



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

ESTUDIO DE LA SUSCEPTIBILIDAD AL
PULIMENTO DE LOS AGREGADOS
UTILIZADOS EN PAVIMENTOS DE
CHILE

SUSANA ANDREA ACHURRA TORRES

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

Profesor Supervisor:
HERNAN DE SOLMINIHAC T.

Santiago de Chile, (Julio, 2009)

© 2009, Susana Achurra T.



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

ESTUDIO DE LA SUSCEPTIBILIDAD AL PULIMENTO DE LOS AGREGADOS UTILIZADOS EN PAVIMENTOS DE CHILE

SUSANA ANDREA ACHURRA TORRES

Tesis presentada a la Comisión integrada por los profesores:

HERNAN DE SOLMINIHAC T.

GUILLERMO THENOUX Z.

TOMAS ECHAVEGUREN N.

VICTOR ROCO H.

FERNANDO RODRIGUEZ R.

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

Santiago de Chile, (Julio, 2009)

(A los amores de mi vida: Cristian,
Sofía y Diego.)

AGRADECIMIENTOS

La realización de la presente investigación no hubiese sido posible sin la colaboración de un importante grupo de personas e instituciones. En primer término quisiera agradecer la guía y apoyo brindado por mi profesor supervisor, Hernán de Solminihaq. Así mismo quisiera manifestar mi gratitud por su interés y aporte a los profesionales integrantes de la comisión, profesor Guillermo Thenoux, Víctor Roco, Fernando Rodríguez y en especial al profesor Tomás Echaveguren por su invaluable apoyo técnico y humano.

Agradezco sinceramente las contribuciones y recomendaciones realizadas por Peter Roe del Transport Research Laboratory del Reino Unido.

Por otra parte quisiera agradecer muy especialmente el apoyo recibido del equipo humano del Laboratorio Nacional de Vialidad del MOP, especialmente del Ingeniero Víctor Moreira y del personal del Subdepartamento de Auscultaciones.

Quisiera destacar el aporte realizado por el técnico laboratorista Juan Carlos Rojas y agradecer su profesionalismo, dedicación y compromiso demostrado a lo largo del desarrollo de su trabajo de laboratorio y muy especialmente por su amistad.

Cabe un reconocimiento muy especial a profesores, funcionarios y compañeros del Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción, de la Pontificia Universidad Católica de Chile, por su apoyo, compañía y alegría.

Finalmente, quisiera destacar el aporte económico realizado por CONICYT, mediante el Fondo de Fomento al Desarrollo Científico y Tecnológico, FONDEF y por la Dirección de Vialidad de Chile a través de su Laboratorio Nacional de Vialidad.

INDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
INDICE DE TABLAS	viii
INDICE DE FIGURAS.....	x
RESUMEN.....	xii
ABSTRACT	xiii
I. INTRODUCCION.....	1
I.1 Antecedentes Generales	1
I.1.1 Textura Superficial	1
I.1.2 Resistencia al Deslizamiento	3
I.1.3 Pulimento de los agregados	4
I.2 Descripción del Problema	6
I.3 Hipótesis.....	6
I.4 Objetivos	7
I.5 Metodología de investigación	7
I.6 Alcances de la investigación	10
I.7 Estructura de la tesis.....	11
II. SIMULACIÓN DEL PULIMENTO DE LOS AGREGADOS.....	12
II.1 Metodologías de simulación	12
II.2 Equipos de laboratorio	12
II.3 Estudios de simulación con la Maquina de Pulimento Acelerado	14
II.4 Ensayo de Pulimento Acelerado de origen Británico	15
II.4.1 Normativas.....	15
II.4.2 Descripción del ensayo	16

II.4.3	Especificaciones de pulimento para los agregados.....	19
III.	IMPLEMENTACIÓN DEL ENSAYO DE PULIMENTO ACELERADO.....	22
III.1	Infraestructura y equipos.....	22
III.1.1	Instalaciones	22
III.1.2	Acondicionamiento del equipo Péndulo Británico.....	22
III.1.3	Acondicionamiento de la Máquina de Pulimento Acelerado	26
III.2	Fabricación de probetas.....	27
III.3	Agregado patrón de ensayo.....	28
III.3.1	Intervalo de aceptación del agregado patrón para Chile.....	29
III.4	Procedimiento de cálculo del Coeficiente de Pulimento Acelerado	35
III.4.1	Ajuste del Coeficiente de Pulimento Acelerado.....	36
III.5	Evaluación de la precisión del ensayo de Pulimento Acelerado.....	37
III.5.1	Repetibilidad.....	37
III.5.2	Reproducibilidad.....	38
IV.	METODOLOGIA EXPERIMENTAL PARA CARACTERIZAR LOS	
	AGREGADOS.....	40
IV.1	Metodología de muestreo y selección de los agregados	40
IV.2	Metodología para caracterizar agregados en función del pulimento.	43
IV.2.1	Diseño experimental	43
IV.2.2	Variables del diseño.....	43
IV.2.3	Espacio de inferencia.....	44
IV.2.4	Cantidad de réplicas.....	45
IV.2.5	Metodología de toma muestras.....	45
IV.2.6	Metodología de toma de datos.....	45
IV.2.7	Metodología de análisis de datos.....	46
IV.3	Metodología para caracterizar agregados en función de su petrografía... 47	
IV.3.1	Diseño experimental	47
IV.3.2	Variables del diseño.....	47
IV.3.3	Espacio de inferencia.....	47
IV.3.4	Cantidad de réplicas.....	49
IV.3.5	Metodología de toma de muestras	49

IV.3.6	Metodología de toma de datos	49
IV.3.7	Metodología de análisis de datos	49
IV.4	Metodología para evaluar la influencia de la petrografía en el pulimento de los agregados	50
IV.4.1	Diseño experimental	50
IV.4.2	Variables del diseño	50
IV.4.3	Espacio de inferencia	50
IV.4.4	Cantidad de réplicas	51
IV.4.5	Metodología de toma de muestras	51
IV.4.6	Metodología de toma de datos	52
IV.4.7	Metodología de análisis de datos	52
V.	RESULTADOS DE LA CARACTERIZACION DE LOS AGREGADOS	54
V.1	Selección de los agregados.....	54
V.2	Caracterización de la Resistencia Mecánica	57
V.2.1	Ensayo de Desgaste de los Ángeles.....	57
V.2.2	Ensayo de Índice de Trituración	59
V.2.3	Ensayo de Desintegración por el Método de los Sulfatos.	60
V.3	Caracterización petrográfica de los agregados.....	62
V.3.1	Análisis de resultados	63
V.4	Caracterización en función del ensayo de Pulimento ciclo estándar	65
V.4.1	Análisis de resultados	66
V.5	Caracterización en función del ensayo de Pulimento ciclo extendido	71
V.5.1	Análisis de resultados	72
V.6	Modelo de pulimento de los agregados en función del tiempo de ensayo	74
VI.	INFLUENCIA DE LA PETROGRAFÍA EN EL PULIMENTO DE LOS AGREGADOS.....	76
VI.1	Modelo de pulimento en función de la petrografía de los agregados	82
VII.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	86
VII.1	Conclusiones	86
VII.2	Recomendaciones respecto del ensaye de pulimento	87

VII.3	Recomendaciones para especificación de pulimento.....	88
VII.4	Futuras líneas de investigación	89
	BIBLIOGRAFIA	90
	A N E X O S	93
	Anexo A: Resultados ensayo pulimento	94
	Anexo B: Especificaciones de pulimento del Reino Unido	98
	Anexo C: Acondicionamiento de equipos para ensayo de pulimento acelerado	99
	Anexo D: Pruebas de verificación del ensayo de pulimento acelerado	101
	Anexo E: Resultado de encuesta para la selección de emprestitos	106
	Anexo F : Resultados ensayos de caracterización mecánica de los agregados.....	109
	Anexo G: Propuesta de norma de ensayo de pulimento	116

INDICE DE TABLAS

	Pág.
TABLA II.1. EQUIPOS DE LABORATORIO PARA LA SIMULACIÓN DEL PULIMENTO	13
TABLA III.1: ANÁLISIS DE REPETIBILIDAD PÉNDULO BRITÁNICO	24
TABLA III.2: ANÁLISIS DE REPRODUCIBILIDAD PÉNDULO BRITÁNICO	26
TABLA III.3 RESULTADO DE PULIMENTO SOBRE EL AGREGADO PATRÓN.	30
TABLA III.4: EVALUACIÓN DE LA VARIABILIDAD DEL ENSAYO DE PULIMENTO ACELERADO.	33
TABLA III.5 RESULTADO DEL ANÁLISIS DE REPETIBILIDAD ENSAYO PULIMENTO.	38
TABLA III.6 RESULTADO DEL ANÁLISIS DE REPRODUCIBILIDAD ENSAYO PULIMENTO	39
TABLA IV.1: MATRIZ FACTORIAL PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL PULIMENTO.	44
TABLA IV.2: MATRIZ FACTORIAL PARA LA CARACTERIZACIÓN PETROGRÁFICA	48
TABLA IV.3: MATRIZ FACTORIAL PARA CLASIFICACIÓN DE MUESTRAS	50
TABLA V.1: RESUMEN DE ENSAYOS APLICADOS A LOS AGREGADOS	54
TABLA V.2: LISTADO DE EMPRÉSTITOS SELECCIONADOS PARA EL EXPERIMENTO	55
TABLA V.3 RESULTADOS DE ENSAYES DE CARACTERIZACIÓN MECÁNICA.	57
TABLA V.4: RESULTADO DE ENSAYO DE CARACTERIZACIÓN PETROGRÁFICA.	63
TABLA V.5 COMPOSICIÓN PETROGRÁFICA PROMEDIO POR ZONA GEOGRÁFICA	64
TABLA V.6: RESULTADO ENSAYO DE PULIMENTO ACELERADO. CICLO 3 Y 6 H.	65
TABLA V.7: RESULTADO ANÁLISIS DE SIGNIFICANCIA DE FACTORES SOBRE EL PSV.	67
TABLA V.8: CLASIFICACIÓN DEL PSV SEGÚN ORIGEN GEOGRÁFICO DEL AGREGADO	67
TABLA V.9 : CLASES DE AGREGADOS POR ZONA GEOGRÁFICA Y PSV	68
TABLA V.10: ANÁLISIS DE VARIANZA DE PSV RESPECTO DEL ORIGEN	69
TABLA V.11: COEFICIENTE DE PULIMENTO ACELERADO AJUSTADO PSVC	70

TABLA V.12: RESUMEN ESTADÍSTICO DE RESULTADOS ENSAYO PULIMENTO EXTENDIDO.	71
TABLA VI.1: ANÁLISIS DE VARIANZA PARA DETECTAR LA INFLUENCIA DE LA PETROGRAFÍA EN EL PSV	81
TABLA VI.2: RELACIÓN DE SIGNIFICANCIA DE LAS CONSTANTES DE CALIBRACIÓN β DEL MODELO PSV VERSUS PETROGRAFÍA.	83
TABLA VI.3: RESULTADOS TEST-T PARA VALIDACIÓN MODELO PSV VERSUS PETROGRAFÍA	85

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
FIGURA I-1. MACRO Y MICRO TEXTURA SUPERFICIAL DEL PAVIMENTO.	2
FIGURA I-2. CLASES DE TEXTURA PRESENTE EN LA SUPERFICIE DEL	2
FIGURA I-3. VARIACIÓN TEMPORAL DE LA RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO.	3
FIGURA I-4: EFECTO DEL TRÁNSITO SOBRE LA RD EN FUNCIÓN DEL	5
FIGURA I-5.METODOLOGÍA DE TRABAJO.	10
FIGURA II-1. EQUIPOS DE SIMULACIÓN DEL PULIMENTO DE LOS AGREGADOS:	13
FIGURA II-2. RELACIONES ENTRE EL PSV Y LA RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO DE TERRENO.	15
FIGURA II-3: MÁQUINA DE PULIMENTO ACELERADO.	16
FIGURA II-4. PROCEDIMIENTO GENERAL DEL ENSAYO DE PULIMENTO ACELERADO	17
FIGURA II-5. RUEDA DE ENSAYO Y PROBETAS PARA ENSAYO	18
FIGURA II-6. ESPECIFICACIONES INTERNACIONALES DE PULIMENTO	21
FIGURA III-1. EQUIPO PÉNDULO BRITÁNICO	23
FIGURA III-2. MATRIZ FACTORIAL PARA PRUEBA DE REPETIBILIDAD EQUIPO	24
FIGURA III-3: MATRIZ FACTORIAL PARA PRUEBA DE REPRODUCIBILIDAD EQUIPO	25
FIGURA III-4. PROCESO DE FABRICACIÓN DE PROBETAS ENSAYO DE PUL. ACELERADO	28
FIGURA III-5: RESULTADOS ENSAYO DE PULIMENTO SOBRE AGREGADO PATRÓN	31
FIGURA III-6: GRAFICO DE PROBABILIDAD NORMAL PARA RD DEL AGREGADO PATRÓN	34
FIGURA IV-1: METODOLOGÍA DE MUESTREO Y SELECCIÓN DE AGREGADOS	41
FIGURA V-1: MACRO ZONAS GEOGRÁFICAS PARA AGRUPACIÓN DE LOS AGREGADOS	56
FIGURA V-2: RESULTADOS ENSAYO DE DESGASTE DE LOS ÁNGELES	58
FIGURA V-3 RESULTADOS DE ENSAYO DE TRITURACIÓN AGREGADO GRUESO	59
FIGURA V-4 RESULTADOS DE ENSAYO DE TRITURACIÓN AGREGADO FINO	60
FIGURA V-5: RESULTADOS DE ENSAYO DE DESINT. POR EL MÉTODO DE LOS SULFATOS	61

FIGURA V-6: VALOR MEDIO DE LA COMPOSICIÓN PETROGRÁFICA COMO % EN VOLUMEN.	62
FIGURA V-7 COMPOSICIÓN PETROGRÁFICA COMO % EN VOLUMEN POR MACRO ZONA.	64
FIGURA V-8: RESULTADO ENSAYO DE PULIMENTO ACCELERADO. CICLO DE 3 Y 6 HORAS.	66
FIGURA V-9: RESULTADOS ENSAYO DE PULIMENTO CICLO EXTENDIDO	72
FIGURA V-10: TENDENCIA DE PULIMENTO DE AGREGADOS A LAS 3, 6, 9 Y 12 HORAS	73
FIGURA V-11: MODELO DE COMPORTAMIENTO DEL PULIMENTO EN LABORATORIO	75
FIGURA VI-1: TENDENCIAS DE PULIMIENTO EN FUNCIÓN DE LA PETROGRAFÍA. ANDESITA	77
FIGURA VI-2: TENDENCIAS DE PULIMIENTO EN FUNCIÓN DE LA PETROGRAFÍA. BASALTO	77
FIGURA VI-3: TENDENCIAS DE PULIMIENTO EN FUNCIÓN DE LA PETROGRAFÍA. CUARZO	78
FIGURA VI-4: TENDENCIAS DE PULIMIENTO EN FUNCIÓN DE LA PETROGRAFÍA. PLAGIOCL.	78
FIGURA VI-5: TENDENCIAS DE PULIMIENTO EN FUNCIÓN DE LA PETROGRAFÍA. GRANITO	79
FIGURA VI-6: TENDENCIAS DE PULIMIENTO EN FUNCIÓN DE LA PETROGRAFÍA. DACITA	79
FIGURA VI-7: TENDENCIAS DE PULIMIENTO EN FUNCIÓN DE LA PETROGRAFÍA. DIORITA	80
FIGURA VI-8: TENDENCIAS DE PULIMIENTO EN FUNCIÓN DE LA PETROGRAFÍA. TOBA.	80
FIGURA VI-9: GRAFICO MODELO OBSERVADO V/S PREDICHO	84

RESUMEN

La mantención de una adecuada Resistencia al Deslizamiento y Textura en la superficie del pavimento es un requerimiento esencial que permite garantizar seguridad en la circulación de los vehículos. Sin embargo, estos parámetros no son constantes en el tiempo disminuyendo aceleradamente durante los primeros años de servicio. El nivel de tránsito y la resistencia al pulimento de los agregados expuestos en la superficie son los factores principales que influyen en la evolución de estos indicadores.

El control del pulimento de los agregados es importante para proporcionar una microtextura adecuada en los pavimentos. Existen diversos ensayos para simular en laboratorio el pulimento de los agregados por efecto del tránsito, entre los cuales el más ampliamente usado es el Ensayo de Pulimento Acelerado, de origen Inglés.

En Chile, se pretende aplicar una normativa para controlar el pulimento de los agregados usados en la construcción de carpetas de rodado. Para ello resulta necesario previamente conocer en qué grado los agregados son susceptibles al pulimento, para lo cual se realizó este trabajo de investigación.

Los resultados mostraron que los agregados chilenos poseían un contenido en torno al 52% de andesitas y basaltos, componentes que se determinó contribuyen notoriamente a reducir la susceptibilidad al pulimento de los agregados. Se obtuvieron valores medios de pulimento a las 6 horas de 38 a 51 unidades PSV, los cuales se acercan a los umbrales de aceptación de la normativa británica.

Con los resultados de esta investigación, se logró conformar una base de información que permitirá en el corto plazo redactar una normativa específica tanto para el ensayo de pulimento acelerado mismo, como para definir valores mínimos de PSV requeridos, contribuyendo así a mejorar la oferta de fricción de los pavimentos.

Palabras Clave: Resistencia al deslizamiento, Pulimento, Agregados, Ensayo de Pulimento Acelerado.

ABSTRACT

The maintenance of a suitable skid resistance and texture of the pavement surface are essential requirements that enable to guarantee safe vehicle traffic.

However, these parameters are not constant in time, decreasing rapidly during the first years of service. The amount of traffic and the resistance to polish of the exposed aggregates of the surface are the main factors that influence the evolution of these parameters.

Controls performed to assess the polish level of the aggregates are important to determine an adequate micro texture of pavements. There exist several tests to simulate in a lab the polish of a certain aggregate as result of traffic. Among those, the most widely used is the Test of Accelerated Polish, developed in England.

There is an initiative to establish a norm in Chile to control the polish of the aggregates used in the construction of rolled asphalt pavements. In order to do so, it is needed to know beforehand to which extent the elements are susceptible to polish, which originated this research.

Results demonstrated that Chilean aggregates had a content of “Andesitas” and “Basaltos” of approximately 52%, components which markedly contributed to reduce the polish susceptibility of aggregates. The median value of polish obtained after 6 hours was within a range of 38 to 51 units of PSV, a result close to the British norm acceptance threshold.

The results of this investigation enabled to construct an information database that will allow drawing up a specific norm, as much for the test of Accelerated Polish itself, as to define minimum required PSV levels, contributing this way to improve the pavement friction offer.

Keywords: Skid Resistance, Polished, Aggregates, Accelerated Polish Test.

I. INTRODUCCION

La presente investigación se enmarca dentro del proyecto Fondef D03I-1042 “Investigación y Desarrollo de Procedimientos para la Medición y Control de Fricción Superficial en Pavimentos en Chile” y complementa el citado proyecto con el estudio del comportamiento de los agregados frente a la acción del tránsito y su pérdida de micro textura, la que influye directamente en la oferta de fricción del pavimento.

I.1 Antecedentes Generales

Una de las principales condiciones que debe cumplir un pavimento es el disponer de una superficie que asegure en todo instante adherencia neumático-pavimento, especialmente en zonas de frenado y curvas cuando el pavimento se encuentra mojado. La adherencia es una propiedad funcional del pavimento que permite que el vehículo conserve en todo momento su trayectoria, especialmente en los virajes, y realizar con seguridad maniobras de frenado en condición de control y de pánico (de Sominihac et al, 2005). Está determinada, por el lado del pavimento, por la resistencia al deslizamiento y textura. Por tanto, el mantener una adecuada resistencia al deslizamiento y macro textura en la superficie, proporcionará una mayor adherencia y por tanto una mayor condición de seguridad en la conducción.

I.1.1 Textura Superficial

La textura de un pavimento puede clasificarse en micro y macro textura (Figura I-1). La macro textura corresponde a la altura media existente entre la superficie expuesta del árido y la matriz en que está inserto. Proporciona los intersticios necesarios para el escurrimiento del agua superficial del pavimento. La micro textura corresponde a las pequeñas asperezas de los agregados ubicados en la superficie del pavimento que permiten la penetración de la película de agua entre el neumático y el pavimento logrando una adherencia adecuada.

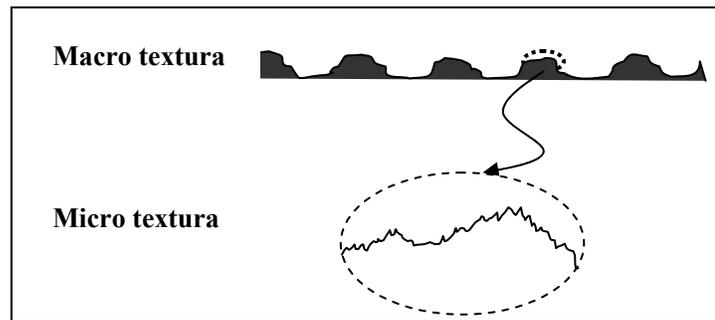


Figura I-1. Macro y Micro Textura superficial del pavimento.

La micro textura debe proveer al pavimento el roce necesario para obtener una adecuada resistencia al deslizamiento a baja velocidad (Cafiso y Taormina, 2006) y puede presentar características de tipo áspero o pulida.

La macro textura puede presentar características de tipo gruesa o fina (Figura I-2). Una macro textura gruesa provee el rápido drenaje del agua bajo el efecto de la presión de los neumáticos y es necesaria para una adecuada resistencia al deslizamiento en velocidad media y elevada con pavimento mojado (Cafiso y Taormina, 2006), mejorando la visibilidad al reducir las proyecciones de agua.

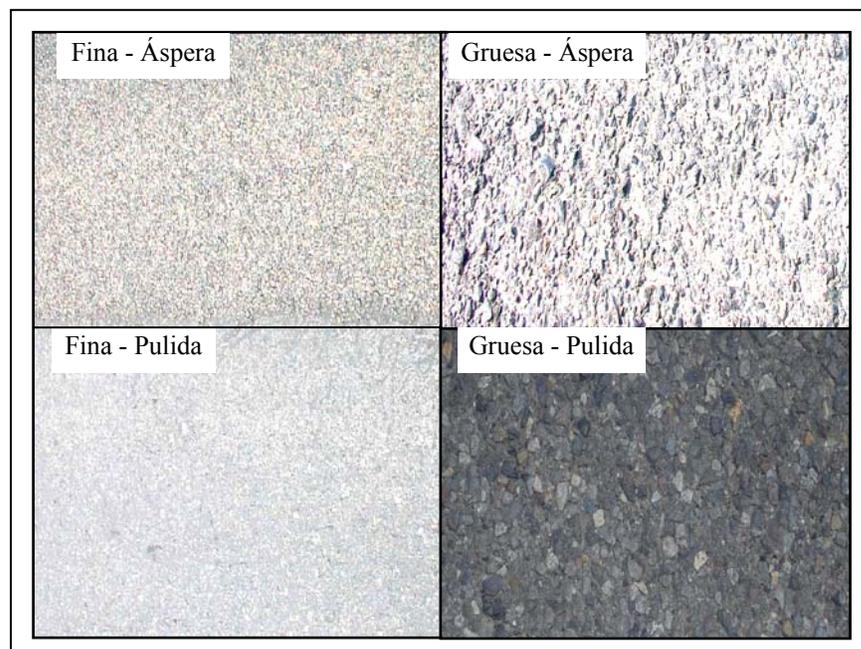


Figura I-2. Clases de textura presente en la superficie del Pavimento (macro-micro) (PIARC, 1995)

La macro textura superficial puede ser medida con equipos de alto rendimiento como el Perfilómetro Láser y con equipos de medición puntual como el Círculo de Arena, ambos disponibles en Chile. Es importante destacar que los indicadores de macro textura obtenidos dependen del método que se emplee para su medición.

