuestos a altas temperaturas para su secado no obtuvieron buen resultado ya que la emulsión perdió consistencia siendo líquido y no se adhirió con los áridos.

Considerando una excelente aplicación del adhesivo de poliuretano o emulsión asfáltica en los moldes de laboratorio, y siguiendo con los áridos respectivos, se descarta las fallas por mala aplicación. También se descarta falla por humedad y por temperaturas ya que la base del molde no posee humedad que afecte la polimerización del adhesivo ni que la emulsión no se adhiera correctamente, y las temperaturas son en condiciones ideales de aplicación.

El ensayo de abrasión húmeda demuestra las peores condiciones que un pavimento puede estar sometido a altas cargas de tráfico y bajo las presiones del agua. El ensayo de los áridos con el adhesivo de poliuretano, establecen que existe una buena adherencia, pero hay una pérdida de material considerable por las presiones propias del sello y aun por la aplicación en capas de los componentes. En el caso de la emulsión asfáltica, este no es capaz de mantener una adherencia ni con el árido ni el molde, identificando que la emulsión es efectiva sólo como mezcla con el árido, como es en el caso de las lechadas.

El ensayo de resistencia al deslizamiento establece la fricción de la superficie del pavimento. Los ensayos determinaron buenos índices en las mezclas con adhesivos y en las de emulsión asfáltica, otra vez se observa falta de adherencia. En este punto es importante recalcar que la vida útil del adhesivo con los nuevos áridos sólo se podrá determinar con su aplicación y uso en el tiempo.

### 3.3 Costos sello de alta fricción

A partir del sello de alta fricción original de la Ruta 60 en la Cuesta Balmaceda, en la siguiente tabla se ilustran los costos asociados a su construcción en 2011.

Tabla 3.3-1 - Costos y rendimiento sello alta fricción cuesta balmaceda (año 2011)

		<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio unitario</b>	<b>Total</b>	
<b>Material</b>	Árido (Bauxita) + resina + activador + rodillo + espátula de goma + cintas + supervisión	m <sup>2</sup>	1.820	\$ 29.693	\$ 54.041.260	
<b>Equipos</b>	Fresador manual	m <sup>2</sup>	1.820	\$ 1.637	\$ 2.979.340	
	Compresor	día	11	\$ 21.220	\$ 233.420	
	Grupo electrógeno	día	11	\$ 23.340	\$ 256.740	
	Mezclador de pintura profesional	día	11	\$ 18.270	\$ 200.970	
	Barredora con receptor de excedentes de áridos	hrs	45	\$ 57.682	\$ 2.595.690	
	Camión tolva	hrs	8	\$ 20.635	\$ 165.080	
	Camión pluma	hrs	88	\$ 31.265	\$ 2.751.320	
<b>Herramientas</b>	soplador + escobillones + carretillas + palas con cola de pez + espátulas + tiza + huincha + bolsas big bag		1	\$ 600.000	\$ 600.000	
<b>Mano de obra</b>	Dos cuadrillas (1 capataz + 5 jornales)	cuadrilla /día	22	\$ 65.480	\$ 1.440.560	
					Neto	\$ 65.264.380
					IVA	\$ 12.400.232
					<b>Total</b>	<b>\$ 77.664.612</b>
					Precio/m <sup>2</sup>	\$ 42.673

Fuente: Colorvial

Para actualizar estos precios al año 2015, se relaciona el valor de la U.F. de 2011 y 2015. En las siguientes tablas, se determinan los valores utilizados de la U.F. y el valor actualizado del sello de alta fricción en 2015.

Tabla 3.3-2 - Valores U.F. 2011 y 2015

<b>Fecha</b>	<b>U.F.</b>
Junio 2011	21.852
Diciembre 2015	25.618
Aumento	17%

Tabla 3.3-3 - Costos y rendimiento sello alta fricción cuesta balmaceda (año 2015)

		Unidad	Cantidad	Precio unitario	Total
<b>Material</b>	Árido (Bauxita) + resina + activador + rodillo + espátula de goma + cintas + supervisión	m <sup>2</sup>	1.820	\$ 34.811	\$ 63.356.749
<b>Equipos</b>	Fresador manual	m <sup>2</sup>	1.820	\$ 1.919	\$ 3.492.911
	Compresor	día	11	\$ 24.878	\$ 273.656
	Grupo electrógeno	día	11	\$ 27.363	\$ 300.996
	Mezclador de pintura profesional	día	11	\$ 21.419	\$ 235.613
	Barredora con receptor de excedentes de áridos	hrs	45	\$ 67.625	\$ 3.043.128
	Camión tolva	hrs	8	\$ 24.192	\$ 193.536
	Camión pluma	hrs	88	\$ 36.654	\$ 3.225.585
<b>Herramientas</b>	soplador + escobillones + carretillas + palas con cola de pez + espátulas + tiza + huincha + bolsas big bag		1	\$ 703.426	\$ 703.426
<b>Mano de obra</b>	Dos cuadrillas (1 capataz + 5 jornales)	cuadrilla /día	22	\$ 76.767	\$ 1.688.880
				Neto	\$ 76.514.480
				IVA	\$ 14.537.751
				Total	\$ 91.052.232
				Precio/m <sup>2</sup>	\$ 50.029

Para realizar el cambio de árido en los costos antes mencionados, se determinan las dosificaciones a utilizar.

- La gravilla posee una densidad parecida a la bauxita calcinada, por tanto es la misma dosificación de 10 Kg/m<sup>2</sup>
- La escoria de cobre tiene una mayor densidad, por tanto a partir de los ensayos de laboratorio de abrasión y coeficiente de resistencia al deslizamiento, se determina una dosificación de 13,5 Kg/m<sup>2</sup> aproximadamente.

Los valores de los áridos son los siguientes, considerando un espesor máximo de 5 mm del sello.

- La bauxita calcinada es alrededor del 35% del valor del ítem materiales
- La gravilla tiene un valor de \$12.000 por metro cúbico, con el espesor antes mencionado el precio es \$60 por metro cuadrado. Pero la gravilla del fino 3/8" sólo proporciona un 38% de la granulometría necesaria para realizar el sello, por tanto este valor debe ser aumentado 2,65 veces para obtener el precio adecuado de \$159 pesos por metro cuadrado.
- La escoria de cobre no posee valor

Por tanto, los costos del sello de alta fricción cambiando la bauxita calcinada por gravilla y escoria de cobre son expuestos en las siguientes tablas.

Tabla 3.3-4 - Costos y rendimientos sello alta fricción con gravilla

		<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio unitario</b>	<b>Total</b>
<b>Material</b>	Árido (Gravilla) + resina + activador + rodillo + espátula de goma + cintas + supervisión	m <sup>2</sup>	1.820	\$ 22.786	\$ 41.471.267
<b>Equipos</b>	Fresador manual	m <sup>2</sup>	1.820	\$ 1.919	\$ 3.492.911
	Compresor	día	11	\$ 24.878	\$ 273.656
	Grupo electrógeno	día	11	\$ 27.363	\$ 300.996
	Mezclador de pintura profesional	día	11	\$ 21.419	\$ 235.613
	Barredora con receptor de excedentes de áridos	hrs	45	\$ 67.625	\$ 3.043.128
	Camión tolva	hrs	8	\$ 24.192	\$ 193.536
	Camión pluma	hrs	88	\$ 36.654	\$ 3.225.585
<b>Herramientas</b>	soplador + escobillones + carretillas + palas con cola de pez + espátulas + tiza + huincha + bolsas big bag		1	\$ 703.426	\$ 703.426
<b>Mano de obra</b>	Dos cuadrillas (1 capataz + 5 jornales)	cuadrilla /día	22	\$ 76.767	\$ 1.688.880
				Neto	\$ 54.628.998
				IVA	\$ 10.379.510
				Total	\$ 65.008.508
				Precio/m <sup>2</sup>	\$ 35.719