En la práctica, la micro textura no es medida de forma directa, aunque existen técnicas para hacerlo. Sin embargo, las mediciones de Resistencia al Deslizamiento permiten evaluar indirectamente este parámetro.

I.1.2 Resistencia al Deslizamiento

La resistencia al deslizamiento (RD), es una propiedad del pavimento que describe su grado de adherencia. Corresponde a la fuerza resultante de la interacción del neumático con el pavimento y la interfase existente entre ellos.

Es un hecho conocido que el valor de la RD varía en el tiempo a corto y largo plazo. La variación a corto plazo está influida por la estacionalidad climática, en tanto que la variación a largo plazo se atribuye principalmente a la acción acumulada del tránsito pesado, a la textura superficial y la susceptibilidad al pulimento de los agregados utilizados en la superficie de rodado. Diringer y Barros (1990) señalan que una superficie de rodado nueva pierde aceleradamente su textura y RD inicial (Fase de Pulimento), hasta llegar a una fase estable (Fase de Equilibrio) en la cual la variación tendencial decrece (Figura I-3).

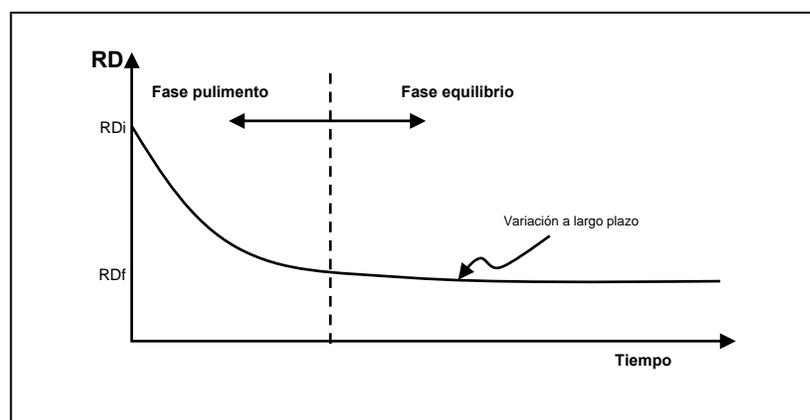


Figura I-3. Variación temporal de la Resistencia al deslizamiento (Diringer y Barros, 1990)

Respecto de la forma de evaluar este parámetro, se puede decir que en el mundo se han desarrollado una serie de dispositivos que permiten medir en terreno la Resistencia al Deslizamiento ofrecida por el pavimento y que pueden ser de tipo estático, o bien de alto rendimiento capaces de realizar mediciones a diferentes velocidades de deslizamiento. Estos equipos se diferencian esencialmente por el principio de medición que utilizan y por las características del neumático de ensayo. Los equipos que actualmente se utilizan en Chile para medir la RD son: SCRIM, Griptester y Péndulo Británico. Todos ellos proporcionan un indicador que es propio y que no es comparable directamente entre ellos.

I.1.3 Pulimento de los agregados

El pulimento de los agregados se define como la pérdida de micro textura de la superficie de los áridos que está expuesta al tránsito. La principal causa del pulimento de los agregados es el tránsito. No obstante lo cual, también está relacionado con la abrasión ejercida por el polvo presente en la superficie del pavimento, con la geometría del camino y con la petrografía de los agregados (Hosking, 1992; Lédeé et al, 2005; Roe, 1998).

En efecto, la presencia de polvo contribuye a la abrasión de los agregados. Dependiendo del tamaño de las partículas de polvo, puede producirse un pulimento “general”, el cual tiende a redondear los agregados, y un pulimento “diferencial”, que tiende a esculpir las caras de los agregados. Este último fenómeno es posible solo en rocas con mezclas de minerales blandos y minerales duros, que producen valles y crestas en la superficie del agregado.

En zonas de frenado o en curvas, es posible que el pulimento sea mayor que en otros sectores, debido a que las fuerzas ejercidas por los neumáticos al describir una trayectoria curva son superiores a las trayectorias rectas, con lo cual aumenta la posibilidad de desgastar por abrasión o fractura los granos minerales componentes de la micro textura.

Además, desde el punto de vista del agregado, la pérdida de micro textura por fracturamiento depende de la composición y dimensión de los granos minerales, y de la forma en que están dispuestos en el agregado (Lédeé et al, 2005). Hosking (1992)

determinó que rocas compuestas por minerales de variadas durezas, o rocas compuestas por granos minerales fácilmente extraíbles dentro de una matriz blanda, proporcionan una resistencia al pulimento relativamente alta. Por el contrario, rocas compuestas por minerales con relativamente la misma dureza y disposición tienen una baja resistencia al pulimento pues se desgastan uniformemente.

En la Figura I-4 se muestra el efecto del tránsito sobre el valor de la RD con diferentes tipos de agregados. En ella se observa que la acción del pulimento producto del tránsito causa la disminución de la RD y que agregados con alta resistencia al pulimento proporcionan una RD más alta para un nivel de tránsito dado que agregados de menor calidad. Por otro lado, a mayor sollicitación de tránsito más rápida es la disminución de la RD en el tiempo (Roe, 1998). Sin embargo, la respuesta de un agregado al tráfico no es lineal y la RD medida no necesariamente disminuye continuamente con el incremento del nivel de tránsito.

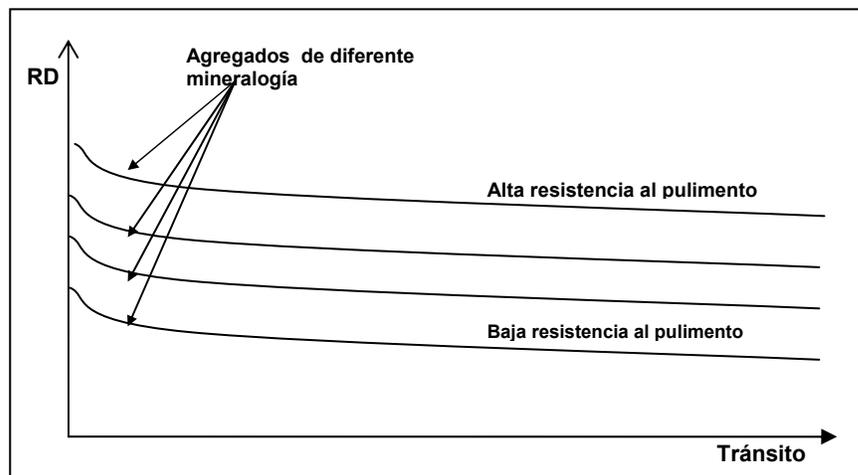


Figura I-4: Efecto del tránsito sobre la RD en función del tipo de agregado (adaptado de Roe, 1998)

I.2 Descripción del Problema

En Chile, las especificaciones de calidad de los agregados utilizadas para las capas de rodado no incorporan exigencias de pulimento. Esto implica que sólo se exigen valores mínimos admisibles de RD y Textura sobre pavimentos nuevos que son contrastables con los valores de largo plazo de RD y Textura de un pavimento. Sin embargo, es deseable también evaluar el comportamiento de los agregados frente al pulimento, puesto que es ésta una variable que indirectamente permite conocer la tasa de pérdida potencial de RD de un pavimento nuevo.

Hasta el año 2007 en Chile no se contaba con un equipo que permitiera caracterizar la susceptibilidad al pulimento. En ese año la Dirección de Vialidad adquirió la Máquina de Pulimento Acelerado, con el fin de incorporar especificaciones de PSV para los áridos usados en la pavimentación y mantenimiento y elaborar posteriormente un prototipo de normativa. De este modo, y de acuerdo a lo visualizado en la experiencia internacional, se postuló la necesidad de crear una base de conocimiento respecto del comportamiento de los agregados en cuanto a su composición petrográfica, al comportamiento de los agregados frente al pulimento y la relación entre ambos factores.

I.3 Hipótesis

Las hipótesis que se plantean para el desarrollo de esta investigación son las siguientes:

- i) El pulimento de los agregados es significativamente dependiente de su composición petrográfica.

- ii) El Coeficiente de Pulimento Acelerado (PSV) medido en laboratorio, representa el valor de la resistencia al deslizamiento en la fase de equilibrio de los principales agregados de Chile.

I.4 Objetivos

El objetivo general del proyecto de investigación fue estudiar el comportamiento de los principales agregados utilizados en capas de rodado de los pavimentos de Chile, desde el punto de vista de su susceptibilidad al pulimento y su relación con la petrografía.

Para lograrlo se postularon los siguientes objetivos específicos:

- a) Realizar una caracterización de la composición petrográfica de los principales agregados usados en la capa de rodado del pavimento.
- b) Caracterizar los principales agregados utilizados en pavimentos de Chile en función del Coeficiente de Pulimento Acelerado (PSV).
- c) Buscar relaciones entre el Coeficiente de Pulimento Acelerado y la composición petrográfica de los agregados.
- d) Evaluar el comportamiento en laboratorio de los agregados, frente a la extensión del período de pulimento con la Máquina de Pulimento Acelerado.
- e) Redactar un prototipo de normativa de ensayo de Pulimento Acelerado.
- f) Recomendar metodología para aplicar especificaciones de pulimento en Chile a los agregados utilizados en la construcción de carpetas de rodado.

I.5 Metodología de investigación

La metodología de investigación considerada para el desarrollo del proyecto consta de doce (12) etapas. La Figura I-5 muestra el diagrama de flujo de la metodología propuesta. A continuación se describe brevemente cada una de las etapas contempladas en la metodología.

- a) Etapas 1. Revisión Bibliográfica: Recopilación de información experimental, normativa y publicaciones sobre el fenómeno del pulimento de agregados y capas superficiales de pavimento. Esta etapa se extiende a lo largo de toda la investigación, siendo paralela a las etapas de Montaje del equipo, (Etapas 2), determinación del diseño experimental (Etapas 4), Recolección y

caracterización petrográfica de los agregados (Etapa 5), Ensayes de pulimento y Ensayes de verificación (Etapa 7 y 8), Análisis de datos (Etapa 10) y comparación de resultados con normativas y experiencias internacionales (Etapa 11).

- b) Etapa 2. Implementación Máquina de Pulimento Acelerado. Luego de la revisión de manuales y documentos sobre el funcionamiento del equipo se lleva a cabo su montaje. En esta etapa se efectuarán ensayos de acondicionamiento y de verificación de las condiciones requeridas para el ensayo. Además se ensayarán agregados en el laboratorio IMAE Argentina, para comparar resultados y verificar procedimiento de ensaye. Incluye también el acondicionamiento del Equipo Péndulo Británico. El desarrollo de esta etapa es paralelo a las etapas 1,3, 4, 5 y 6.
- c) Etapa 3. Selección de empréstitos. En esta etapa se efectúa una encuesta a nivel nacional a los Laboratorios Regionales de la Dirección de Vialidad, para determinar los empréstitos disponibles que produzcan agregados que se estén utilizando en las capas superficiales de pavimentos de tipo asfálticos, hormigón y Tratamiento Superficial.
- d) Etapa 4. Diseño experimental: Diseño de matriz factorial y propuesta de investigación.
- e) Etapa 5. Caracterización petrográfica de los agregados. En base al resultado de la encuesta efectuada en la etapa 3, se realizará la recolección de muestras de agregados a ensayar con el apoyo del Laboratorio Nacional de Vialidad. Además, en esta etapa se realizarán ensayos de laboratorio que permitirán determinar la caracterización petrográfica de los agregados, a fin de determinar propiedades características que se correlacionarán con el pulimento.

- f) Etapa 6: Ensayos de Caracterización de la resistencia mecánica. Se realizarán los siguientes ensayos sobre los agregados: Desgaste de los Ángeles, Índice de Trituración y Desintegración por el Método de los Sulfatos. Estos resultados se usaran además para la selección de los agregados.
- g) Etapa 7: Ajuste del Diseño Experimental. A partir de los resultados obtenidos de la Etapa 3 y 6, se seleccionarán las muestras para análisis y se completará y/o modificará la matriz factorial propuesta en la etapa 4 del proyecto.
- h) Etapa 8: Ensayo de Pulimento Acelerado. En esta etapa se realizarán los ensayos de pulimento acelerado a los agregados, dependiendo de las condiciones de control del experimento definidas en el factorial.
- i) Etapa 9: Ensayo de Pulimento extendido. Corresponde al ensayo de agregados considerando la extensión del período de pulimento.
- j) Etapa 10: Análisis de datos. Corresponde al análisis estadístico de los resultados (estadística descriptiva, ANOVA, Regresiones, entre otros) y a la caracterización de los agregados en función del pulimento y su petrografía.
- k) Etapa 11: Comparación de resultados: Los resultados obtenidos en las etapas anteriores, se compararan con normativas y experiencias internacionales.
- l) Etapa 12: Conclusiones y recomendaciones. Redacción del informe final de la Tesis de Investigación con descripción del experimento, resultados obtenidos, conclusiones y recomendaciones.

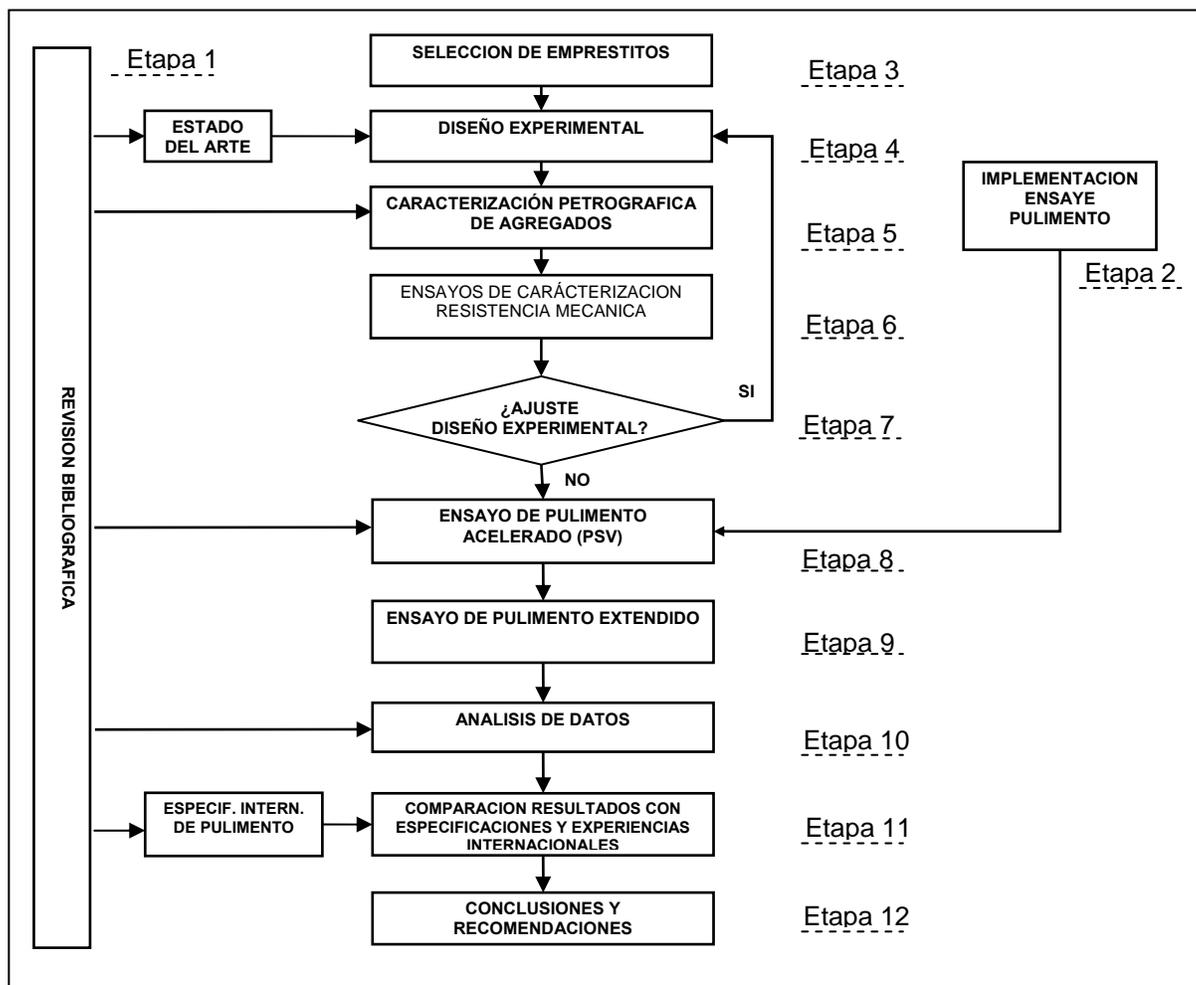


Figura I-5. Metodología de Trabajo.

I.6 Alcances de la investigación

En esta tesis se estudió el comportamiento de los principales agregados utilizados en capas superficiales de pavimentos frente a la simulación del pulimento con equipo de laboratorio. Los modelos y relaciones definidas en esta investigación para PSV versus tiempo de pulimento y para PSV versus petrografía son válidos para los agregados procedentes de las regiones XV hasta X de Chile. Las ecuaciones para el cálculo del PSV propuestas en esta investigación están basadas en la Norma BSI-812 del Reino Unido y sólo son válidas mientras se utilice en el ensayo de pulimento el agregado patrón especificado en ella.

I.7 Estructura de la tesis

La Tesis se estructura en siete capítulos. En el primero se presentan los antecedentes, la descripción de la problemática a resolver, la metodología y el plan de trabajo. El segundo capítulo define el concepto de pulimento de los agregados, presenta las metodologías existentes para su simulación en laboratorio, además de la descripción del ensayo de Pulimento Acelerado y las especificaciones internacionales existentes. El capítulo tres detalla los procedimientos, verificaciones y análisis que se llevaron a cabo para la implementación en Chile del ensayo de Pulimento Acelerado. En el cuarto capítulo se presenta la metodología para la selección de muestras y el diseño experimental para caracterizar los agregados en función del pulimento, su petrografía y para determinar relaciones entre ambas variables. El capítulo cinco presenta los resultados de la caracterización de los agregados y el análisis estadísticos de los datos. En el capítulo seis se analiza la influencia de la petrografía en la susceptibilidad al pulimento de los agregados. Finalmente, en el capítulo siete se presentan las conclusiones y recomendaciones.

II. SIMULACIÓN DEL PULIMENTO DE LOS AGREGADOS

II.1 Metodologías de simulación

La simulación del pulimento de agregados se realiza mediante ensayos de laboratorio con equipamiento ad hoc. El principio de la simulación consiste en aplicar fuerzas de abrasión, rápidas y repetitivas, sobre una muestra de agregados o superficie de pavimento, emulando aceleradamente el efecto del tránsito. Las principales técnicas utilizadas para ellos son el *pulimento* y la *proyección*.

El *Pulimento* se basa en la aplicación de una carga constante de una rueda de goma sobre una probeta y la aplicación de polvos abrasivos y agua. Bajo este método los ángulos de los cristales de los agregados se aplanan inicialmente para luego suavizarse. La *proyección* en cambio, se realiza con agua a presión sobre la probeta con polvo de sílice en una trayectoria automática. Durante este proceso los bordes de los cristales de los agregados se redondean quedando un aspecto “agujereado” en la superficie.

II.2 Equipos de laboratorio

En el mundo se han desarrollado una serie de equipos de laboratorio que utilizan estas metodologías de simulación del pulimento de los agregados. Entre los más importantes se pueden mencionar la Máquina de Pulimento Acelerado del Reino Unido, el Equipo Wehner - Schulze de Alemania y la Máquina de Pulimento Grap de origen Francés. La Tabla II.1 muestra un análisis comparativo entre estos equipos. Sólo la máquina de pulimento acelerado tiene una amplia utilización a nivel mundial. Los requerimientos de pulimento de agregados de la Unión Europea están en términos de este ensayo, así como la caracterización de los agregados.

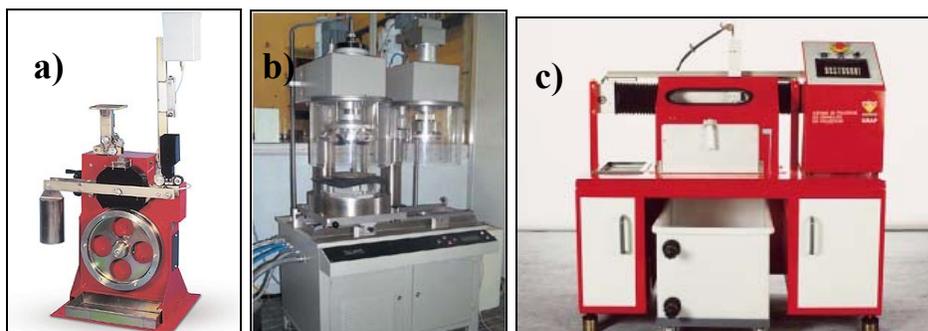


Figura II-1. Equipos de simulación del pulimento de los agregados:
 a) Máquina de Pulimento Acelerado. b) Máquina Wehner – Schulze. c) Equipo GRAP

Tabla II.1. Equipos de laboratorio para la simulación de pulimento de los agregados

Equipo Características	Pulimento Acelerado	Wehner-Schulze	GRAP
Origen	Reino Unido	Alemania	Francia
Metodología de simulación	Pulimento	Pulimento	Proyección
Tipo de Probeta	Curva	Plana	Plana
Preparación de Probeta	Manual	Manual y Testigos	Automática
Tiempo requerido para la preparación de probetas	½ día	-	1 hora
Tiempo de pulimento	6 horas	1 hora	45 min.
Simula efecto estacional	No	Si	No
Equipo de Medición de RD	Péndulo Británico (10 Km/h)	Zapata de goma (60 Km/h)	Péndulo Británico (10 Km/h)
Indicador	Polished Stone Value (PSV)	WS Coefficient of Friction (μ)	Resistance Accelerated Polishing (RAP)
Utilización	Mundial	Local	Local
Normativa	BSI:812-114:1989 EN 1097- 8:1999	TPMin-StB, Teil .5.2	XP P 18-580 (1997)

II.3 Estudios de simulación con la maquina de pulimento acelerado

Se han realizado diversos estudios con la Máquina de Pulimento Acelerado con el fin de lograr simulaciones más representativas del fenómeno a escala real. Entre estos estudios, resaltan los de extensión de pulimento (Ahadi, 2008; Cafiso et al, 2007; Liang, 2003; Perry et al, 2001; Roe, 1998) y el de cambio del ángulo de rueda de carga de la Máquina de Pulimento Acelerado (Woodward et al, 2004 y 2005).

Los estudios de extensión de pulimento mostraron que no necesariamente el valor de pulimento a las 6 horas especificado por la norma BSI 812:2000 corresponde a un valor de equilibrio para todos los agregados. Asimismo, concluyeron que en general la tasa de cambio de pulimento en los agregados está relacionada con su petrografía. Por su parte, Woodward et al (2004, 2005) buscaban simular el efecto de pulimento en la curvas, partiendo de la hipótesis que en estas zonas existe mayor pulimento, no llegando a resultados concluyentes.

Otro aspecto que ha sido estudiado es la estimación de la RD de equilibrio ofrecida por el pavimento, -en función de ecuaciones dependientes del indicador Polished Stone Value (PSV) y el volumen de tránsito (número de vehículos comerciales por día).

El Transport Research Laboratory desarrolló un modelo lineal en 1976 el cual estableció que al aumentar el nivel de tránsito para un PSV dado, el valor de la RD disminuía a una tasa constante. Estudios posteriores demostraron que ese modelo no representaba adecuadamente la situación de terreno. Por ello en 1998 la norma Inglesa modificó el modelo en base a valores de RD medidos con equipo SCRIM (Sideway-force Coefficient Routine Investigation Machine) obteniendo expresiones logarítmicas entre el PSV y la RD de equilibrio, como se muestra en la Figura II-2. Expresiones que dependen de la categoría del sitio (autopista, aproximación a cruces, rotondas), del nivel de RD requerido en ella y del volumen de tránsito. El modelo estableció que un incremento en el tránsito, para agregados con un PSV dado, reducía el valor de la RD rápidamente al comienzo, para luego disminuir la tasa de decaimiento al aumentar el nivel de tránsito.

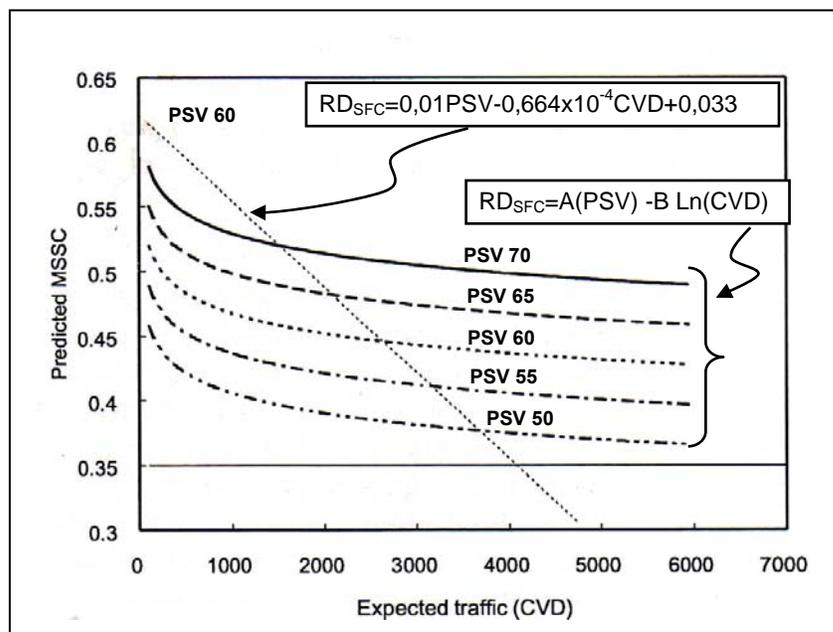


Figura II-2. Relaciones entre el PSV y la Resistencia al Deslizamiento de terreno.
 (1) TRL –Report 504 (1976) (2) TRL –Report 322 (1998)

II.4 Ensayo de Pulimento Acelerado de origen Británico

II.4.1 Normativas

Actualmente el ensayo de pulimento acelerado ha sido estandarizado a nivel europeo. La normativa BSI 812: 1999 del Reino Unido especifica la ejecución del ensayo y el cálculo del Valor de Pulimento Acelerado y es la que ha sido adoptada por España en las especificaciones AENOR y por la Comunidad Europea. Esta última estandarizó el ensayo en la norma EN1097-8. En Sudamérica, solo en Argentina y Colombia se utiliza este ensayo bajo la normativa del Reino Unido con adaptaciones al medio local. La normativa contiene en general la descripción del ensayo y la forma en que se debe calcular el valor del PSV.

II.4.2 Descripción del ensayo

El ensayo se realiza con la Máquina de Pulimento Acelerado y el equipo Péndulo Británico. El primero simula la acción del pulimento del tráfico sobre los agregados, en tanto que el segundo se utiliza para medir la RD de los agregados.

El procedimiento de ensayo consiste en pulir 14 probetas de agregados durante 6 horas mediante la carga de una rueda de goma y una mezcla de agua y abrasivos. Este tiempo es el requerido teóricamente para que los agregados alcancen un mínimo valor de resistencia al deslizamiento traducido al indicador PSV.



Figura II-3: Máquina de Pulimento Acelerado.

La metodología del ensayo puede ser organizada en cuatro fases, como se muestra en la Figura II-4: Calibración y Acondicionamiento, Ciclo de Pulimento, Medición de la RD y Determinación del índice PSV.

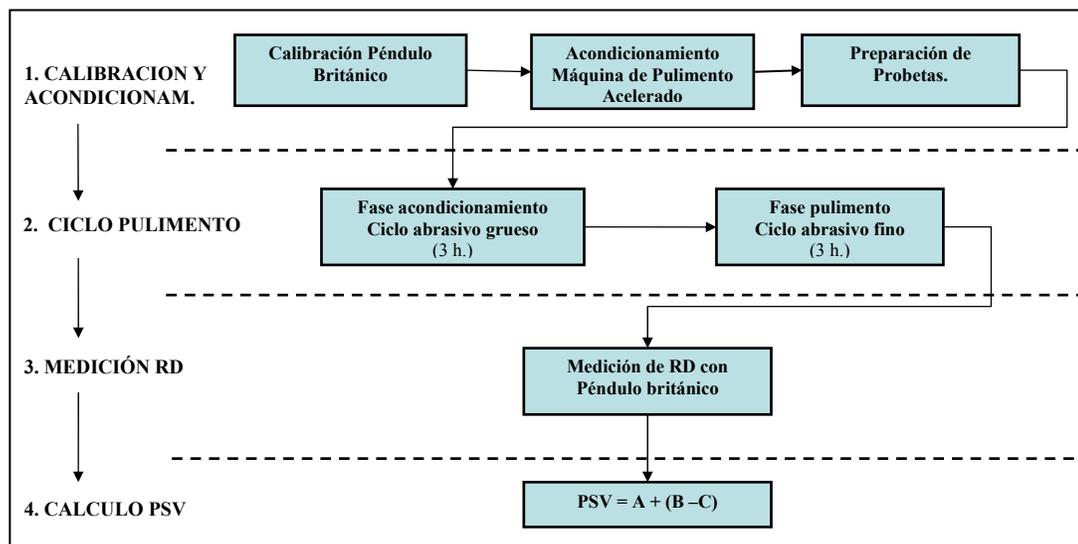


Figura II-4. Procedimiento general del ensayo de Pulimento Acelerado (Elaboración propia).

- *Calibración y Acondicionamiento:* Esta etapa consta de 3 procesos: Calibración, Acondicionamiento y Preparación de Probetas. El primero corresponde a la calibración del Péndulo Británico, que se efectúa para verificar el funcionamiento general del equipo y para verificar el estado de piezas y partes. El Acondicionamiento de la Máquina de Pulimento Acelerado consiste en la preparación de la sala de ensaye y de dispositivos especiales tales como las ruedas de goma para el pulimento, zapatas de goma y abrasivos. Un tercer proceso es la preparación de probetas de agregado a estudiar y de agregado patrón (AP). Las probetas se preparan manualmente con áridos gruesos de tamaño uniforme en un molde curvo, cohesionados con un agente ligante (resina). El AP corresponde a un material granular que tiene un valor de PSV conocido y consistente en el tiempo. Permite verificar el nivel de pulimento del equipo y ajustar los resultados de los restantes especímenes ensayados. Generalmente se define un agregado patrón de origen local.

- *Ciclo de Pulimento:* La rueda de ensayo que contiene las probetas rota en contra de una rueda de caucho provocando la acción de pulimento. Una mezcla de polvo abrasivo y agua inyectada entre las probetas y la rueda de goma, ayuda a acelerar el pulimento. Este

proceso se divide en dos partes, el acondicionamiento de las probetas efectuado con abrasivo grueso y el pulimento provocado por un abrasivo fino, en intervalos de 3 horas respectivamente. Por cada agregado a evaluar se preparan cuatro probetas, las cuales se ensayan en dos ciclos consecutivos de seis horas cada uno (dos probetas en una primera rueda de ensayo y luego las dos restantes en una segunda rueda).



Figura II-5. a) Rueda de ensayo b) Probetas para ensayo.

- *Medición de la Resistencia al Deslizamiento:* Al final del ciclo de pulimento, se efectúa la medición de la Resistencia al Deslizamiento con el equipo Péndulo Británico sobre las probetas ensayadas y lavadas. La medición se controla utilizando probetas especialmente fabricadas para la comprobación de los resultados del péndulo. Esta medición permite evaluar la pérdida de microtextura de los agregados producto del ensayo de Pulimento Acelerado.
- *Obtención de resultados:* El resultado del ensayo es el indicador Polished Stone Value (PSV), el cual se calcula como la media de la Resistencia al Deslizamiento de las cuatro probetas de agregado en estudio, corregida a partir de los resultados de la probeta del agregado patrón.

II.4.3 Especificaciones de pulimento para los agregados

Diversos países cuentan con especificaciones de pulimento de agregados. En esta sección se resumen las principales especificaciones internacionales para agregados utilizados en capas de rodado.

a. Reino Unido. Esta norma es aplicable a agregados utilizados en pavimentos tipo Tratamientos Superficiales, Carpetas asfálticas, mezclas Stone Mastic Asphalt (SMA). En ella se establecen PSV mínimos por categorías de sitios y niveles de tráfico para la vida de diseño. El valor PSV más bajo es de 50, y está especificado para configuraciones simples de caminos. Los valores más altos están limitados a sitios donde se requiere mayor nivel de Resistencia al Deslizamiento como curvas, pendientes, intersecciones, cruces, etc. Estos valores son más exigentes que los de la mayoría de las normativas analizadas en este documento (ver AnexoC).

b. Alemania. Esta especificación establece exigencias de resistencia al pulimento de los agregados en base al indicador PSV según norma DIN EN 1097-8. Las exigencias se definen de acuerdo al tipo de superficie de rodadura y no por el nivel de solicitaciones a la que va a estar sometido, como lo hace la norma del Reino Unido. El mínimo valor de PSV requerido en Alemania es de 44.

c. Nueva Zelanda. Los agregados utilizados para la construcción de capas superficiales de pavimento deben cumplir con un PSV calculado de acuerdo a la ecuación 1. En este caso, el mínimo valor de PSV exigido corresponde al sitio con menor resistencia al deslizamiento requerida, para un nivel de tránsito dado.

$$\text{PSV} = 100 \times \text{RD} + 0,00663 \times \text{CVD} + 2,6 \quad (1)$$

Donde: RD es el nivel de investigación de resistencia al deslizamiento el pavimento por sitio y CVD es el flujo de vehículos comerciales por pista por día (Tránsito esperado al final de la vida útil).

d. Australia. Establece un valor de PSV mínimo en todo tipo de pavimentos de 45. Para caminos con niveles de tráfico superiores a 1000 veh/pista/día este valor debe ser revisado.

e. Argentina. Establece exigencias de pulimento para los agregados gruesos utilizados en Mezclas Asfálticas en Caliente, Mezclas Drenantes, Microaglomerados en Caliente y SMA. Para todas ellas el PSV mínimo es 40. Este valor es indicativo, puesto que el estudio de los agregados en Argentina se encuentra en desarrollo y corresponde al PSV más alto que han obtenido de los agregados analizados hasta el momento.

f. Sudáfrica. Las especificaciones sudafricanas contienen valores mínimos de Pulimento para sus agregados dependiendo del tipo de carpeta al que se destinen. Para superficies de granulometría discontinua, el mínimo valor es de 45 y para Open Graded, SMA y Tratamientos Superficiales se exige un mínimo de 50.

g. Francia. El indicador utilizado para la definición de los umbrales es el PSV. La especificación varía entre 44 y 68 dependiendo del tipo de superficie.

En síntesis, el mínimo valor PSV aceptado internacionalmente para los agregados varía entre 40 y 45 y los máximos valores requeridos implican la utilización de agregados artificiales. La Figura II-6 resume gráficamente las especificaciones internacionales revisadas en este trabajo. No es posible compararlas directamente dado que cada norma por lo general utiliza en el ensayo un agregado patrón de origen local, por lo que el nivel de pulimento debe ser llevado a un patrón común antes de esta comparación.

	Polished Stone Value (PSV)							
	40	45	50	55	60	65	68	70+
Alemania		■	■					
Argentina	■							
Australia		■						
Francia		■	■	■	■	■	■	
Nueva Zelanda	■	■	■	■	■	■	■	■
Reino Unido			■	■	■	■	■	■
Sudáfrica		■	■					

Figura II-6. Especificaciones Internacionales de Pulimento. (Elaboración propia)

III. IMPLEMENTACIÓN DEL ENSAYO DE PULIMENTO ACELERADO.

En este capítulo se presentan los procedimientos y verificaciones que se llevaron a cabo para la implementación del ensayo de Pulimento Acelerado en Chile. La normativa utilizada para este propósito fue la BSI-812 del Reino Unido, la cual establece los requisitos y metodología para el ensayo.

III.1 Infraestructura y equipos

III.1.1 Instalaciones

Para el ensayo la norma especifica una temperatura ambiente de 20°C, para ello se implementó una sala acondicionada para mantener la temperatura ambiente constante durante el proceso de fabricación de las probetas, el tiempo de ensayo y durante la medición con Péndulo Británico. Fue necesario además implementar dentro de la sala un sistema de alimentación de agua potable y un sistema de extracción de aire debido a los vapores orgánicos liberados por la resina utilizada para la fabricación de las probetas. La implementación de ésta sala de ensayo fue realizada con aportes de la Dirección Nacional de Vialidad de Chile.

III.1.2 Acondicionamiento del equipo Péndulo Británico

El equipo Péndulo Británico se adaptó para el ensayo de pulimento. Se emplea una zapata de goma de menores dimensiones que la usual, debido a que la superficie de rozamiento se reduce respecto de la del ensayo convencional. Por tanto, la escala de lectura se ajustó a la nueva respuesta de rozamiento de la zapata (escala en unidades F=medida del la RD sobre probetas). Se requiere, además de una base de apoyo especial para fijar el equipo y ensayar las probetas.

Para el acondicionamiento del equipo se realizó la calibración mecánica según el procedimiento descrito por el fabricante (MASTRAD, 2007). Por otra parte, se llevaron a cabo los ensayos de acondicionamiento de las zapatas de goma, cumpliendo con los requisitos de la norma de referencia para el ensaye. Los resultados de estos procedimientos se encuentran en el Anexo C.

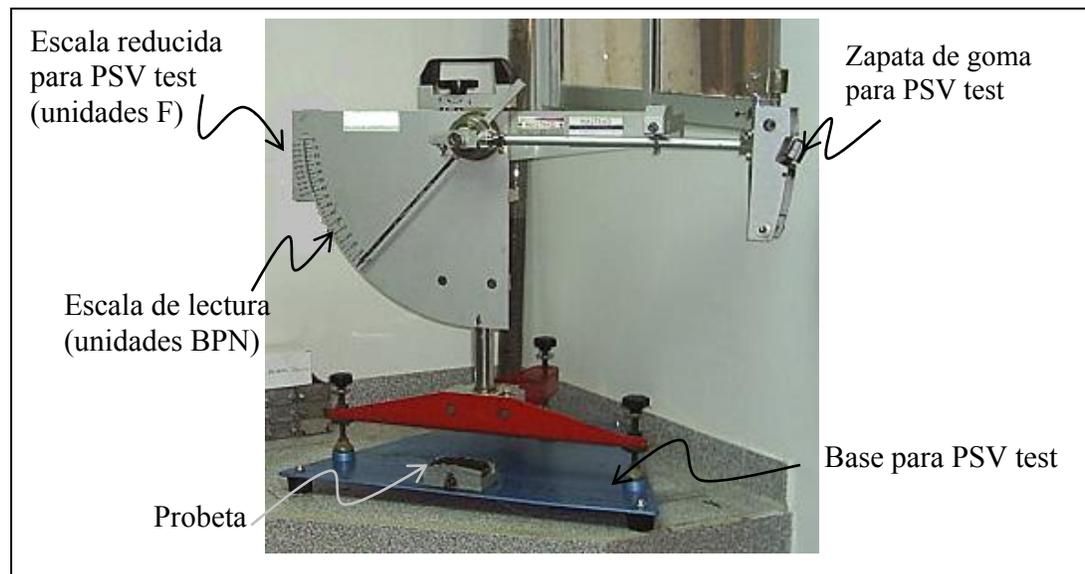


Figura III-1. Equipo Péndulo Británico

Se efectuó además un análisis de repetibilidad basado en la norma ASTM E303-93 (2003) y de reproducibilidad realizando mediciones con dos equipos sobre una misma superficie.

a) *Repetibilidad*

La norma ASTM E-303-93 (2003) determina el valor de repetibilidad del equipo Péndulo Británico mediante la ecuación 2. Donde “E” corresponde al error del ensayo, “t” al parámetro estadístico para un 95% de Nivel de confianza; “n” al número de ensayos. El valor máximo admisible del error según esta normativa es de 1 BPN.

$$E = t \sigma n^{-\frac{1}{2}} \quad (2)$$

Para determinar la repetibilidad se realizaron 5 lecturas con el Péndulo sobre una misma superficie de ensayo, dada por una probeta de agregados. Se repitió el procedimiento sobre 5 superficies diferentes. El factorial utilizado para el experimento se muestra en la Figura III-2.

RD	Superficie				
	1	2	3	4	5
Lectura	5	5	5	5	5

Figura III-2. Matriz factorial para prueba de repetibilidad Equipo Péndulo Británico.

Los resultados se presentan en la Tabla III.1. Se observa que las mediciones de resistencia al deslizamiento realizadas en 5 superficies distintas arrojaron un error inferior al valor de aceptación de la norma ASTM E303–93 (2003), que es de 1 BPN (British Pendulum Number), por tanto se puede decir que el equipo utilizado para esta investigación es repetible.

Tabla III.1: Análisis de repetibilidad Péndulo Británico

Superficie	Error (BPN)	Error Aceptable (BPN)
1	0.35	< 1
2	0.32	
3	0.50	
4	0.35	
5	0.41	

b) Reproducibilidad

La reproducibilidad del equipo se determinó midiendo la Resistencia al Deslizamiento sobre 3 superficies diferentes, dadas por tres probetas de agregados, con dos equipos Péndulo Británico. Se efectuaron 5 lecturas de resistencia al deslizamiento por cada superficie. El factorial del experimento se muestra en la Figura III-3.

Superficie	Equipo	
	1	2
1	5	5
2	5	5
3	5	5

Figura III-3: Matriz factorial para prueba de reproducibilidad equipo Péndulo Británico.

Para el análisis de los datos se realizó un test-t de medias evaluando muestras independientes y pareadas. La Tabla III.2 presenta los resultados de este análisis.

Los resultados del primer test (muestras independientes) indicaron que no existió diferencia significativa entre la media de las 5 lecturas obtenidas por cada equipo, con un nivel de confianza de un 95% (valor-p superior a 0,05).

Los resultados del segundo test-t (pareado) indicaron que no existió una diferencia significativa entre cada una de las 5 lecturas obtenidas con el equipo 1 y cada una de las 5 lecturas obtenidas con el equipo 2, con un 95% de Nivel de confianza (valor-p superior a 0,05). Por tanto las mediciones con el equipo son reproducibles.

Tabla III.2: Análisis de reproducibilidad Péndulo Británico

Test- t muestras independientes para BPN	Superficie 1	Superficie 2	Superficie 3
Intervalo de confianza para la diferencia de medias	[-3.0243, 3.0243]	[-1.1401, 1.7401]	[-0.6522, 0.6522]
Valor – t	0.000	0.480	0.000
Valor –p	1.000	0.644	1.000
Test- t muestras pareadas para BPN	Superficie 1	Superficie 2	Superficie 3
Intervalo de confianza para la diferencia media	[-2.4833, 2.4833]	[-0.2552, 0.8552]	Muestras iguales
Valor – t	0.000	1.500	
Valor –p	1.000	0.208	

III.1.3 Acondicionamiento de la Máquina de Pulimento Acelerado

Para el acondicionamiento de la Máquina de Pulimento Acelerado (MPA) se realizaron los siguientes procedimientos:

- a) Preparación de las ruedas de goma macizas, realizando un ensaye completo de pulimento utilizando probetas de relleno (Ver detalle en el Anexo C).
- b) Ajuste de la tasa de salida de ambos abrasivos (grueso y fino) en los dispensadores respectivos.
- c) Ajuste del número de revoluciones de la rueda de ensayo para el ciclo de pulimento.
- d) Regulación del caudal de salida del agua para el ciclo de pulimento.

III.2 Fabricación de probetas

Las probetas se prepararon manualmente con agregados gruesos de tamaño uniforme (corte entre 7 y 10 mm) en un molde curvo y cohesionados con un agente ligante. El agente ligante utilizado para las probetas fue resina de poliéster, el cual fue seleccionado mediante pruebas de fabricación de probetas paralelamente con otros agentes de tipo epóxico. Su menor tiempo de fraguado y endurecimiento fue la característica determinante para su selección.

La preparación se inició con la colocación manual uno a uno de los agregados. Luego los espacios entre las partículas se rellenaron con arena silícea de granulometría 100 - 200, para finalmente cubrir completamente el molde con la resina. Las probetas así fabricadas se revisaron cuidadosamente una vez desmoldadas, y se rechazaron aquellas que presentaran partículas movidas o con exceso de resina cubriendo a los agregados o con falta de ella evitando la ligazón adecuada de las partículas. La Figura III-4 muestra la secuencia resumida de fabricación de probetas.

Para este experimento se confeccionaron más de 20 probetas de prueba con el objeto de establecer la dosificación de la mezcla de ligante (catalizador + acelerante + filler + resina) y alrededor de 50 probetas adicionales para lograr la macro textura adecuada de los agregados expuestos en la probeta. Las probetas fueron revisadas por especialistas del Transport Research Laboratory (TRL-UK).