Tabla 3.3-5 - Costos y rendimientos sello alta fricción con escoria de cobre

		Unidad	Cantidad	Precio unitario	Total
<b>Material</b>	Árido (Escoria de cobre) + resina + activador + rodillo + espátula de goma + cintas + supervisión	m <sup>2</sup>	1.820	\$ 22.627	\$ 41.181.887
<b>Equipos</b>	Fresador manual	m <sup>2</sup>	1.820	\$ 1.919	\$ 3.492.911
	Compresor	día	11	\$ 24.878	\$ 273.656
	Grupo electrógeno	día	11	\$ 27.363	\$ 300.996
	Mezclador de pintura profesional	día	11	\$ 21.419	\$ 235.613
	Barredora con receptor de excedentes de áridos	hrs	45	\$ 67.625	\$ 3.043.128
	Camión tolva	hrs	8	\$ 24.192	\$ 193.536
	Camión pluma	hrs	88	\$ 36.654	\$ 3.225.585
<b>Herramientas</b>	soplador + escobillones + carretillas + palas con cola de pez + espátulas + tiza + huincha + bolsas big bag		1	\$ 703.426	\$ 703.426
<b>Mano de obra</b>	Dos cuadrillas (1 capataz + 5 jornales)	cuadrilla /día	22	\$ 76.767	\$ 1.688.880
				Neto	\$ 54.339.618
				IVA	\$ 10.324.527
				Total	\$ 64.664.146
				Precio/m <sup>2</sup>	\$ 35.530

La comparación de costos se ilustra en la siguiente figura.

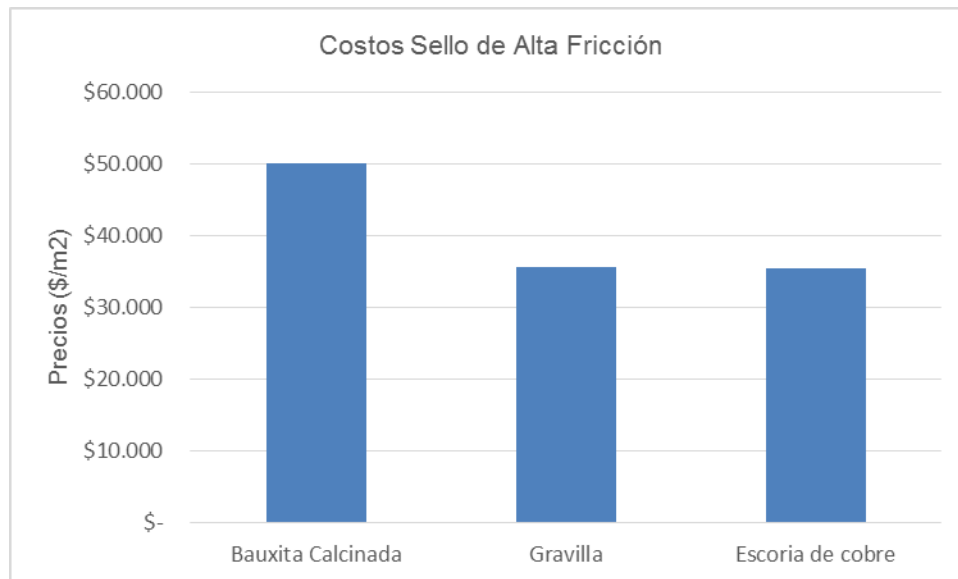


Figura 3.3-1 - Costos sello de alta fricción

## 4 Conclusiones y comentarios

El sello de alta fricción se considera una alternativa real al mejoramiento de la seguridad vial, en cuanto al aumento de fricción para la seguridad de los conductores, por los antecedentes de accidentes automovilísticos en el camino La Pólvora, que disminuyeron después de la aplicación del sello. Además, al medir el coeficiente de fricción con el péndulo británico (TRRL) al inicio de uso del sello y luego de cuatro años, la fricción disminuye de 90 a 80, pero cumple con las exigencias mínimas determinadas en el manual de carreteras. Los sellos de alta fricción tienen la particularidad que pueden ser pigmentados, tanto el adhesivo como el árido, principalmente se pinta rojo por la percepción de peligro y los conductores actúan con cautela, aportando una mayor seguridad.

Las fallas observadas, tanto en pavimentos de hormigón como de asfalto, tienen en común la falta de experiencia en la construcción de estos sellos. Las especificaciones técnicas del fabricante son claras respecto a los protocolos que se deben realizar para la aplicación del sello, desde el almacenamiento de los materiales hasta los controles posteriores a la aplicación del sello. Los procedimientos de construcción del sello difieren, dependiendo del tipo de pavimento, sólo en el inicio debido a que en asfalto se realiza un fresado de la superficie para eliminar desechos que afecten a la unión con el adhesivo y aumentar el contacto con el pavimento, mientras el hormigón se utiliza una imprimación para evitar que el adhesivo sea absorbido y elimina restos de bencina u otros que afecten la adherencia. Luego de esto, los pasos siguientes son iguales.