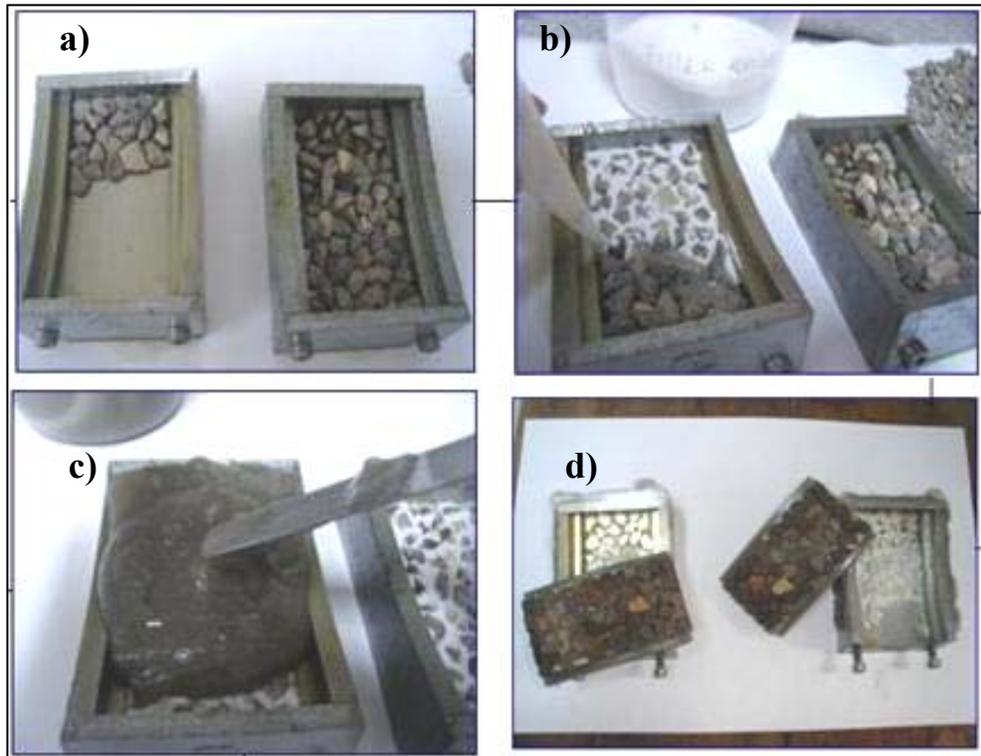


Figura III-4. Resumen proceso de fabricación de probetas ensayo de Pulimento Acelerado.
 a) Colocación manual de los agregados b) Cubrimiento de los intersticios con arena silicea
 c) Colocación de Resina d) Desmolde.

III.3 Agregado patrón de ensayo

El agregado patrón (AP) se define como aquel material granular que tiene un valor de PSV conocido y consistente en el tiempo. Permite verificar la validez del ensayo a partir de la diferencia entre el valor obtenido y el rango de aceptación definido a partir de sus resultados históricos de pulimento. Este material es preparado y ensayado utilizando el mismo procedimiento definido en la normativa para un agregado cualquiera en estudio.

El AP se utiliza para controlar que el proceso de pulimento durante el ciclo de ensayo haya sido realizado correctamente. Para ello las probetas de agregado patrón deben cumplir con los siguientes requerimientos:

1. La media de la Resistencia al Deslizamiento medida con Péndulo Británico (RD) de dos probetas de AP, ensayadas en un mismo ciclo de pulimento, debe estar dentro del intervalo especificado en la norma de referencia. La norma de Reino Unido establece un intervalo de 49,5 - 55,5 para su árido patrón.
2. La diferencia entre el valor de RD de dos probetas, ensayadas en un mismo ciclo de pulimento, no debe ser mayor a 4,7 unidades, según la normativa del Reino Unido.

En general cada país utiliza un agregado de origen local como patrón. Por ejemplo el Reino Unido utiliza un agregado tipo dolerita de cuarzo. Su distribución esta restringida a un sólo proveedor para mantener la consistencia de los resultados. La RD esperada para este agregado es de 52,5.

España utilizaba hasta antes de la normalización europea, una muestra de roca ígnea tipo andesita, de la cantera de Tordelloso (Provincia de Guadalajara). La RD esperada para este agregado era de 55. Actualmente la comunidad Europea utiliza como AP el de origen Inglés.

En Latinoamérica, Argentina utiliza un material de origen granítico de la Cantera Villa Mónica, integrado por cuarzo, feldspatos y minerales máficos. El valor de RD esperado es de 40. Colombia no utiliza agregado patrón, calculando el PSV directamente sin corrección.

III.3.1 Intervalo de aceptación del agregado patrón para Chile

En esta investigación se utilizó el AP de origen inglés, por lo que se esperaba que al ensayar con la MPA Chilena éste cumpliera con el intervalo especificado por la norma del Reino Unido.

La Tabla III.3 resume los valores de Resistencia al Deslizamiento con Péndulo Británico (RD) medidos sobre 40 probetas de agregado patrón, ensayadas en 20 ciclos de pulimento

de seis horas cada uno (dos probetas por cada rueda de ensayo). En la Figura III-5 se puede apreciar que el 99% de los valores de RD obtenidos para el AP se encuentra fuera del intervalo de aceptación establecido para el agregado inglés.

Tabla III.3 Resultado de pulimento sobre el agregado patrón.

Rueda	Resistencia al Deslizamiento (RD)			Diferencia
	Probeta 1	Probeta 2	Media	
R1	54,2	50,0	52,1	4,2
R2	50,0	46,7	48,3	3,3
R3	52,7	47,7	50,2	5,0
R4	45,3	46,7	46,0	1,3
R5	49,0	46,7	47,8	2,3
R6	45,7	49,3	47,5	3,7
R7	45,8	46,7	46,3	0,8
R8	45,7	47,2	46,4	1,5
R9	45,3	45,3	45,3	0,0
R10	47,5	46,0	46,8	1,5
R11	44,3	48,7	46,5	4,3
R12	45,0	47,5	46,3	2,5
R13	45,7	44,7	45,2	1,0
R14	45,0	44,0	44,5	1,0
R15	46,3	47,2	46,8	0,8
R16	45,0	44,7	44,8	0,3
R17	44,0	48,0	46,0	4,0
R18	41,3	45,0	43,2	3,7
R19	43,7	44,3	44,0	0,7
R20	46,0	43,3	44,7	2,7
Gran Media				45,8
Desviación estándar de la Media				1,25
Máximo de la Media				47,8
Mínimo de la Media				43,2

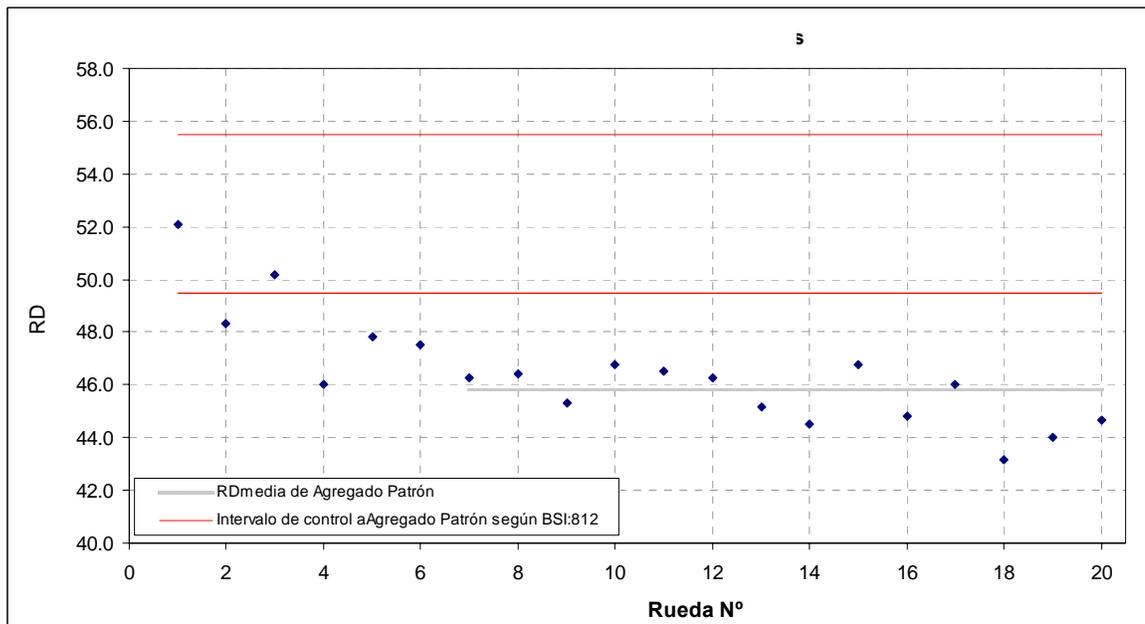


Figura III-5: Resultados ensayo de pulimento sobre Agregado Patrón. RD media de dos probetas.

De acuerdo a los resultados obtenidos, fue necesario realizar una serie de pruebas para determinar los factores que generaban esta diferencia en los resultados del AP. Estas se resumen en la Tabla III.4 .

Se estudió la repetibilidad del equipo Péndulo Británico (Según ASTM E303) y de la Máquina de Pulimento Acelerado (según BSI:812), cumpliendo ambos con lo exigido por la normativa respectiva.

Se probaron en el Laboratorio IMAE de la Universidad de Rosario probetas de agregado patrón inglés confeccionadas en Chile y en Argentina, obteniendo los mismos resultados que los obtenidos con el equipo Chileno.

Se evaluó la influencia de la zapata de goma del Péndulo Británico. Se probaron zapatas nuevas y usadas sobre las mismas probetas, sin obtener diferencias significativas. Se compararon las zapatas utilizadas en Chile de origen Británico y las utilizadas en Argentina de origen local, no obteniendo diferencias significativas en los resultados.

Se comprobó que la temperatura ambiente no influía en los resultados del ensaye. Se ensayó a la mínima (15°C) y máxima (25°C) temperatura permitida por la norma, sin obtener diferencias sobre la RD del agregado patrón.

Se evaluó la influencia del agua local sobre el grado de pulimento de los agregados dada su dureza. Se realizó un ciclo completo de pulimento con agua desmineralizada, no obteniendo resultados concluyentes.

Diferentes operadores confeccionaron probetas de AP, las que se ensayaron en un mismo ciclo de pulimento, no obteniendo diferencias significativas en los resultados.

Finalmente se solicitó directamente al Transport Research Laboratory del Reino Unido una muestra de AP para poder verificar que el agregado utilizado en esta investigación efectivamente era el patrón inglés. Se confeccionaron probetas con ambos agregados y se ensayaron en un mismo ciclo de pulimento. Se obtuvo una diferencia media de 0,3 unidades PSV, no resultando significativa. Todos los resultados en detalle pueden ser consultados en el Anexo D

Dado que ninguna de las pruebas realizadas resultó significativa sobre los resultados de RD del agregado patrón, solo cabe concluir que esta diferencia en los valores de pulimento obtenidos con el equipo Chileno respecto del equipo Británico se debe sólo a la reproducibilidad propia del ensaye dada, en este caso, por el grado de pulimento que es capaz de generar la MPA utilizada.

Tabla III.4: Pruebas de evaluación de la variabilidad del ensayo de pulimento acelerado.

Factor	Objetivo	Resultado
Reproducibilidad del equipo Péndulo Británico	Estudiar la variabilidad de los resultados debida al Péndulo utilizado en el estudio. Se llevo a cabo según procedimiento descrito en III.1.2b.	No significativo.
Equipo Pulimento Acelerado	Se realizaron pruebas en el laboratorio IMAE de la Universidad de Rosario, Argentina con probetas confeccionadas en Chile.	No significativo
Zapata de goma Péndulo Británico	Estudiar la influencia del uso de diferentes zapatas.	No significativo.
Temperatura de ensayo	Influencia de la temperatura ambiente. Se ensayó con la temperatura máx. y min. permitida en norma de referencia.	No significativo.
Agua	Evaluar el efecto del agua local sobre el pulimento de los agregados.	No significativo.
Abrasivos	Efecto de la variación en la tasa de abrasivo. Se controló la dosis de los abrasivos en todos los ensayos.	No significativo.
Confección de Probeta	Influencia del operador. Dos operadores confeccionaron probetas, todas ensayadas en el mismo ciclo de pulimento.	No significativo.
Agregado patrón	Verificar que el agregado utilizado era el correcto. Se realizaron ensayos con agregado patrón adquirido en UK y con una muestra enviada directamente por el TRL-UK.	No significativo.

Por tanto, resultó necesario determinar un intervalo de control para el AP inglés ensayado en la Máquina de Pulimento Acelerado de Chile siguiendo el procedimiento descrito a continuación.

1. Verificada la normalidad de los datos de RD del agregado patrón, se aplicó el test de Grubbs para identificar y eliminar posibles datos anómalos.

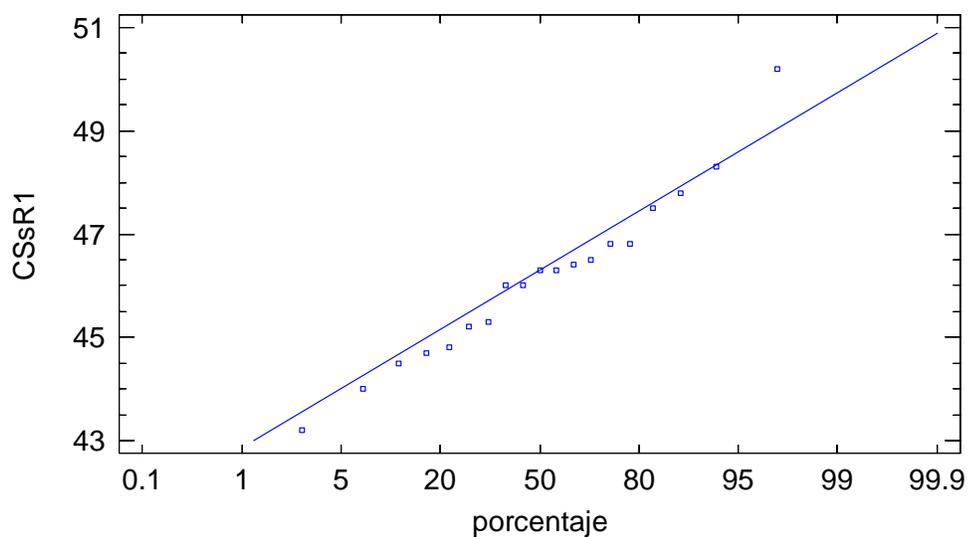


Figura III-6: Grafico de Probabilidad Normal para RD del Agregado Patrón.

El test de Grubbs arrojó como anómalo el valor de RD = 52,1 de la Rueda N° 1 con un Valor p de 0,03, resultado que fue eliminado del análisis. Era de esperar valores anómalos en los resultados de las primeras ruedas ensayadas por encontrarse el equipo aún en fase de acondicionamiento.

2. Luego, se determinó mediante test T-Student el intervalo de confianza para la media y la desviación estándar de la población de RD promedio de dos probetas de árido patrón de un mismo ciclo de ensaye. Se estableció con un 95,0% de confianza, que la media de RD

del agregado patrón (RD_{AP}) se encuentra entre 45,4 y 46,9. La media de la población resultó ser de 46 y la desviación estándar de la media varió entre 1,2 y 2,4.

Por lo tanto, el intervalo de control propuesto para Chile es:

$$42,5 \leq RD_{AP} \leq 49,5 \quad (3)$$

Este intervalo representa la media de la población más dos veces la desviación estándar de la población para un p de 0.05.

III.4 Procedimiento de cálculo del Coeficiente de Pulimento Acelerado

El Coeficiente de Pulimento Acelerado (PSV) representa el valor de la Resistencia al Deslizamiento última que ofrece un agregado cuando es sometido a la acción del pulimento del tránsito en un período de tiempo dado, simulado en laboratorio mediante la Máquina de Pulimento Acelerado (MPA). Se considera este valor como la RD del agregado en su estado de equilibrio.

Matemáticamente el PSV se describe mediante la Ecuación 4.

$$PSV = S + (\mu - C) \quad (4)$$

Donde S corresponde al promedio de la Resistencia al Deslizamiento de cuatro probetas confeccionadas con el agregado en estudio, ensayadas en dos ciclos de pulimento diferentes (2 por cada rueda de ensayo); μ corresponde a la media esperada de la RD del agregado patrón y C es el promedio de RD de cuatro probetas fabricadas con agregado patrón, ensayadas en los mismos dos ciclos de pulimento del agregado en estudio.

El factor $(\mu - C)$ corrige la medida de resistencia al deslizamiento del agregado en estudio, en base a la diferencia entre el valor de la media de RD esperada para el agregado patrón y el valor obtenido en el ensaye.

La normativa del Reino Unido establece como media esperada de su agregado patrón un μ de 52,5. Sin embargo, en la sección anterior se comprobó que el resultado del ensayo de Pulimento depende de la reproducibilidad propia de cada equipo. Para el AP de origen Inglés ensayado en la MPA Chilena se obtuvo un μ de 46.

Por otra parte, la norma del Reino Unido establece como intervalo de verificación del ensayo de pulimento un rango de control para el agregado patrón entre 49,5 y 55,5. Sin embargo, en los ensayos realizados con el equipo de pulimento de Chile, sobre los agregados de origen inglés, se obtuvo un intervalo ubicado en el rango 42,5 y 49,5.

Por lo tanto la ecuación calibrada para Chile para el cálculo del PSV es:

$$\text{PSV} = S + (46 - C) \quad (5)$$

III.4.1 Ajuste del Coeficiente de Pulimento Acelerado

Como se señaló anteriormente, la ecuación de cálculo del PSV está condicionada por el nivel de pulimento que sufra el agregado patrón durante el ensayo, reflejado en el valor de RD al final de un ciclo de 6 h. Por tanto, no es posible comparar directamente especificaciones si no se utiliza una misma ecuación de AP para determinar el PSV.

Para comparar el valor del PSV de un agregado ensayado bajo las condiciones locales con los valores recomendados por el Reino Unido fue necesario ajustar los valores calculados con la ecuación 5. El factor de ajuste (FC) se determinó como la diferencia entre el valor esperado de la RD del agregado patrón inglés y el valor esperado del agregado patrón local, resultando:

$$\text{FC} = 52,5 - 46 = 6,5 \quad (6)$$

Por tanto la ecuación de ajuste resultó ser el valor de PSV obtenido en el ensayo local más el factor de corrección, como lo muestra la ecuación 7.

$$PSV_c = PSV + FC \quad (7)$$

En donde PSV_c corresponde al valor del Coeficiente de Pulimento Acelerado ajustado a la normativa del Reino Unido; PSV al Coeficiente de Pulimento Acelerado local obtenido mediante la ecuación 3 y FC factor de ajuste del PSV local.

III.5 Evaluación de la precisión del ensayo de Pulimento Acelerado

La precisión del ensayo se evaluó mediante el cálculo de la repetibilidad y reproducibilidad de la variable PSV. En ambos casos, se utilizó como procedimiento el método propuesto por Echaveguren (2008), el cual describe la aplicación del método ANOVA para el cálculo. Los valores de referencia de repetibilidad y reproducibilidad para el ensayo fueron adoptados de la norma británica BSI 812-114:1999.

III.5.1 Repetibilidad

El análisis de repetibilidad busca verificar si las medias de medidas repetidas de pulimento bajo las mismas condiciones de ensayo son iguales, y si están lo menos afectadas posible por la desviación estándar ponderada.

El cálculo de la repetibilidad se realizó comparando el resultado de la media de dos probetas de agregado pulidas en un mismo ciclo, con los resultados de la media de dos probetas del mismo agregado pero pulidas en el ciclo siguiente inmediato. Las cuatro probetas utilizadas para el ensayo fueron fabricadas al mismo tiempo y las condiciones de experimentación se mantuvieron constantes (temperatura, tasa de abrasivos, operador, procedimiento, etc.).

De acuerdo al método ANOVA, dos mediciones son repetibles en tanto su desviación estándar sea cercana a cero. La significancia del ANOVA depende del valor F, el cual es significativo si $F > F_{\text{critico}}$ o si el valor p es superior a la significancia dada al test, que en este caso es de 5%.

La desviación estándar ponderada obtenida fue de 3,0. Por lo tanto el índice de repetibilidad del ensayo es $r = 3$. Este valor es aceptable si se compara con el valor de repetibilidad establecido en la normativa del Reino Unido, la cual establece un $r = 3$ para el ensayo. Asimismo, el test resultó significativo dado que el valor p obtenido fue superior al 5%, como se muestra en la Tabla III.5.

Tabla III.5 Resultado del análisis de Repetibilidad ensayo pulimento.

	GL	SS	MS	F	p
Replicas	1	2,09	2,09	0,23	0,636
Error	58	534,65	9,22		
Total	59	536,74			

III.5.2 Reproducibilidad

El análisis de reproducibilidad busca verificar si las medias de medidas repetidas de pulimento son iguales, y si están lo menos afectadas posible por la desviación estándar ponderada, considerando cambios en las condiciones del ensayo.

Dado que en Chile no existe otra Máquina de Pulimento Acelerado en operación, el análisis de la reproducibilidad tuvo relación con la capacidad de las mediciones de PSV de ser repetidas en el tiempo, si se modifican factores del ensayo como la experiencia del operador de la máquina, del operador que confecciona las probetas y del desgaste del equipo.

El cálculo de la reproducibilidad se realizó comparando la media de cuatro probetas pulidas en dos ciclos continuos de ensayo, con los resultados de la media de cuatro probetas del mismo agregado pero pulidas en dos ciclos posteriores.

Asimismo el índice de reproducibilidad fue determinado cuando los factores modificadores del ensayo se encontraban en condición de régimen. Es decir, cuando el operador del equipo había ensayado más de 10 ciclos, habían sido fabricadas más de 150 probetas y la máquina de pulimento tenía más de 60 horas de uso (la literatura considera que luego de 20 horas de uso el equipo entra en estado de régimen (Pagola, 2002)).

La desviación estándar ponderada obtenida fue de 3,2. Por lo tanto el índice de repetibilidad del ensayo es $R = 3,2$. Este valor es aceptable si se compara con el valor de repetibilidad establecido en la normativa del Reino Unido, la cual establece un $R = 5$ para el ensayo. Asimismo, el test resultó significativo dado que el valor p obtenido fue superior al 5 %, como se muestra en la Tabla III.6.

Tabla III.6 Resultado del análisis de Reproducibilidad ensayo pulimento

	GL	SS	MS	F	p
Replicas	1	10,3	10,3	1,01	0,320
Error	58	596,0	10,3		
Total	59	606,3			

IV. METODOLOGIA EXPERIMENTAL PARA CARACTERIZAR LOS AGREGADOS.

En este capítulo se define la metodología experimental para lograr encontrar relaciones entre el PSV y las características petrográficas de los agregados utilizados en carpetas de rodado en Chile. De esta forma se pretende definir a priori el comportamiento que tendrán los agregados frente al pulimento en base a la composición petrográfica del mismo, además de conocer que agregados tienen una mayor susceptibilidad al pulimento basado en el ensayo de Pulimento Acelerado.

Para ello se definió un procedimiento de muestreo de los agregados para asegurar que éstos fueran representativos de las características a evaluar. Se estableció un factorial para la caracterización de los agregados en función del ensayo de Pulimento Acelerado utilizando variables como el origen del agregado y el tiempo de pulimento. Se realizó además, la caracterización petrográfica de los agregados según el porcentaje en volumen de los minerales y fragmentos litológicos constituyentes. Finalmente se construyó un experimento para buscar relaciones entre el PSV y petrografía.

IV.1 Metodología de muestreo y selección de los agregados

La metodología utilizada en esta investigación para el muestreo y selección de los agregados consta de 6 etapas, esquematizadas en la Figura IV-1, las cuales se describen a continuación:

-Etapa 1: Aplicación de encuesta: Se aplicó una encuesta dirigida a los Laboratorios Regionales de la Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas de Chile para obtener antecedentes respecto de aquellos empréstitos productores de agregados disponibles en el país, especialmente aquellos utilizados en plantas de mezclas asfálticas y de hormigón para pavimentos. Estas plantas, al ser generalmente del tipo fijas, son las

más utilizadas en cada región para la producción de material de carpeta de rodadura. Los antecedentes específicos recogidos a través de esta encuesta pueden verse en el Anexo E

-Etapa 2. Selección de empréstitos para muestreo: A partir de los datos recibidos de la Dirección de Vialidad, se escogieron los pozos potenciales de muestrear y que estaban o serán utilizados en contratos de pavimentación con carpeta asfáltica, Hormigón y/o Tratamiento Superficial.

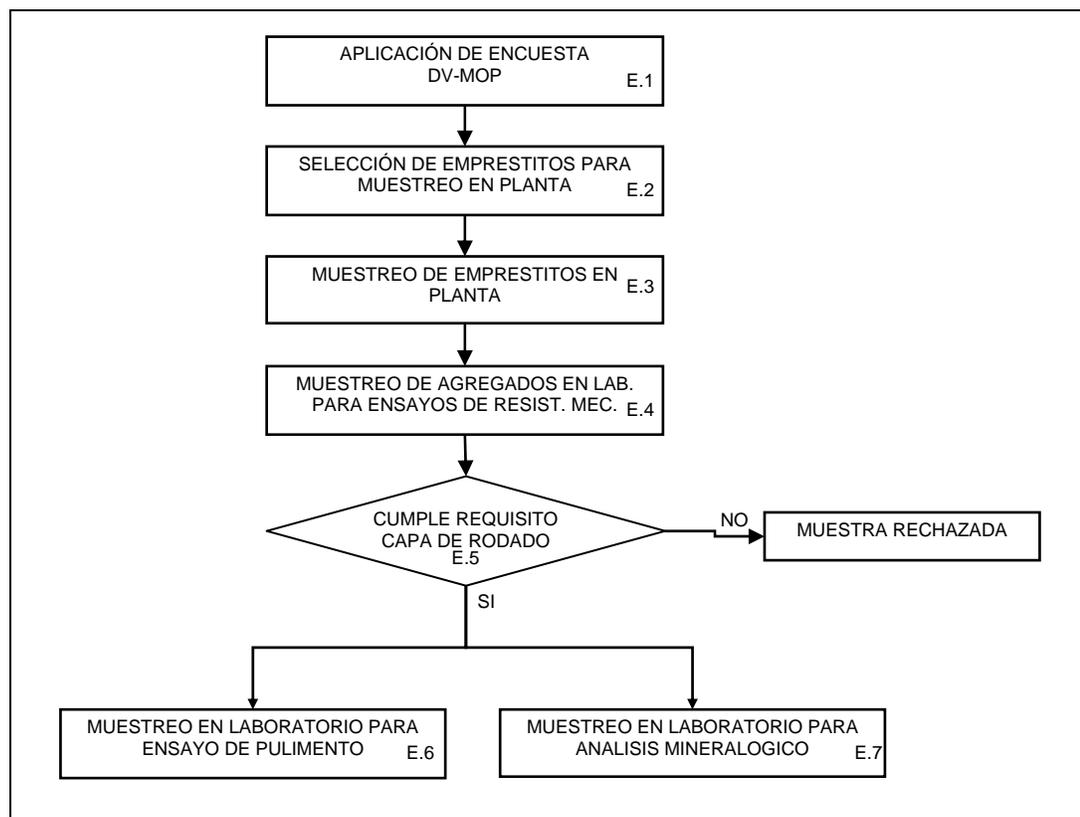


Figura IV-1: Metodología de muestreo y selección de agregados

-Etapa 3. Muestreo de empréstitos en planta: El Muestreo fue realizado en planta por personal de la Dirección de Vialidad siguiendo la metodología establecida para ello en el Manual de Carreteras de Chile. Se extrajo el material directamente desde los acopios, separando por tamaño cada saco muestreado (grava, gravilla, arena) e identificando cada uno con una ficha especialmente preparada para este propósito.

-Etapa 4. Muestreo en laboratorio para ensayos de Resistencia Mecánica: Una vez en laboratorio, se muestrean los sacos mediante cuarteo, lavado y tamizado para obtener los tamaños de agregados requeridos por las especificaciones del Manual de Carreteras para el ensaye de Desgaste de los Ángeles, Índice de Trituración y Desintegración Mediante el Método de los Sulfatos.

-Etapa 5. Verificación de requisitos: A partir del resultado de los ensayos de resistencia mecánica se descartaron aquellas muestras que no cumplían con las especificaciones establecidas en Chile para el uso de los agregados en capas de rodadura.

-Etapa 6. Muestreo en laboratorio para ensayo de pulimento: Se muestrea los sacos mediante cuarteo, lavado, tamizado y eliminación de lascas, para obtener los tamaños de agregados requeridos para el ensaye de Pulimento Acelerado según la normativa de referencia (BSI-812). El cuarteo y tamizado del material en laboratorio siguió los procedimientos establecidos en el Manual de Carreteras de Chile. El material que no permitiera cumplir los requisitos granulométricos para el ensaye fue descartado.

-Etapa 7. Muestreo en laboratorio para análisis mineralógico: Se muestrea los sacos mediante cuarteo, lavado y tamizado, para obtener los tamaños de agregados requeridos para el análisis mineralógico según lo requerido por laboratorio especializado.

El cuarteo y tamizado del material siguió los procedimientos establecidos en el Manual de Carreteras de Chile. El tamaño del material cumplió el corte granulométrico 80-100, evitando el polvo fino mediante tamizado sucesivo, según lo solicitado por el laboratorio especializado encargado de la realización del ensaye.

IV.2 Metodología para caracterizar los agregados en función del pulimento.

IV.2.1 Diseño experimental

El objetivo del diseño experimental fue caracterizar los principales agregados utilizados en carpetas de rodado en Chile en función del pulimento. De esta forma se pretende establecer el comportamiento de los agregados respecto de su susceptibilidad al pulimento basado en el ensayo de Pulimento Acelerado de origen Británico. Para ello se realizaron ciclos de pulimento en tiempo estándar y extendido, de manera de evaluar además si el tiempo de pulimento especificado en la normativa de ensayo de referencia corresponde al valor último de Resistencia al Deslizamiento que pueden alcanzar los agregados estudiados.

IV.2.2 Variables del diseño

a) Variable dependiente: Según la duración del ciclo de pulimento realizado en el experimento (estándar o extendido), se definió la variable independiente. Así, correspondió a PSV cuando se analiza el efecto del pulimento sobre un ciclo estándar (6 h) y a la Resistencia al Deslizamiento (RD) cuando se analiza el pulimento de un ciclo extendido (3, 6, 9 y 12 h).

b) Variables independientes y sus niveles: Las variables independientes consideradas son: origen del agregado (Fluvial, Cantera, Pozo), agregados seleccionados para el experimento (Nº) y tiempo de pulimento en laboratorio. Para esta última variable los niveles están dados por el ciclo de pulimento establecido en el ensayo estándar (6 h.) y la extensión del tiempo de pulimento (3, 6, 9 y 12 h.).

Como producto se obtiene el factorial de escenarios posibles, detallado en la Tabla IV.1.

Tabla IV.1: Matriz factorial de caracterización del pulimento de los agregados.

Origen	Agregado N°	Tiempo de pulimento (h)			
		3	6	9	12
Fluvial	1	8	8	8	8
	2	8	8	8	8
	3	8	8	8	8
	4	8	8	8	8
	5	8	8	8	8
	6	8	8	8	8
	7	8	8	8	8
	8	8	8	8	8
	9	8	8	8	8
	10	8	8	8	8
	11	8	8	8	8
	12	8	8	8	8
	13	8	8	8	8
	14	8	8	8	8
	15	8	8	8	8
	16	8	8	8	8
	17	8	8	8	8
	18	8	8	8	8
Cantera	19	8	8	8	8
	20	8	8	8	8
	21	8	8	8	8
	22	8	8	8	8
	23	8	8	8	8
	24	8	8	8	8
	25	8	8	8	8
	26	8	8	8	8
	27	8	8	8	8
	28	8	8	8	8
Pozo	29	8	8	8	8
	30	8	8	8	8

IV.2.3 Espacio de inferencia

El espacio de inferencia se acotó al número de empréstitos posibles de muestrear entre la XV y X región del país y porque los agregados debían ser aptos para utilizarse en capas de

rodadura, pudiendo ser de origen fluvial, cantera o pozo. Como no todos los empréstitos existentes en el país se encontraban en producción, esto limitó el número de escenarios posibles de incluir en el estudio y por tanto el espacio de aplicabilidad del mismo.

IV.2.4 Cantidad de réplicas

Para esta investigación se consideró una réplica del ensayo completo de pulimento estándar y extendido, lo que implicó 7 réplicas de cada probeta de agregado y tres réplicas del ciclo de pulimento.

IV.2.5 Metodología de toma muestras

El muestreo de los agregados siguió la metodología descrita en el punto IV.1. Se pretende obtener una muestra de al menos el 60% de los empréstitos disponibles, lo que asegura una confiabilidad de 95%, un error del 10% y un coeficiente de variación de 0,25, según la técnica de cálculo de tamaño muestral para muestreo aleatorio simple.

IV.2.6 Metodología de toma de datos

La determinación de la RD y PSV de los agregados se realizó con la Máquina de Pulimento Acelerado y con el Equipo Péndulo Británico. Los ensayos se ejecutaron siguiendo las instrucciones establecidas en la normativa BSI 812. Durante la ejecución de la extensión del ciclo de pulimento se utilizó solo agregado fino, de tal manera de dar continuidad al proceso de pulimento del agregado. El orden de los agregados a ensayar fue aleatorio. Para cada ensayo se fabricaron simultáneamente cuatro probetas por agregado, ensayándolas en dos ciclos de pulimento consecutivos.

El procesamiento de la variable dependiente se realizó como sigue:

- Para ciclo estándar: A partir de las cinco lecturas de Resistencia al Deslizamiento medidas sobre cuatro probetas al final del ciclo de pulimento de 6 h, se calculó el valor medio de la RD con las últimas tres lecturas del péndulo. Este fue el valor

representativo de cada probeta, resultando cuatro valores de RD por agregado. Se promedian los cuatro valores de RD y luego se corrigen en función de los resultados de pulimento del agregado patrón utilizando la Ecuación. 5 definida en el capítulo III.

- Para Ciclo extendido: Se promedian los cuatro valores de RD obtenidos de las cuatro probetas de agregado por cada ciclo. No se efectúa corrección por AP.

IV.2.7 Metodología de análisis de datos

Para el análisis de datos se utilizó un ANOVA multifactorial para determinar la significancia de los factores considerados en el diseño. Además, se realizaron regresiones para definir la influencia del tipo de origen en el valor del PSV y para establecer relaciones funcionales entre el PSV y el tiempo de pulimento en laboratorio.

IV.3 Metodología para caracterizar los agregados en función de su petrografía.

IV.3.1 Diseño experimental

El objetivo del experimento es caracterizar a los principales agregados utilizados en Chile para capas de rodado, en función de los componentes minerales o fragmentos litológicos constituyentes.

IV.3.2 Variables del diseño

a) Variable dependiente: Corresponde al porcentaje en volumen de los componentes litológicos o minerales de los agregados, determinado a partir del ensayo de Lupa binocular

b) Variables independientes y sus niveles: Las variables independientes están dadas por el tipo mineral o fragmento litológico de los agregados seleccionados para el experimento, la zona geográfica a la que pertenecen (Norte, Centro y Sur) y el agregado muestreado propiamente tal.

El factorial de escenarios posibles se muestra en la Tabla IV.2.

IV.3.3 Espacio de inferencia

Para la composición petrográfica los constituyentes: Andesita, Arenisca, Basalto, Caliza, Cuarzo, Dacita, Diorita, Epidocita, Granito, Lutita, Piroxeno, Plagioclasa y Toba, representan una primera aproximación para especificar la petrográfica posible de encontrar en los agregados Chilenos.

Tabla IV.2: Matriz factorial para la caracterización petrográfica

Fragmento litológico o mineral	Zona geográfica	Agregado
Andesita	Norte	10
	Centro	11
	Sur	9
Basalto	Norte	7
	Centro	11
	Sur	9
Granito	Norte	10
	Centro	10
	Sur	9
Dacita	Norte	10
	Centro	11
	Sur	7
Diorita	Norte	10
	Centro	11
	Sur	9
Toba	Norte	9
	Centro	11
	Sur	3
Cuarzo	Norte	9
	Centro	8
	Sur	6
Plagioclasa	Norte	10
	Centro	9
	Sur	9
Lutita	Norte	2
	Centro	6
	Sur	0
Epidocita	Norte	1
	Centro	1
	Sur	0
Caliza	Norte	1
	Centro	3
	Sur	0
Arenisca	Norte	0
	Centro	1
	Sur	2
Piroxeno	Norte	1
	Centro	0
	Sur	3

IV.3.4 Cantidad de réplicas

Para un mismo tipo de mineral o roca se realizó un número de réplicas dado por el número de agregados que lo contenían.

Dada las características de la variable composición petrográfica (única para cada agregado) no fue posible realizar réplicas para un mismo % en volumen de constituyente petrográfico.

IV.3.5 Metodología de toma de muestras

El muestreo de los agregados siguió la metodología descrita en el punto IV.1.

IV.3.6 Metodología de toma de datos

Para determinar la petrografía, un laboratorio especializado realizó una identificación de los posibles minerales y fragmentos litológicos presentes en los agregados, en base a experiencia internacional y a la condición geológica de Chile. La metodología consistió en estudiar bajo lupa binocular un corte transparente de agregado. Esta metodología permitió analizar bajo microscopio más de 100 partículas de agregado y determinar como porcentaje en volumen los minerales o fragmentos litológicos constituyentes de cada uno de ellos.

IV.3.7 Metodología de análisis de datos

Para caracterizar los agregados según su petrografía se realizó el análisis en base a estadística descriptiva.

IV.4 Metodología para evaluar la influencia de la petrografía en el pulimento de los agregados

IV.4.1 Diseño experimental

El diseño experimental consideró la especificación de una matriz factorial que incluyó la composición petrográfica de los agregados y el tiempo de pulimento en hora. Se pretende determinar relaciones entre la petrografía y el pulimento de los agregados determinado en laboratorio.

IV.4.2 Variables del diseño

a) Variable dependiente: Corresponde al indicador Polished Stone Value (PSV) obtenido a partir del ensayo estándar de pulimento (6 hrs.)

b) Variables independientes y sus niveles:

A partir de la revisión bibliográfica realizada, se determinó que la composición petrográfica, además de ser una variable diferenciadora de los agregados, puede tener influencia sobre la susceptibilidad al pulimento de los mismos. Los niveles de esta variable están dados por el tipo y cantidad en volumen de componentes encontrados en las muestras analizadas.

El factorial de escenarios posibles se muestra en la Tabla IV.3.

IV.4.3 Espacio de inferencia

El espacio de inferencia se acotó al número de empréstitos posibles de muestrear entre la XV y X región del país y por que estos deben ser aptos para utilizarse en capas de rodadura.

Tabla IV.3: Matriz factorial para clasificación de muestras en ensayo de pulimento

Fragmento litológico o mineral	Porcentaje en Volumen (%)		Tiempo de Pulimento (6 h.)
Andesita	Bajo	< 10	7
	Medio	10 – 35	15
	Alto	36 – 50	8
Basalto	Bajo	< 10	8
	Medio	10 – 30	12
	Alto	31 – 55	10
Granito	Bajo	< 10	21
	Medio	10 – 20	6
	Alto	21 – 30	3
Dacita	Bajo	< 7	18
	Medio	7 – 20	10
	Alto	21 – 42	2
Diorita	Bajo	< 4	3
	Medio	4 – 10	20
	Alto	10 – 20	7
Toba	Bajo	< 3	16
	Medio	3 a 10	10
	Alto	10 – 26	4
Cuarzo	Bajo	< 2	12
	Medio	2 – 10	11
	Alto	10 – 30	7
Plagioclasa	Bajo	< 8	15
	Medio	8 – 17	12
	Alto	17 – 63	3
Lutita	Bajo	< 2	24
	Alto	2 – 5	6

IV.4.4 Cantidad de réplicas

Para la determinación de los modelos y relaciones se realizó una réplica del ensayo PSV por cada agregado estudiado.

IV.4.5 Metodología de toma de muestras

El muestreo de los agregados siguió la metodología descrita en el punto IV.1.

IV.4.6 Metodología de toma de datos

Para determinar la variable petrografía, un laboratorio especializado realizó el estudio petrográfico consistente en estudiar bajo lupa binocular un corte transparente de agregado. Para ello se utilizó el método de corte transparente, el cual permite identificar bajo microscopio más de 100 partículas de agregado para estimar en volumen su constitución petrográfica.

Existen otras metodologías de caracterización como el análisis directo bajo microscopio o el ensayo de Difracción de Rayos X, que permiten realizar este mismo análisis. Sin embargo el primero requiere de agregados de tamaños mayores por lo que la muestra a analizar podría no ser representativa del agregado en su conjunto, en tanto que la segunda es mucho más precisa pero requiere de material de granulometría muy fina (bajo malla N°200) condición fuera de las características de los agregados representativos de este estudio.

IV.4.7 Metodología de análisis de datos

Para evaluar la influencia de cada componente mineral o fragmento litológico sobre el PSV, estos fueron divididos en tres grupos o niveles según su porcentaje en volumen dentro de los agregados, por medio de un análisis de clusters. Luego se efectuó un ANOVA de un factor por cada mineral constituyente, considerando como variable respuesta el valor del PSV de los agregados de cada grupo o nivel. Con ello se pudo establecer con un nivel de significancia α de un 5%, si existe diferencia estadísticamente significativa para la media de PSV entre un nivel y otro. Finalmente se utilizó el método de la mínima diferencia significativa (LSD) de Fisher para determinar con un 95% de nivel de confianza cual de las medias era significativamente diferente de otra entre cada grupo o nivel.

Se realizaron regresiones múltiples para encontrar un modelo de comportamiento del PSV en función de la composición mineralógica de los agregados. La validación se realizó mediante un test-t de medias para evaluar muestras independientes y pareadas entre el PSV observado y el PSV predicho por el modelo.

V. RESULTADOS DE LA CARACTERIZACION DE LOS AGREGADOS

En este capítulo se presenta el listado de los empréstitos seleccionados para el experimento y se detallan y analizan los principales resultados obtenidos de la caracterización de la resistencia mecánica, petrografía y Pulimento Acelerado realizada sobre los agregados en estudio. Los principales ensayos realizados y la normativa aplicable en su ejecución se resumen en la Tabla V.1.

Tabla V.1: Resumen de ensayos aplicados a los agregados

Ensayo	Norma Aplicada	
	Chilena	Asimilable
Desgaste de Los Ángeles	MC-8.202.11	ASTM C131 – 06
Índice de Trituración	MC-8.202.8	BSI 812: 75
Desintegración	MC-8.202.17	ASTM C 88-73
Pulimento Acelerado	--	BSI 812 – 114: 1999

V.1 Selección de los agregados

Utilizando la metodología descrita en la Sección IV.1 se realizó el muestreo y selección de los agregados para los ensayos de Resistencia Mecánica, Pulimento Acelerado y caracterización petrográfica.

En base a la información proporcionada por la Dirección de Vialidad, fueron muestreados 42 empréstitos que representaban el 100% de los disponibles a la fecha de su recolección. Luego, en laboratorio fueron seleccionadas 30 muestras que cumplían con los requerimientos granulométricos necesarios para la realización del experimento, que representan el 72% respecto de la muestra total. La Tabla V.2 presenta el resumen con el listado de los empréstitos seleccionados.

Tabla V.2: Listado de empréstitos seleccionados para el experimento

Agregado N°	Región	Origen	Planta	Tipo
1	XV	Pozo Guatacondo	Guatacondo	Pozo
2	I	Cantera	Angel Rojas	Cantera
3	I	Cantera	Gallinazos	Cantera
4	I	Cantera km 7300	San Jorge	Cantera
5	II	Cantera Ruta B710	Vecchiola	Cantera
6	II	Cantera Ruta 24	Vecchiola	Cantera
7	II	Cantera Ruta 25	Esco Ltda.	Cantera
8	II	Cantera Ruta 5	Vecchiola	Cantera
9	II	Pozo San Jorge	San Jorge	Pozo
10	III	Cantera	Cardones	Cantera
11	IV	Río Elqui	B. Algarrobito	Fluvial
12	V	Río Maipú	Asfalcura	Fluvial
13	V	Río Ligua	Hanus	Fluvial
14	V	Río Aconcagua	Tricam La Ligua	Fluvial
15	VI	Río Cachapoal	Bitumix	Fluvial
16	VI	Estero Zamorano	Tafca	Fluvial
17	VII	Río Maule	Maule	Fluvial
18	VIII	Río Bio Bio	Coihue	Fluvial
19	VIII	Río Ñuble	Islamin	Fluvial
20	VIII	Río Ñuble	Cosmito	Fluvial
21	IX	Río Cautin	Chacarero	Fluvial
22	IX	Río Cautin	Sierra Nevada	Fluvial
23	X	Pozo Recondo	Recondo	Fluvial
24	X	Puerto San Antonio	San Felipe	Fluvial
25	X	Pozo La Vara	Petreos	Fluvial
26	X	Río Rahue	Downling	Fluvial
27	RM	Río Clarillo	Bitumix Pte Alto	Fluvial
28	RM	Río Maipú	Santa Gloria	Fluvial
29	RM	Cantera	Bitumix Pte. Verde	Cantera
30	RM	Cantera	LaFarge	Cantera

Para simplificar el análisis se sectorizó en base al nivel de precipitaciones medio anual de cada región del país. Así se establecieron tres macro zonas geográficas:

- Norte: Regiones XV a III. Constituido por 10 empréstitos ($ppma < 5mm$).
- Centro: Regiones IV a VII. Constituido por 11 empréstitos ($5mm < ppma < 400mm$).
- Sur: Regiones VIII a X. Constituido por 9 empréstitos ($ppma > 400mm$).

La macro zona norte está compuesta por el 33% del total de empréstitos seleccionados, el centro por el 37% y el Sur por el 30%.