Para el análisis de un sello de alta fricción chileno, se considera el ensayo de trituración que contempla un índice máximo de 3,5% de trituración de los áridos, por tanto la bauxita calcinada es considerablemente resistente a diferencia de la escoria de cobre y gravilla, pero los otros están bajo el máximo.

El ensayo de abrasión considera la combinación de los áridos con el adhesivo original y una emulsión asfáltica utilizada en lechadas. La normativa contempla un máximo de pérdida de material, pero esto es para una mezcla no capas superpuestas, por tanto se considera el índice del sello original. La pérdida de material es alta comparada con el manual de carreteras y también se considera esa cantidad de kilogramos en las especificaciones técnicas. Los tres áridos están dentro de lo contemplado, pero la unión con la emulsión asfáltica es definitivamente no sustentable. El asfalto no es capaz de adherirse con los áridos como capas superpuestas.

El coeficiente de resistencia al deslizamiento medido por el péndulo británico (TRRL) determina un mínimo de 65 en sectores con singularidades, que es el objetivo del sello. Los resultados determinaron que el adhesivo original con escoria de cobre tiene un mayor coeficiente que el sello original, siendo una alternativa de sello. Al igual que el ensayo de abrasión, los áridos adheridos con emulsión asfáltica tienen índices altos o bajos a la normativa, pero al realizar el ensayo, el árido se separaba continuamente de la emulsión, por tanto no ofrece una alternativa de sello.

Los costos asociados al sello de alta fricción en el camino La Pólvora son de alto valor, debido a todos los materiales, herramientas y equipos utilizados. La bauxita calcinada es aproximadamente el 35% del valor de materiales, y comparando los resultados de los ensayos de laboratorio y los costos de cada árido, la escoria de cobre es una alternativa real debido a la disminución a un 83% de los valores por metro cuadrado.

Es muy importante especificar que los sellos asfálticos normales mejoran la superficie de la carpeta de rodado, sellan grietas y fisuras superficiales, sin embargo los sellos de alta fricción su objetivo principal es mejorar adherencia entre pavimento y neumático, aumentando la seguridad vial, entonces se debe tener presente que no son un aporte estructural al camino y si este posee un grado de deterioro por fatiga, ya que su vida útil finalizó o el tráfico aumentó, el sello no ayudará al soporte de las presiones tanto externas como internas del pavimento.

Para determinar un sello con materiales chilenos se consideran los ensayos que se realizan en el país de origen del sello (Inglaterra), pero es inconsecuente pensar en ensayos que no están en la normativa nacional y más aún si es utilizado acá. En el Manual de Carreteras no hay referencias a esta técnica por su relativa utilización y reciente masificación, por tanto los resultados de los ensayos realizados son verificados con el sello original o según si en la normativa existe alguna referencia. Se determina utilizar la misma granulometría de los áridos, a partir de la bauxita calcinada ya que es un punto de comparación posible y relativamente continua, con tamaños de áridos uniformes. El manual de carreteras no hace referencia a la granulometría utilizada para uso con sellos.

Finalmente, se debe considerar que estos valores de fricción son iniciales y para obtener un resultado definitivo se deberá concretar este nuevo sello y medir su índice a lo largo de unos años de uso por los vehículos.