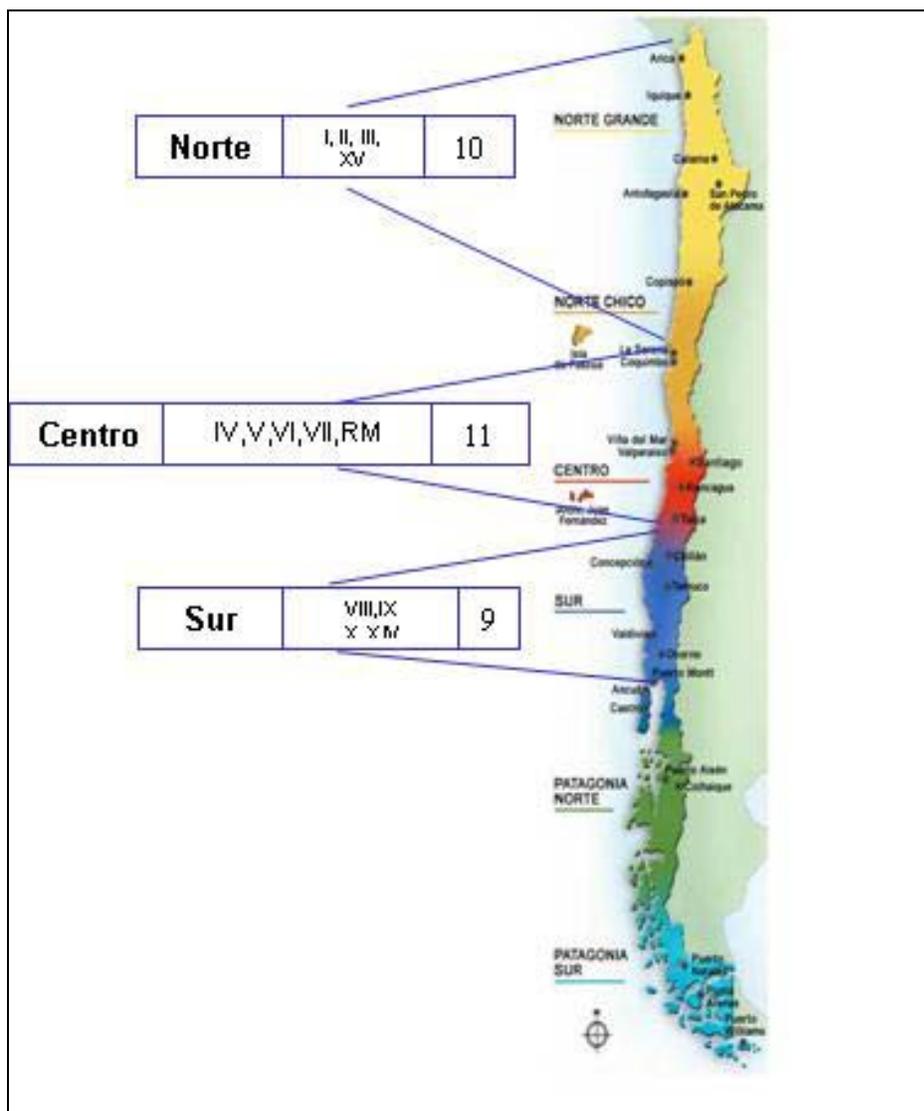


Figura V-1: Macro zonas geográficas para agrupación de los agregados

V.2 Caracterización de la Resistencia Mecánica

Con el objeto de caracterizar la resistencia mecánica de los agregados se realizaron tres ensayos: Desgaste de los Ángeles, Índice de Trituración y Desintegración por el Método de los Sulfatos. Estos ensayos son utilizados en Chile para especificar la calidad de los materiales granulares utilizados en las capas de pavimento.

Efectuar una caracterización en base a estas variables permite tener una idea inicial respecto de las propiedades de los agregados que están siendo estudiados.

La Tabla V.3 resume los resultados obtenidos sobre los 30 agregados ensayados. En ella se puede apreciar que sólo una (1) muestra no cumple con los tres requisitos mecánicos especificados para pavimentos en Chile, pero el valor límite es sobrepasado en sólo 5 puntos porcentuales.

Se concluyó de estos ensayos que todos los agregados muestreados eran adecuados para ser usados en superficies de rodadura, por lo cual podían ser incluidos en el estudio de pavimento.

Tabla V.3 Resultados de ensayos de caracterización mecánica.

Ensayo	Media	Desviación Estándar	Máx.	Mín.	Límite aceptable*	Nº muestras No cumple
Desgaste de los Ángeles (%)	16,8	3,9	26,4	11,7	25 ó 35	0
Índice Trituración Gruesos (%)	11,1	4,0	24,8	8,4	20	1
Índice Trituración Finos (%)	1,5	0,6	2,7	0,5	4	0
Desintegración por Sulfato (%)	2,8	4,3	4,0	0,6	15	0

* Según especificaciones del Manual de Carreteras de Chile Vol. 8 Secciones 8.202.8, 8.202.11 y 8.202.17 y Vol.5 Secciones 5.407, 5.408 y 5.410.

V.2.1 Ensayo de Desgaste de los Ángeles.

El índice de desgaste de un agregado está relacionado con su resistencia a la abrasión por medios mecánicos y también con la capacidad resistente de los hormigones. El ensaye

permite simular los efectos ambientales y las tensiones internas que producen las sollicitaciones aplicadas sobre el pavimento. El procedimiento de ensayo consiste en analizar granulométricamente un árido grueso, preparar una muestra de ensayo que se somete a abrasión en la máquina de Los Ángeles y expresar la pérdida de material o desgaste como el porcentaje de pérdida de masa de la muestra con respecto a su masa inicial.

El límite máximo para este parámetro está especificado para Chile en el Manual de Carreteras de la Dirección de Vialidad (Volumen 5. Secciones 5.407, 5.408 y 5.410). Se considera aceptable un agregado cuya desintegración no supera el 25% ó en casos especiales de la zona norte del país el 35% como máximo. Si se observa en la Figura V-2, la totalidad de los agregados estudiados cumplen con el límite especificado, siendo el menor valor 11,7% y el mayor 26,4% correspondiente a un agregado de la segunda región del país.

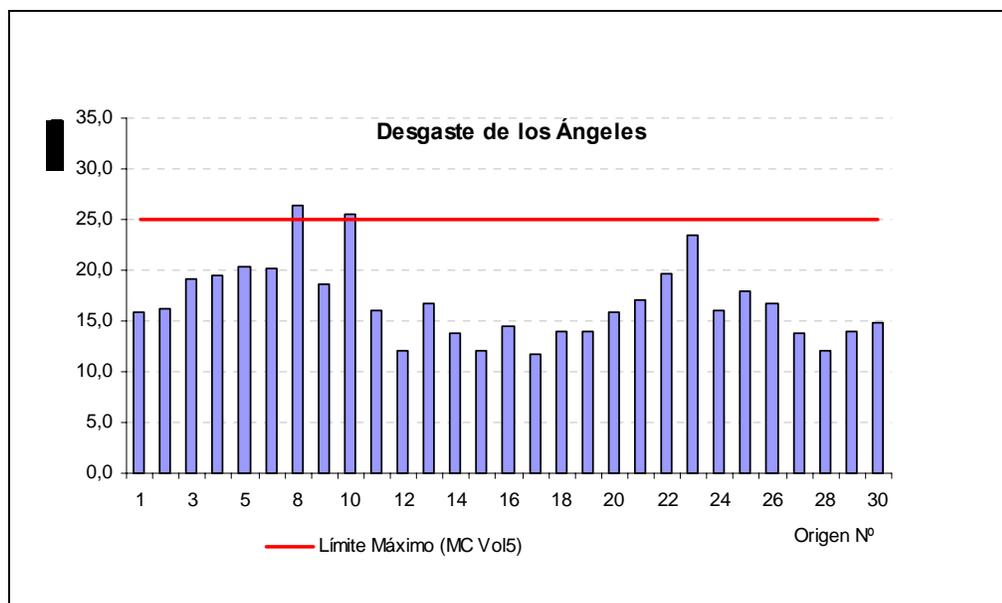


Figura V-2: Resultados ensayo de Desgaste de los Ángeles

V.2.2 Ensayo de Índice de Trituración.

Este método tiene por finalidad determinar en forma indirecta la resistencia del agregado que es sometido a impacto o compresión. Si se trata de árido grueso (40 - 10 mm) el procedimiento consiste en confinarlo en un molde y someterlo a la acción de una carga gradual de compresión. En cambio, si se trata de árido fino (10 - 0,630 mm), es sometido a la acción de impactos repetidos, también en situación de confinamiento. Para los agregados más gruesos se utiliza como complemento del ensaye de Desgaste Los Ángeles o como para sustituirlo cuando no se dispone de él. En ambos casos lo que se mide es el porcentaje de pérdida de masa de la muestra con respecto a su masa inicial debida a la trituración mediante un análisis granulométrico.

El valor límite aceptable depende del tamaño del agregado. Para agregados gruesos el máximo aceptable es de 20% y para los finos un 4% (MC Vol.5, 2003). En este caso todos los agregados gruesos y un 97% de los agregados finos cumplen con las especificaciones. Sin embargo, la muestra N°4 sobrepasa en 5 puntos porcentuales la especificación para agregado fino.

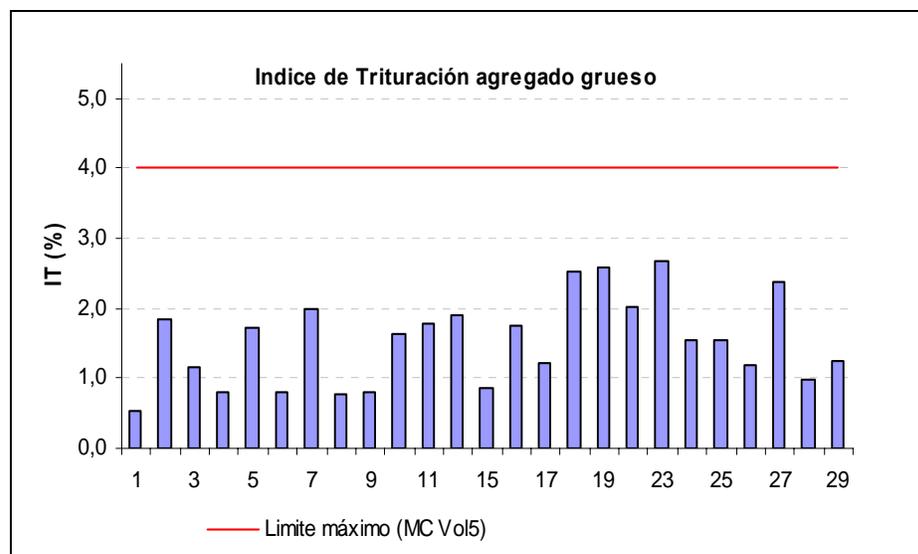


Figura V-3 Resultados de ensaye de Trituración agregado grueso

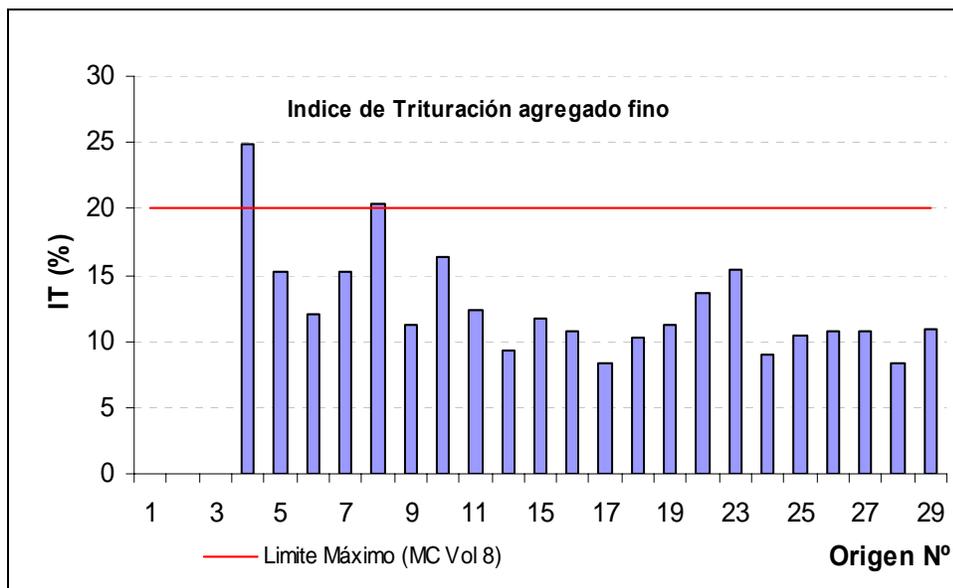


Figura V-4 Resultados de ensayo de Trituración agregado fino

V.2.3 Ensayo de Desintegración por el Método de los Sulfatos.

Este método permite evaluar la estabilidad física de los agregados frente a condiciones ambientales reales como ciclos alternados de humedad o temperatura, especialmente los ciclos hielo y deshielo. Es un método de ensayo que permite determinar la resistencia de los agregados a la desintegración por medio de soluciones saturadas de sulfato de sodio. Para agregados utilizados en mezclas asfálticas el límite máximo es de 15% y para su uso en hormigones el máximo porcentaje de desintegración permitido es de 10%. Todos los agregados ensayados cumplen ampliamente esta especificación.

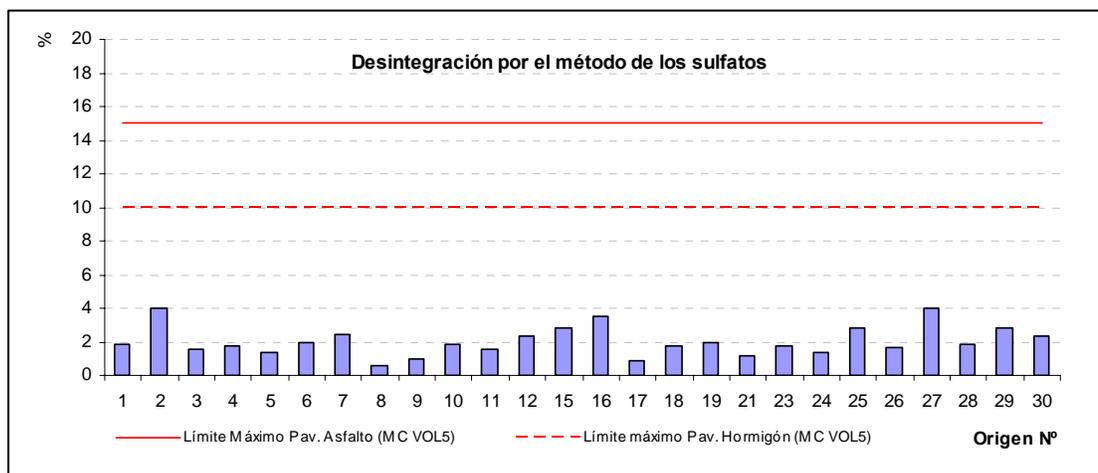


Figura V-5: Resultados de ensaye de Desintegración por el Método de los Sulfatos

V.3 Caracterización petrográfica de los agregados

A partir del estudio petrográfico realizado sobre los 30 tipos de agregados, se obtuvo para cada uno la composición petrográfica como porcentaje en volumen de los fragmentos litológicos y minerales constituyentes.

En la Tabla V.4 se muestra un resumen de este ensayo. En ella se aprecia que predominan los agregados que contienen andesitas (25,9%), basaltos (25,8%) y plagioclasas (11,7%) representando el 63,4 % de la composición de los agregados Chilenos.

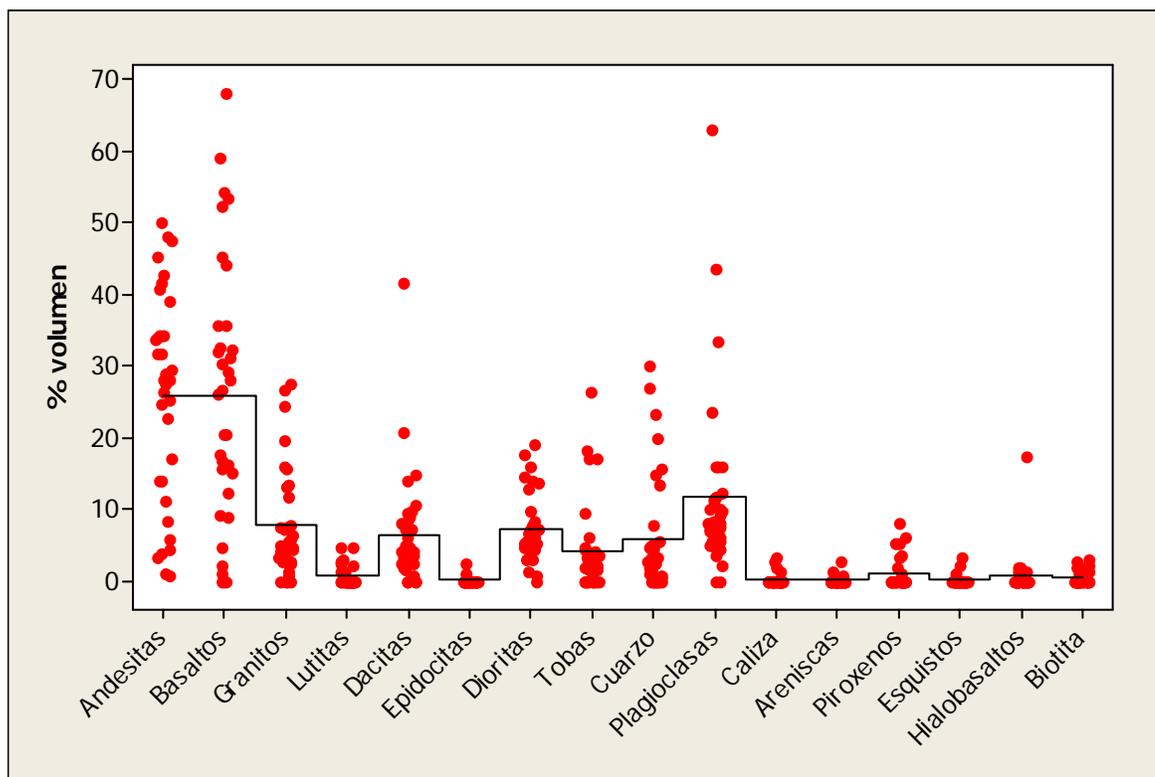


Figura V-6: Valor Medio de la composición petrográfica como % en Volumen.

Tabla V.4: Resultado de ensayo de caracterización petrográfica.

Composición petrográfica	Media*	StDev	Varianza	Mínimo	Máximo
Andesitas	25,87	14,81	219,42	0,82	50,00
Basaltos	25,78	18,39	338,01	0,00	67,99
Granitos	7,73	7,62	58,11	0,00	27,50
Lutitas	0,67	1,35	1,83	0,00	4,76
Dacitas	6,40	7,81	60,93	0,00	41,52
Epidocitas	0,11	0,47	0,22	0,00	2,52
Dioritas	7,21	4,77	22,71	0,00	19,01
Tobas	4,20	6,24	38,98	0,00	26,32
Cuarzo	5,87	8,34	69,54	0,00	30,07
Plagioclasas	11,73	12,59	158,43	0,00	63,11
Caliza	0,28	0,81	0,65	0,00	3,36
Areniscas	0,14	0,53	0,28	0,00	2,81
Piroxenos	1,00	2,12	4,49	0,00	7,94
Esquistos	0,19	0,69	0,48	0,00	3,39
Hialobasaltos	0,70	3,00	9,01	0,00	17,42
Biotita	0,46	0,87	0,76	0,00	3,07

*Media del % en volumen.

V.3.1 Análisis de resultados

Para realizar un análisis simplificado y utilizando la sectorización geográfica indicada en V.1 se determinó el valor promedio de cada uno de los constituyentes minerales y litológicos predominantes de las muestras pertenecientes a cada macro zona. En la Tabla V.5 se observa que la zona centro y sur del país presentan un alto porcentaje de rocas del tipo Andesitas y Basaltos, con estructuras del tipo Porfídicas. En la zona Norte, mayoritariamente los agregados están compuestos por rocas graníticas y minerales feldespatoideos como la plagioclasa, con texturas del tipo granudas (ver Figura V-7).

Tabla V.5 Composición petrográfica promedio por zona geográfica

Macro zona Geográfica	Andesita	Basalto	Granito	Dacita	Diorita	Toba	Cuarzo	Plagiocl.
Norte	10,60	5,71	15,58	10,52	9,40	2,71	9,82	27,65
Centro	34,44	24,21	5,72	4,76	8,76	4,43	6,19	7,91
Sur	31,07	36,86	5,25	3,13	5,99	4,51	1,59	6,88

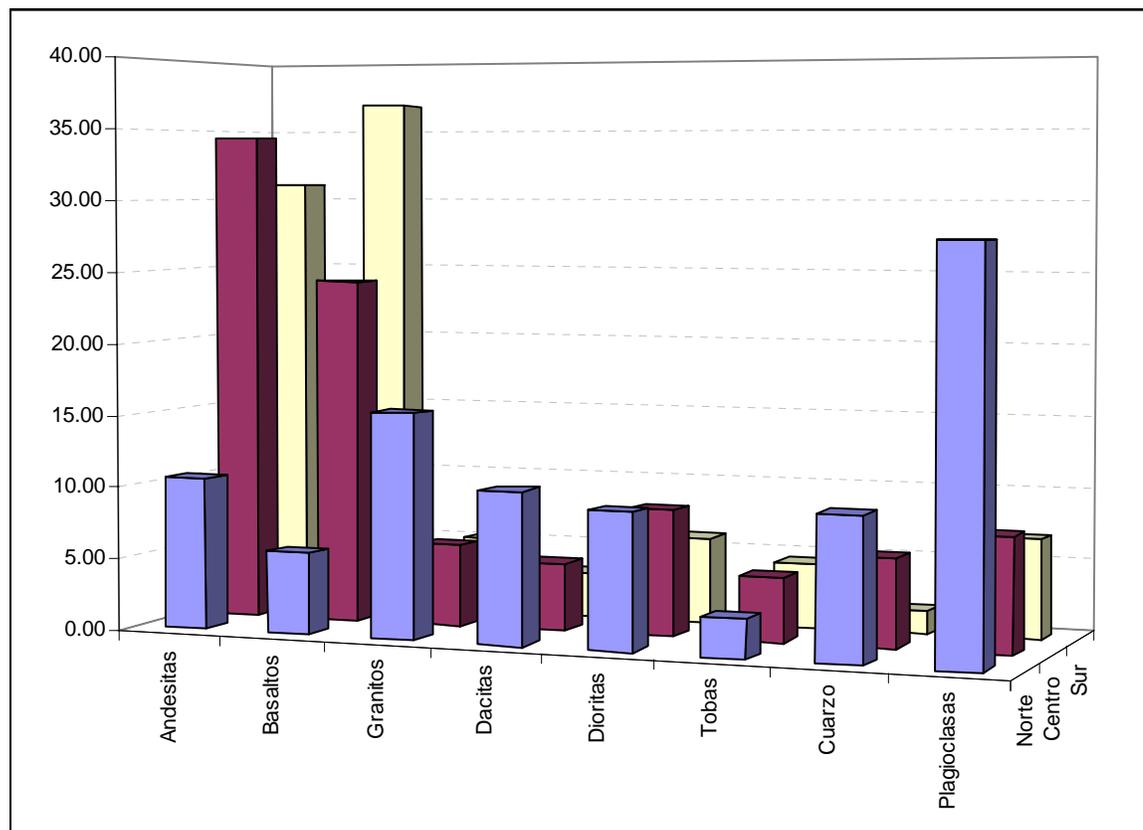


Figura V-7 Composición petrográfica como % en volumen por macro zona.