## Referencias bibliográficas y bibliografía

1. Iskander, R. & Stevens, A. "The Effectiveness of the Application of High Friction Surfacing on Crash Reduction". Paper. Beca Infrastructure Ltd, Auckland, New Zealand. 2005.
2. Bañón, L. & Beviá, J. "Manual de carreteras volumen II: construcción y mantenimiento". Paper. Universidad de Alicante, Ortiz e Hijos, Contratista de Obras S.A. 2000.
3. Instituto Nacional de Normalización. "NCh 170 Of. 1985, Hormigón – Requisitos generales". Norma. 1985.
4. Gaete, R. & De Solminihac, H. & Echeverría, G. "Estudio de la resistencia al deslizamiento en pavimentos asfálticos en Chile". A. Revista de Ingeniería de Construcción N°4 .1988.
5. Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Vialidad. "Manual de Carreteras, Volumen 5: Especificaciones técnicas generales de construcción". Manual. 2008.
6. Madrid, M. "Tecnología de la adhesión". Paper. Departamento Técnico de Loctite España, 2002.
7. Stop. "Colorvial, Reductor de Velocidad. Catálogo.
8. Museo Geológico Virtual de Venezuela. "Minerales de Venezuela, aluminio (Bauxita). Página web. <http://www.pdv.com/lexico/museo/minerales/aluminio.htm/>
9. Química Latinoamericana. "Emulsión CRS-2". Catálogo.
10. Ministerio de Fomento de España. "Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes". Manual. 2014.
11. Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Vialidad. "Manual de Carreteras, volumen 8: Especificaciones y métodos de muestreo, ensaye y control". 2008.
12. La web de los adhesivos. "Adhesivos". Página web. <http://www.losadhesivos.com/>
13. Alicia Sani. "Tensión superficial". Presentación. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. 2010.
14. Tecnología de los Plásticos, "Poliuretano". Página web. <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.cl/2011/06/poliuretano.html>
15. Ecured. "Bauxita". Página web. <http://www.ecured.cu/Bauxita/>
16. Educarchile. "Cobre". Página web. <http://www.educarchile.cl/ech/pro/app/detalle?ID=204865/>
17. Codelco. "Cobre". Página web. [https://www.codelcoeduca.cl/procesos\\_productivos/tecnicos\\_fundicion.asp/](https://www.codelcoeduca.cl/procesos_productivos/tecnicos_fundicion.asp/)
18. Auto Body Magazine, "Teoría Homeostática del Riesgo". Página web. <http://www.autobodymagazine.com.mx/ene12/seguridad.php>

## Anexos

### I. Sellos de alta fricción



Figura I-1 - Bauxita calcinada sobre resina incolora (china gris)



Figura I-2 - Bauxita calcinada sobre resina incolora (china)



Figura I-3 - Bauxita calcinada teñida sobre resina pigmentada (rojo)



Figura I-4 - Bauxita calcinada teñida sobre resina pigmentada (burdeos)



Figura I-5 - Bauxita calcinada sobre resina incolora (guayana)

## II. Ensayo densidad de partículas sólida



Figura II-1 - Densidad de partículas sólidas bauxita calcinada

### III. Ensayo de granulometría

Tabla III-1 - Granulometría gravilla

NCh (mm)	ASTM (inch)	% Retenido	% Que Pasa
5	N° 4	-	100
2,5	N° 8	55	45
1,25	N° 16	20	25
0,63	N° 30	10	15
Residuo		15	0

Tabla III-2 - Granulometría escoria de cobre

NCh (mm)	ASTM (inch)	% Retenido	% Que Pasa
5	N° 4	-	100
2,5	N° 8	47	53
1,25	N° 16	18	34
0,63	N° 30	10	24
Residuo		24	0



Figura III-1 - Granulometría gravilla para sello de alta fricción

## IV. Ensayo índice de trituración

Tabla IV-1 - Datos trituración bauxita calcinada

Grado Seleccionado	Método	Deter. min. N°	Peso Inicial (gr)	Peso Retenido (gr)	Peso que pasa (gr)	ITp (%)	Promedio (%)	% Retenido Granulometría	% Retenido que Representa
2,5	Impacto	1	688,69	687,10	1,59	0,23	0,24	52	96
		2	689,26	687,50	1,76	0,26			
1,25	Impacto	1	667,45	665,60	1,85	0,28	0,27	2	4
		2	667,05	665,30	1,75	0,26			

Tabla IV-2 - Datos trituración escoria de cobre

Grado Seleccionado	Método	Deter. min. N°	Peso Inicial (gr)	Peso Retenido (gr)	Peso que pasa (gr)	ITp (%)	Promedio (%)	% Retenido Granulometría	% Retenido que Representa
2,5	Impacto	1	852,48	830,60	21,88	2,57	2,51	52	96
		2	851,33	830,40	20,93	2,46			
1,25	Impacto	1	845,38	830,90	14,48	1,71	1,87	2	4
		2	840,46	823,40	17,06	2,03			

Tabla IV-3 - Datos trituración escoria de cobre

Grado Seleccionado	Método	Deter. min. N°	Peso Inicial (gr)	Peso Retenido (gr)	Peso que pasa (gr)	ITp (%)	Promedio (%)	% Retenido Granulometría	% Retenido que Representa
2,5	Impacto	1	561,85	544,60	17,25	3,07	2,93	52	96
		2	560,72	545,10	15,62	2,79			
1,25	Impacto	1	565,00	556,30	8,70	1,54	1,71	2	4
		2	563,66	553,10	10,56	1,87			



Figura IV-1 - Ensayo de trituración escoria de cobre



Figura IV-2 – Instrumento ensayo de trituración

## V. Ensayo de abrasión húmeda

Tabla V-1 - Datos abrasión húmeda bauxita calcinada

Muestra	Masa Inicial (gr)	Masa Final (gr)	Diámetro 1 (cm)	Diámetro 2 (cm)	Diámetro 3 (cm)	Diámetro Abrasión (m)	Área Abrasión (m <sup>2</sup> )	Pérdida de Material (kg/m <sup>2</sup> )
Pegamento	477,0	456,2	11,8	11,1	11,3	0,114	0,010	2,04
Pegamento	511,2	492,9	11,0	11,1	10,8	0,110	0,009	1,94
Pegamento	495,2	482,4	10,8	11,4	10,2	0,108	0,009	1,40
Emulsión	245,4	213,3	15,2	14,4	15,3	0,150	0,018	1,82
Emulsión	238,9	215,3	10,9	10,6	10,3	0,106	0,009	2,67
Emulsión	250,6	223,0	10,3	9,2	10,3	0,099	0,008	3,56

Tabla V-2 - Datos abrasión húmeda escoria de cobre

Muestra	Masa Inicial (gr)	Masa Final (gr)	Diámetro 1 (cm)	Diámetro 2 (cm)	Diámetro 3 (cm)	Diámetro Abrasión (m)	Área Abrasión (m <sup>2</sup> )	Pérdida de Material (kg/m <sup>2</sup> )
Pegamento	644,6	607,6	12,5	13,0	12,7	0,127	0,013	2,91
Pegamento	653,7	625,4	12,6	12,8	13,0	0,128	0,013	2,20
Pegamento	618,9	592,2	12,7	13,2	13,3	0,131	0,013	1,99
Emulsión	272,2	233,9	9,8	10,3	9,6	0,099	0,008	4,98
Emulsión	Fallo							
Emulsión	Fallo							

Tabla V-3 - Datos abrasión húmeda gravilla

Muestra	Masa Inicial (gr)	Masa Final (gr)	Diámetro 1 (cm)	Diámetro 2 (cm)	Diámetro 3 (cm)	Diámetro Abrasión (m)	Área Abrasión (m <sup>2</sup> )	Pérdida de Material (kg/m <sup>2</sup> )
Pegamento	415,8	376,5	14,4	14,4	14,1	0,143	0,016	2,45
Pegamento	417,4	389,8	13,1	13,6	12,5	0,131	0,013	2,06
Pegamento	414,7	384,2	12,0	11,8	12,4	0,121	0,011	2,67
Emulsión	181,9	133,7	9,1	9,8	9,7	0,095	0,007	6,75
Emulsión	Fallo							
Emulsión	Fallo							



Figura V-1 - Muestras ensayo de abrasión húmeda



Figura V-2 - Instrumento ensayo de abrasión

## VI. Coeficiente de resistencia al deslizamiento

Tabla VI-1 - Datos coeficiente de resistencia al deslizamiento (TRRL) bauxita calcinada

Muestra	T° (celsius)	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3	Lectura 4	Lectura 5	Promedio	Valor corregido
Pegamento	17,8	88	87	88	92	90	89	89
Emulsión	19,4	64	63	64	64	65	64	64

Tabla VI-2 - Datos coeficiente de resistencia al deslizamiento (TRRL) escoria de cobre

Muestra	T° (celsius)	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3	Lectura 4	Lectura 5	Promedio	Valor corregido
Pegamento	17,8	94	95	96	95	94	95	95
Emulsión	19,4	88	87	85	82	80	84	84

Tabla VI-3 - Datos coeficiente de resistencia al deslizamiento (TRRL) gravilla

Muestra	T° (celsius)	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3	Lectura 4	Lectura 5	Promedio	Valor corregido
Pegamento	19,4	84	80	85	80	85	83	83
Emulsión	19,4	78	77	76	78	79	78	78



Figura VI-1 - Péndulo de fricción británico