V.4 Caracterización en función del ensayo de Pulimento Acelerado ciclo estándar

Para la caracterización en función del pulimento en su ciclo estándar, los agregados fueron ensayados durante 3 y 6 horas. En cada ciclo se midió la resistencia al deslizamiento, con equipo Péndulo Británico, sobre cuatro probetas por cada tipo de agregado. Además, con los valores de RD a las 6 h. se calculó el coeficiente PSV.

La Tabla V.6 muestra un resumen de los resultados obtenidos. En ella se aprecia que la gran media de RD de los agregados ensayados durante 3 h. resultó de 55,7 y para los ensayados durante 6 h. de 45,6. Esta disminución se tradujo en que la tasa media de pérdida de RD durante un ciclo estándar fue de 18,1%, que resulta más alta que la encontrada por Liang (2005) que en promedio obtuvo un 12%, pero similar a la obtenido por Ahadi (2008) de un 18,9%. Aunque la tasa de pérdida de RD entre un ciclo y otro depende de la susceptibilidad al pulimento del agregado ensayado, el valor medio obtenido es consistente con los resultados de otros investigadores en experimentos similares.

Por otra parte, se observa en la Figura V-8 que la variabilidad de los resultados de RD de todos los agregados estudiados a lo largo del país es pequeña, teniendo una desviación estándar promedio de 2,9 para 3 h. de pulimento y 2,5 para 6 h. de pulimento.

Tabla V.6: Resultado ensayo de Pulimento Acelerado. Ciclo 3 y 6 h.

Estadístico	Resistencia al Deslizamiento (RD)		Tasa de pérdida de RD	PSV
	Ciclo 3 h.	Ciclo 6 h.		
Gran Media	55,7	45,6	18,1	45,2
Máximo Absoluto	63,4	51,6	23,4	50,5
Mínimo Absoluto	48,4	39,2	15,6	37,9
Desv. Estándar	2,9	2,5	1,8	2,6
Coef. de variación	0,05	0,05	0,10	0,06

Se calculó el valor del Coeficiente de Pulimento Acelerado (PSV) utilizando la Ecuación 5 calibrada para Chile. La gran media del PSV resultó de 45,2 con una desviación estándar de 2,6.

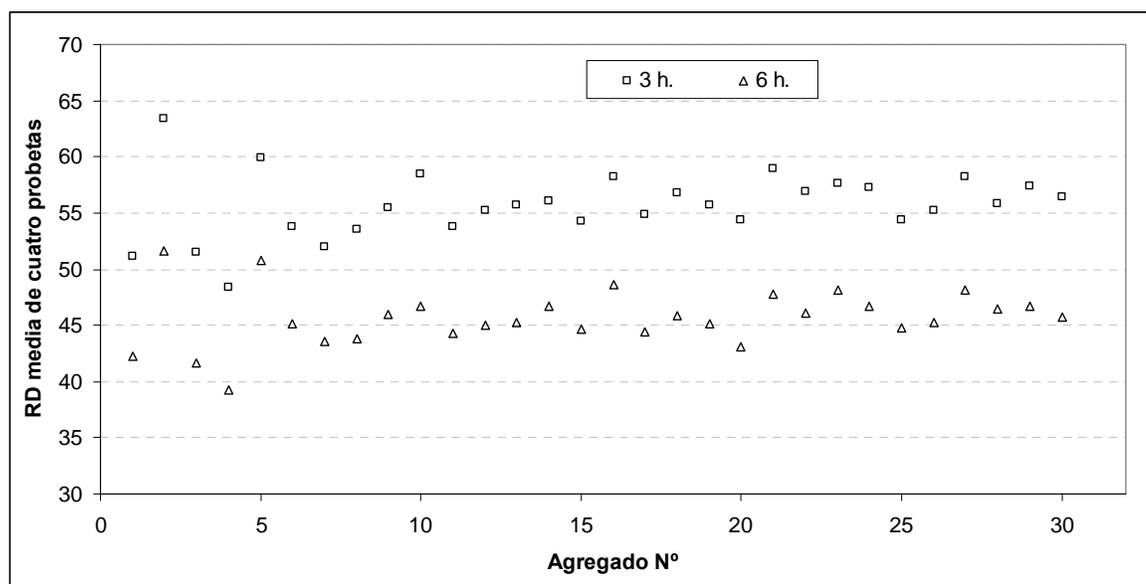


Figura V-8: Resultado ensayo de Pulimento Acelerado. Ciclo de 3 y 6 horas.

V.4.1 Análisis de resultados

a) *Significancia estadística de los factores del diseño experimental:*

Para verificar si los tipos de agregados y el tiempo de pulimento influían sobre el PSV, se realizó un análisis ANOVA de un factor y se determinó la significancia de las variables independientes y sus interacciones.

Del análisis se pudo inferir con un 95% de nivel de confianza que ambos factores son significativos en el valor del pulimento de los agregados, pero no existe interacción entre ellos (ver Tabla V.7). Esto refleja que los agregados analizados, si bien entregan una variabilidad pequeña en el valor del PSV, son estadísticamente diferentes entre sí.

Tabla V.7: Resultado análisis de significancia de factores sobre el PSV.

Fuente de Variación	SS	Dof	MS	Fo	P	Efecto
Agregado N°	3456.38	29	119.18	19.37	3.22E-41	Significativo
Tiempo de pulimento	5231.33	1	5231.33	850.32	4.18E-70	Significativo
Interacción factores	62.32	29	2.14	0.34	0.999	No significativo
Error	3939.31	180	21.88			
Total	12689.35	239				

b) Clasificación de los agregados en función del PSV.

Para las tres macro zonas de muestreo se determinó la media del PSV de los agregados, resultados que se aprecian en la Tabla V.8. Las medias de PSV resultaron muy similares en el centro y sur del país, pero menor en la zona norte. Hay que destacar que el valor de PSV encontrado en la zona norte está calculado incluyendo 2 agregados que contienen un alto porcentaje de Andesita y Basalto (>60%), muy superior al 8,8% que en promedio contiene el resto de los agregados de esa misma zona geográfica, lo que aumenta la media.

Tabla V.8: Clasificación del PSV según origen geográfico del agregado

Zona Geográfica.	PSV media	PSV Max.	PSV Min.
Norte	44.7	50.5	37.9
Centro	45.6	46.6	41.6
Sur	45.4	47.7	43.6

Mediante un análisis de clusters, se definieron tres grupos o niveles de PSV para los agregados Chilenos, como se aprecia en la Tabla V.9. En el grupo 1 predominan agregados con PSV inferiores a 40 y en los grupos 2 y 3 agregados con PSV superiores a 45.

Se observa que en cada uno de estos niveles existe una cantidad variable de agregados provenientes de diferentes regiones del país. El grupo 1 está constituido sólo por un agregado de la I región cuyo PSV es el más bajo encontrado en el país, correspondiente a

un agregado con un alto contenido de granito (28%) y un bajo contenido de andesita (4%) y basalto (2,5%).

El grupo 2 esta compuesto por un 50% de agregados procedentes de las regiones XV a IV, y el grupo 3 que es el que contiene los valores más altos de PSV está constituido por un 76% de agregados provenientes de la zona centro y sur del país.

Tabla V.9 : Clases de agregados por zona geográfica y PSV

Grupo	Rango	PSV Media	Desviación Estándar	Nº agregados	% Zona Norte	% Zona Centro	% Zona Sur
1	PSV<40	37,9	0,00	1	100	0	0
2	40<=PSV<45	43,5	1,23	12	50	33	17
3	45<=PSV<51	46,9	1,52	17	24	41	35

c) *Influencia del origen del agregado sobre el pulimento:*

Se realizó un análisis de varianza mediante un modelo lineal generalizado (ver Ecuación 8), a fin de determinar el efecto del origen de los agregados sobre el PSV.

$$PSV = \beta_0 + \beta_1 D_1 + \beta_2 D_2 \quad (8)$$

En donde D_1 vale 1 cuando el origen es de tipo fluvial y vale 0 en otro caso; D_2 vale 1 cuando el origen es de tipo cantera y vale 0 en otro caso. Cuando ambas variables son 0, el agregado es de origen tipo Pozo.

La Tabla V.10 muestra los resultados. En ella se aprecia que puesto que el valor p es significativo para un 95% de nivel de confianza, no existe diferencia estadísticamente significativa en el valor de PSV según el origen del agregado. Esto apoya la hipótesis de que por un lado no existe un correlato entre el origen del agregado y la composición petrográfica que afecte el valor de PSV sino que la pura composición petrográfica es la que determina en gran medida la susceptibilidad al pulimento del agregado.

Tabla V.10: Análisis de varianza de PSV respecto del origen

Parámetro	Estimación	Error Estándar	t	Valor p
β_0	44,65	1,87	23,8	0
β_1	0,79	1,97	0,4	0.6904
β_2	0,28	2,05	0,1	0.8924

d) *Comparación con especificaciones Internacionales de pulimento:*

Utilizando la Ecuación 7 se calculó el Coeficiente de Pulimento Acelerado ajustado (PSV_c) para comparar los resultados obtenidos con la MPA local y los valores especificados en normativas internacionales. La

Tabla V.11 muestra los resultados ajustados.

Se obtuvieron valores medios entre 44 a 57 unidades PSV_c , resultando la gran media igual a 51,7. El 100% de los agregados evaluados cumplen con el mínimo exigido en las normativas analizadas, tal como se muestra en la Figura V-9. En particular, el 83% de los agregados estudiados cumplen sólo con el valor mínimo exigido en la normativa del Reino Unido ($PSV=50$).

	Polished Stone Value (PSV)							
	40	45	50	55	60	65	68	70+
Alemania		■	■					
Argentina	■							
Australia		■						
Francia		■	■	■	■	■	■	
Nueva Zelanda	■	■	■	■	■	■	■	■
Reino Unido			■	■	■	■	■	■
Sudáfrica		■	■					
Chile	■	■	■	■				

Figura V-9 Comparación de resultados de pulimento con normativas internacionales

Esto permite concluir que la mayoría de los agregados Chilenos estudiados pueden ser utilizados en el Reino Unido, pero sólo en pavimentos con un nivel de tránsito menor a 2000 veh/pista/día y una demanda de fricción menor que 0,35 SFC, correspondiente a autopistas, carreteras de dos pistas por sentido y/o carreteras de una pista por sentido pero con flujo libre (DMRB, 1999). Hay que tener presente que en Europa se utilizan agregados de origen artificial, como la Bauxita calcinada, para poder cumplir con los valores de pulimento más exigentes de estas especificaciones (PSV>65).

Tabla V.11: Coeficiente de Pulimento Acelerado ajustado PSVc

Región	Agregado N°	PSVc
XV	1	49.3
I	2	56.9
	3	47.4
	4	44.4
	5	57.0
II	6	50.4
	7	49.3
	8	50.4
	9	53.0
III	10	54.0
IV	11	50.5
RM	27	54.2
	28	52.0
	29	53.6
	30	50.9
V	12	51.3
	13	52.4
	14	52.5
VI	15	51.8
	16	53.1
VII	17	50.5
VIII	18	53.0
	19	51.4
	20	48.1
IX	21	52.8
	22	52.2
X	23	54.2
	24	52.5
	25	50.1
	26	52.4

V.5 Caracterización en función del ensayo de Pulimento Acelerado ciclo extendido

Se extendió el período de pulimento en 9 y 12 horas. Se midió la RD con Péndulo Británico sobre cuatro probetas de agregados pulidos en 4 ciclos: 3, 6, 9 y 12 h. Los resultados pueden verse en la Tabla V.12.

Se observa que la diferencia de la gran media de RD entre las 9 h. y 6 h. fue de 1,1 y la diferencia de la gran media de RD entre las 9h. y 12 h. fue de -1,6. El valor de la media de RD a las 12 h. de ensayo resultó muy similar al obtenido a las 6 h.

Esto indica que en general los agregados ensayados tuvieron una leve ganancia de micro textura durante el tercer ciclo de pulimento y una pérdida de la misma en el último ciclo. Sin embargo, la variabilidad de la RD para el ciclo extendido continuó siendo pequeña, alcanzando una desviación estándar menor a 3.

Tabla V.12: Resumen estadístico de resultados ensayo pulimento extendido.

Estadístico	Resistencia al Deslizamiento (RD)			
	Ciclo 3 h.	Ciclo 6 h.	Ciclo 9 h.	Ciclo 12 h.
Gran Media	55.7	45.6	46.7	45.1
Máximo Absoluto	63.4	51.6	53.1	52.0
Mínimo Absoluto	48.4	39.2	40.1	37.5
Desv. estándar	2.9	2.5	2.9	3.0
Coef. de variación	0.05	0.06	0.06	0.07

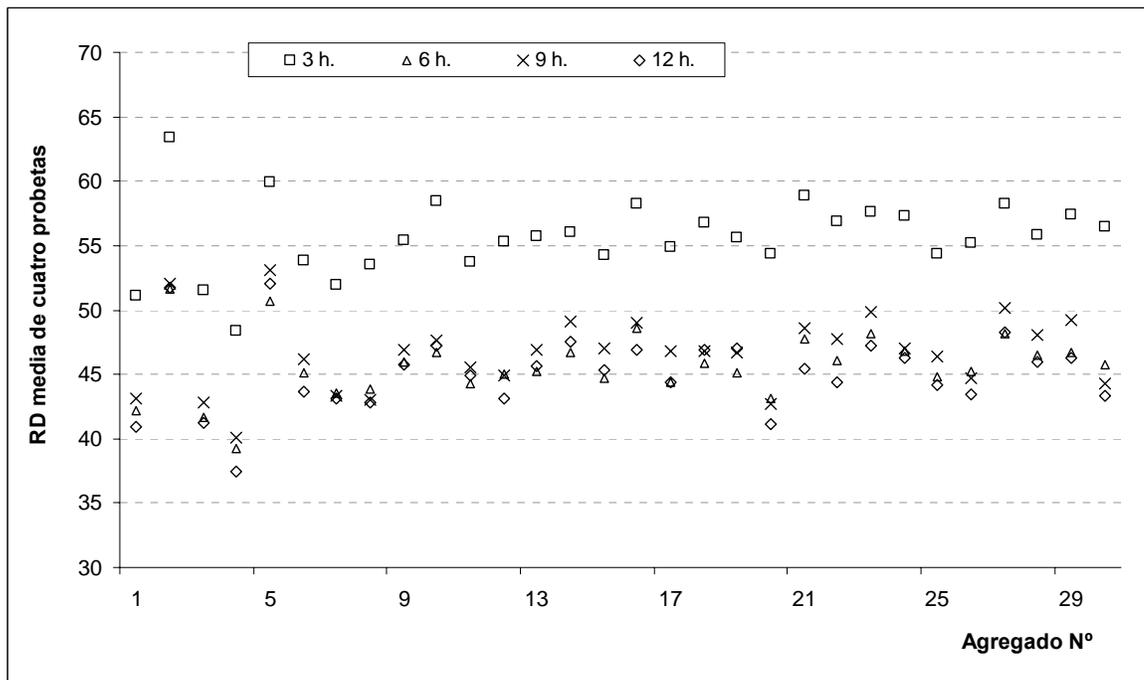


Figura V-10: Resultados ensayo de pulimento ciclo extendido

V.5.1 Análisis de resultados

Se realizó un análisis de varianza para determinar el efecto del tiempo de ensayo sobre el PSV de los agregados, con el fin de determinar si el valor a las 6 horas representaba el valor de RD en la fase de equilibrio de pulimento. Los resultados mostraron que no existe diferencia significativa entre los valores de resistencia al deslizamiento a las 6 h. y 12 h. de pulimento. Esto se aprecia en la Tabla V.12.

Un 63% de los agregados aumentó su RD a las 9 h. respecto de su valor en el ciclo de 6h, tal como se muestra en la Figura V-11, pero esta diferencia no resultó estadísticamente significativa. Según las hipótesis que se plantean en Echaveguren (2008), esta leve ganancia de micro textura puede deberse a que las fuerzas horizontales ejercidas por los neumáticos pueden fracturar la superficie de los agregados con lo cual existe un rejuvenecimiento que se traduce en una ganancia de RD, lo que da lugar a un

comportamiento oscilatorio de ganancia y pérdida de microtextura. Situación que podría explicar el fenómeno producido en laboratorio.

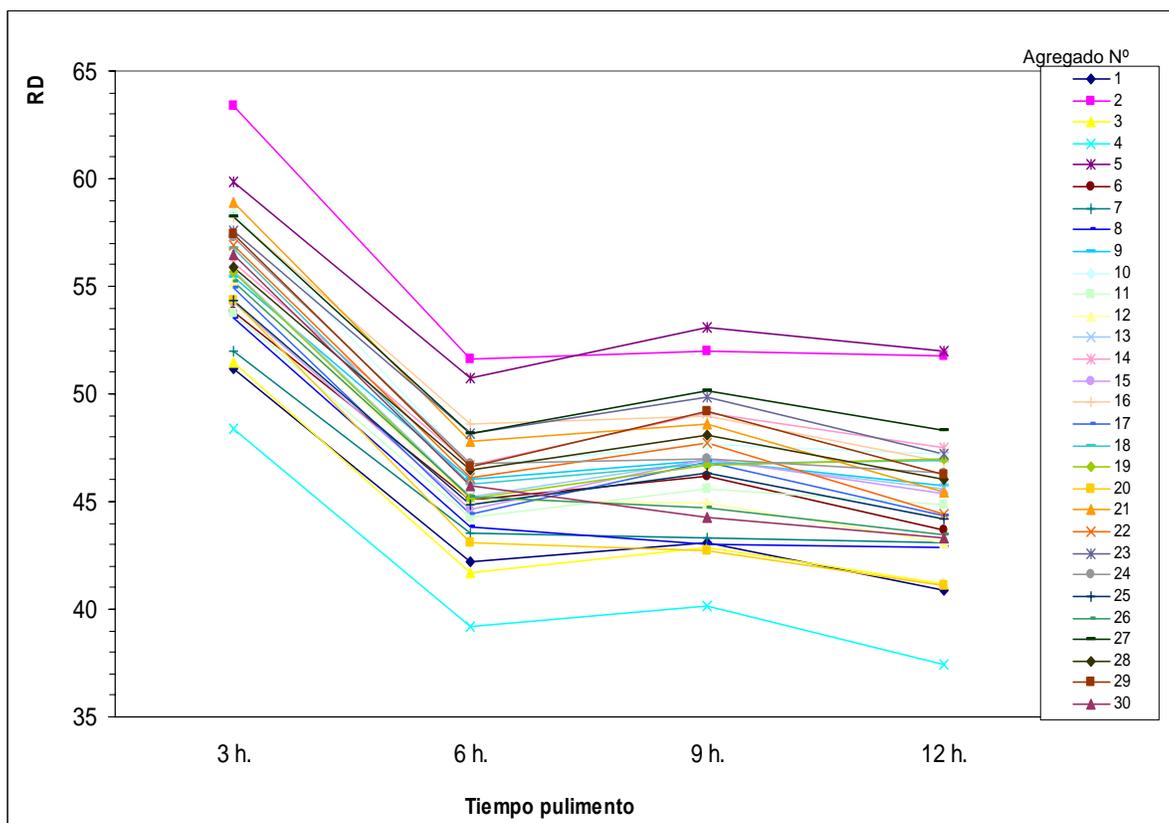


Figura V-11: Tendencia de pulimento de agregados a las 3, 6, 9 y 12 horas

Si bien existen oscilaciones de ganancia y pérdida de micro textura, el valor obtenido a las 6 horas de pulimento puede considerarse como representativo del valor terminal de RD de los agregados. Hasta el ciclo de 6 h. se ubicaría la zona de pérdida acelerada de textura y RD inicial de los agregados que puede asociarse a la fase de pulimento, para luego de este ciclo comenzar la fase de equilibrio de la resistencia al deslizamiento, es decir llegar al valor terminal de RD que puede ofrecer el agregado.

Entonces, se puede concluir que el ensayo de pulimento en su ciclo estándar de 6 h. es suficiente como para predecir el valor terminal de RD de los agregados Chilenos y es

capaz de representar el comportamiento de la RD de pavimentos en servicio (Fase de pulimento y Fase de equilibrio) propuesto por Diringer y Barros (1990).

En la Figura V-11 se observa también que existe una tendencia clara respecto de que agregados con una baja susceptibilidad al pulimento proporcionan una RD más alta para un mismo nivel de pulimento (o un mismo nivel tránsito desde el punto de vista del pavimento en servicio), dado que los agregados con mayor RD inicial terminan con RD final mas alta y viceversa.

V.6 Modelo de pulimento de los agregados en función del tiempo de ensayo

Se calibró un modelo de comportamiento de la RD del agregado en función del tiempo que es sometido a la acción del pulimento en laboratorio (ver Figura V-12).

El espacio de inferencia del modelo estuvo dado por el procedimiento de simulación del pulimento, por el agregado patrón usado para el ensayo y por la zona de procedencia y característica de los agregados considerados para este estudio.

Se evaluaron las especificaciones funcionales Logística, Weibull, Hoerl, Hoerl modificado y Exponencial con apoyo del programa Curve Expert 1.3. Se seleccionó el modelo de Weibull debido a que mantenía el patrón de comportamiento de la RD obtenido empíricamente y además resultó consistente con el fenómeno físico representado. Los otros modelos presentaban incongruencias al efectuar predicciones. El coeficiente de correlación R^2 ajustado resulto de 99,9%.

El modelo propuesto se describe mediante la Ecuación 9.

$$RD(t) = 71.7 + 26e^{-256.5t^{-5.7}} \quad (9)$$

El modelo no permite obtener el valor estimado de la RD para un árido particular, pero sí puede ser utilizado para describir el comportamiento agregado de todos los áridos estudiados a lo largo del país.

Para $t = 0$ el modelo propone una RD media inicial de 71.7. Si se calcula cuál sería la tasa de pérdida de RD entre las 0 h. y 3 h. basado en la media de RD obtenida en el experimento (55,7), resulta una pérdida de RD de 28% para las primeras 3 h. de ensaye. Valor que es consistente con los resultados obtenidos en otras investigaciones (Ahadi, 2008 y Liang, 2003) en el que la tasa de pérdida inicial varía en promedio entre 10% y 25%.

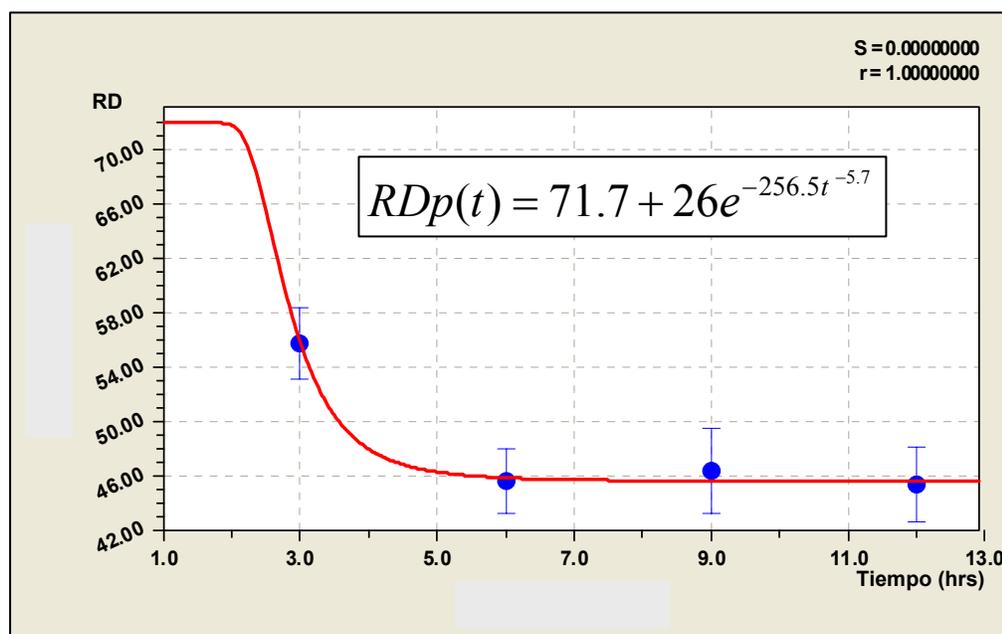


Figura V-12: Modelo de comportamiento del pulimento en laboratorio

Hay que destacar que este modelo de pulimento de los agregados, determinado a partir de resultados de laboratorio, tiene la misma expresión funcional que la del modelo de comportamiento de la RD calibrado por Echaveguren (2008) para un pavimento en servicio con un nivel de tránsito bajo, a partir de datos medidos en terreno. Sin embargo, este modelo debe ser validado con nuevos ensayos que consideren mediciones de RD a las 0 h., 1 h., 2h. y 3 h. de pulimento.

VI. INFLUENCIA DE LA PETROGRAFÍA EN EL PULIMENTO DE LOS AGREGADOS.

El análisis de la influencia de la petrografía se realizó utilizando el valor de PSV a las 6 horas de pulimento. Gráficamente se contrastó el PSV con el porcentaje de los constituyentes con más presencia dentro de los agregados Chilenos estudiados, como la Andesita, Basalto, Granito, Cuarzo y Plagioclasa. Del análisis gráfico se observan algunas tendencias preliminares de comportamiento, las que serán más adelante verificadas mediante análisis estadísticos:

- La Andesita parece ser el fragmento litológico que más influencia tiene sobre los resultados de pulimento. En la Figura VI-1 se observa que aquellos agregados con contenidos altos de esta roca presentan valores más altos de PSV y viceversa.
- En el grafico de la Figura VI-2, se ve que el Basalto no presenta una relación tan evidente como la Andesita.
- El Granito provocaría el efecto inverso de la Andesita. Aquellos agregados con altos contenidos de granito presentan mayor susceptibilidad al pulimento, obteniéndose valores bajos de PSV (Figura VI-5).
- El mineral de Cuarzo, generalmente desprendido de las rocas graníticas presentes en los agregados, y la Plagioclasa al parecer generarían la misma tendencia que aquellos agregados con alto porcentaje de granito (Figura VI-3).

Estas tendencias observadas coinciden con lo planteado en la literatura por algunos autores (Hosking,1992), los que han observado que rocas compuestas principalmente por Andesitas y Basaltos presentan valores de pulimento mayores que los que podrían obtenerse con rocas compuestas por Granitos.

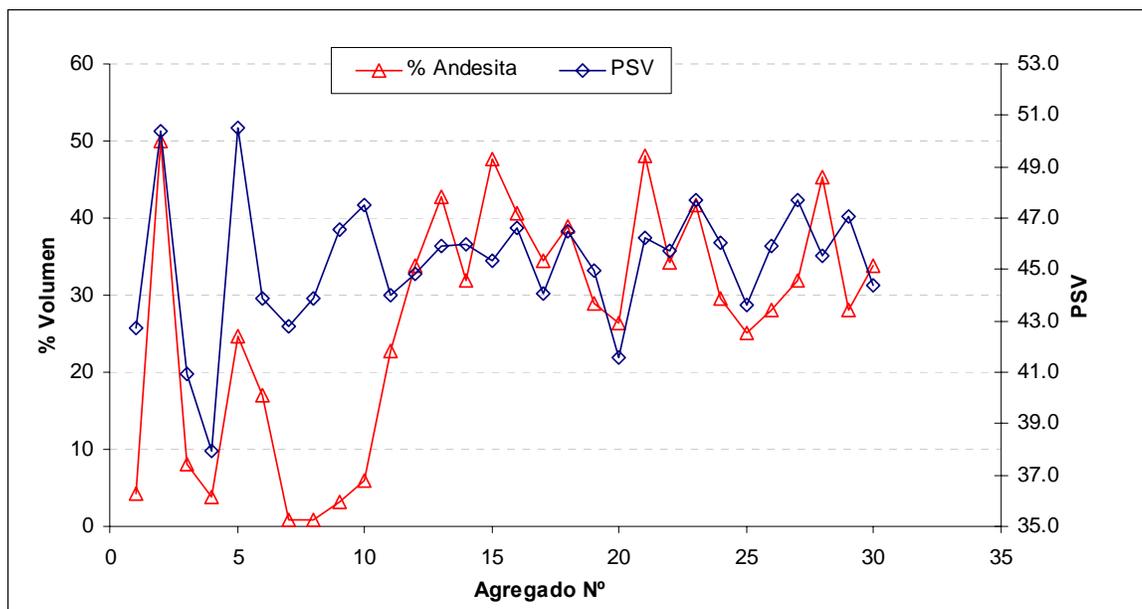


Figura VI-1: Tendencias de pulimento en función de la petrografía del agregado para Andesita.

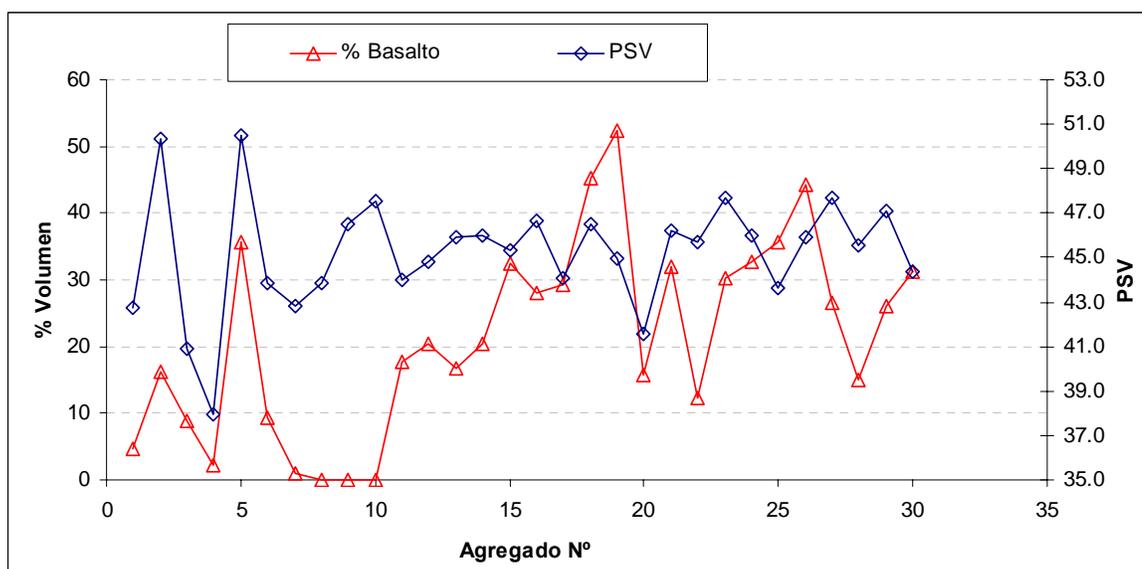


Figura VI-2: Tendencias de pulimento en función de la petrografía del agregado para Basalto.

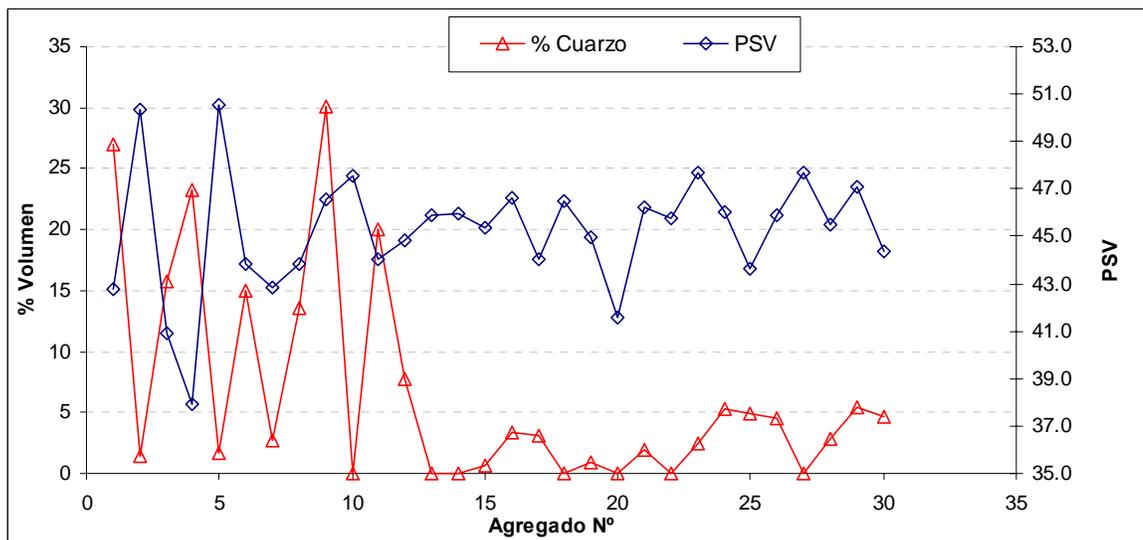


Figura VI-3: Tendencias de pulimento en función de la petrografía del agregado para Cuarzo.

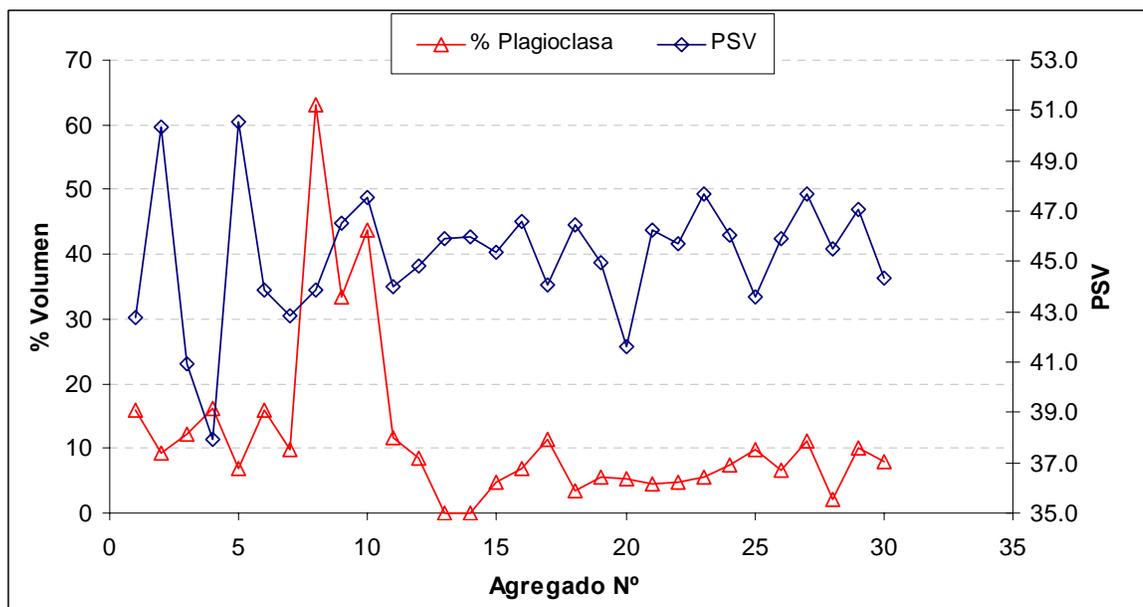


Figura VI-4: Tendencias de pulimento en función de la petrografía del agregado para Plagioclasa.

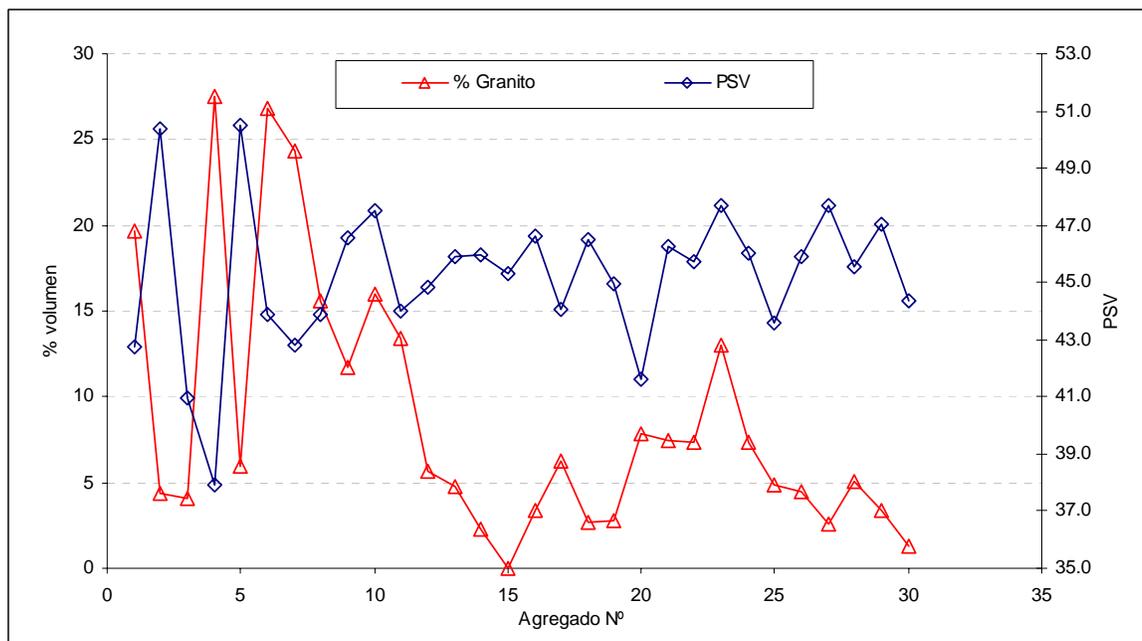


Figura VI-5: Tendencias de pulimento en función de la petrografía del agregado para Granito.

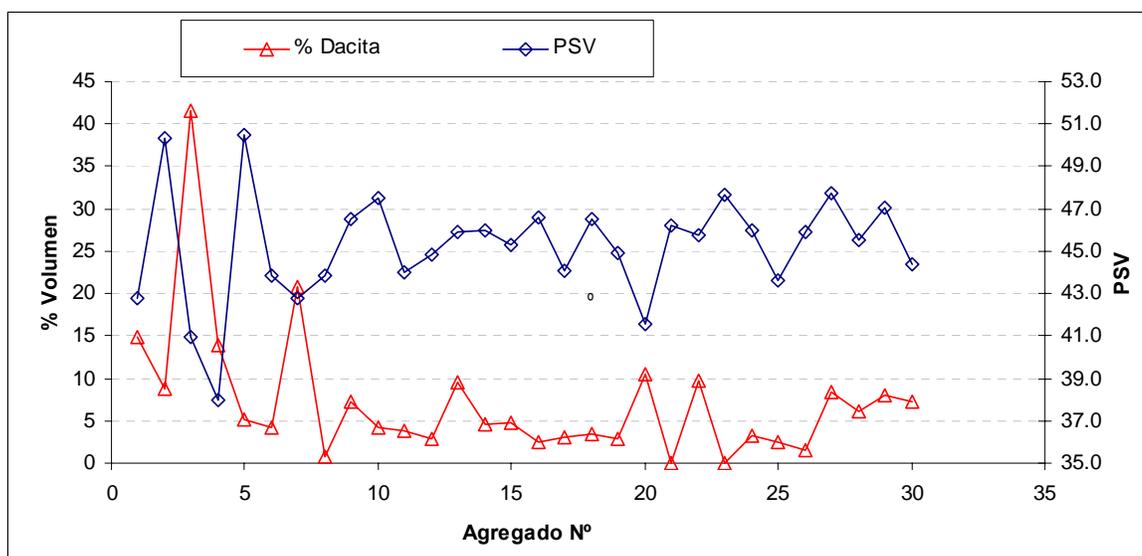


Figura VI-6: Tendencias de pulimento en función de la petrografía del agregado para Dacita.

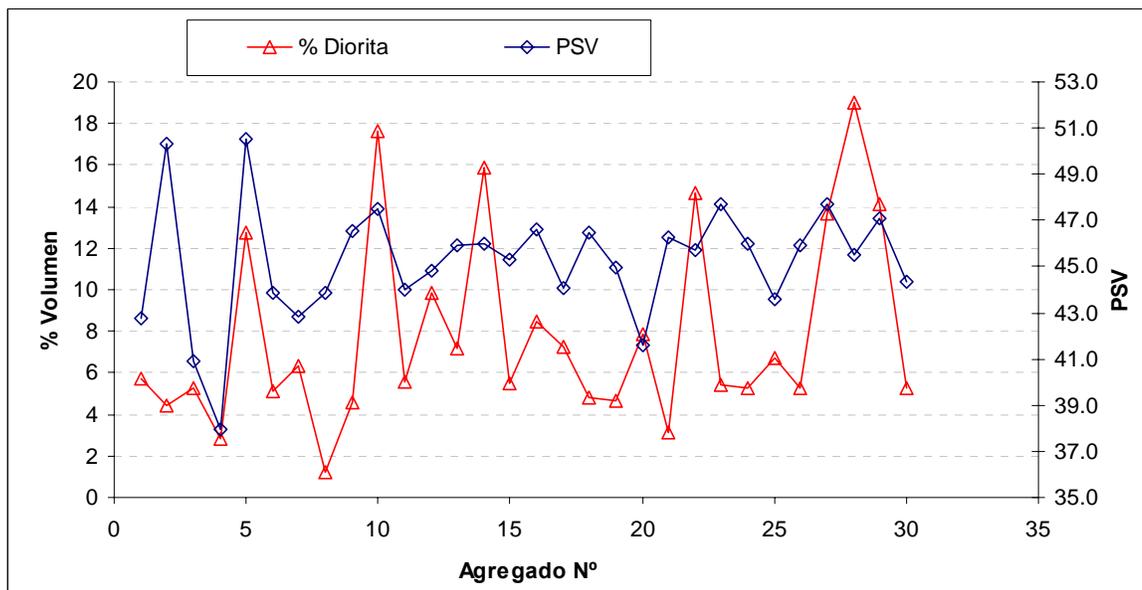


Figura VI-7: Tendencias de pulimento en función de la petrografía del agregado para Diorita.

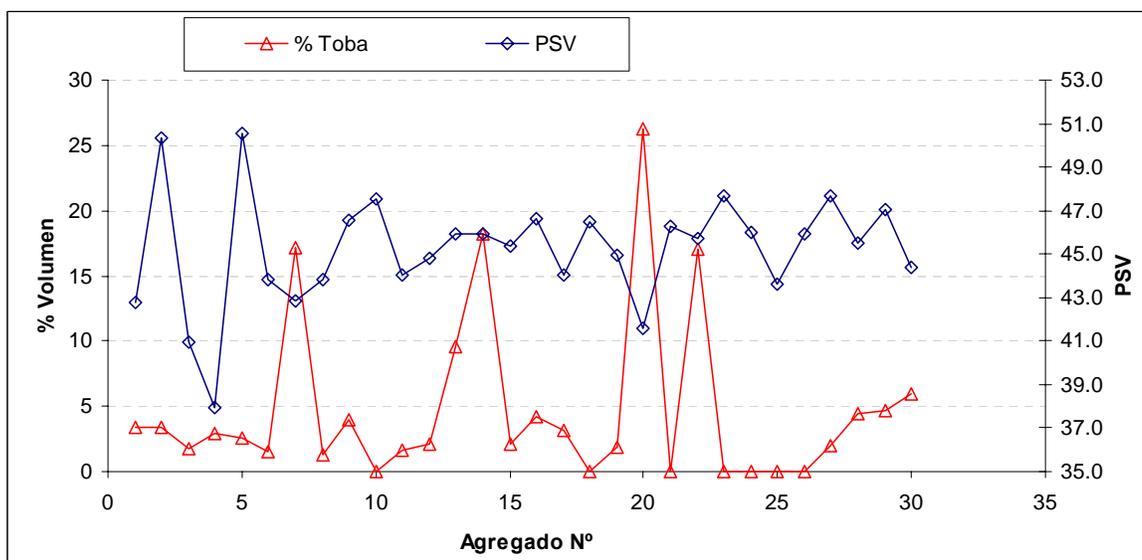


Figura VI-8: Tendencias de pulimento en función de la petrografía del agregado para Toba.

La Tabla VI.1 resume los resultados del análisis de varianza realizado para detectar la influencia de la petrografía en el PSV. En ella se puede ver que los componentes como Andesita, Basalto, Granito, Dacita, Diorita y Cuarzo poseen una influencia estadísticamente significativa sobre el valor de PSV.

Se aprecia también que la magnitud de la presencia del mineral o roca expresado como % en volumen también tiene un efecto sobre el valor de PSV. Por ejemplo, aún cuando se puede esperar valores altos de PSV con agregados que poseen Andesitas, Basalto o Diorita, si su presencia en volumen es inferior al 10 % el valor de PSV tiende a ser más bajo y por tanto el agregado posee una mayor susceptibilidad al pulimento.

Por otra parte, aquellos agregados con contenidos de Granito superiores al 20% en volumen, presentan mayor susceptibilidad al pulimento, obteniendo valores bajos de PSV. El mineral de Cuarzo, generalmente desprendido de las rocas graníticas presentes en los agregados, genera la misma tendencia que el Granito, pero con menor volumen presente de este mineral (10%).

Tabla VI.1: Análisis de varianza para detectar la influencia de la petrografía en el PSV

Mineralogía	P	$p < \alpha^*$	% Volumen	PSV esperado
Dacitas	0,000	Si	<10	46,3
			>10	41,2
Cuarzo	0,006	Si	<10	45,9
			>10	42,8
Andesitas	0,019	Si	<10	43,2
			>10	46,0
Dioritas	0,023	Si	<10	43,8
			>10	47,1
Granitos	0,025	Si	<20	45,5
			>20	41,5
Basaltos	0,035	Si	<10	43,3
			>10	46,1
Tobas	0,562	No	N/A	
Plagioclasas	0,184	No	N/A	
Lutitas	0,713	No	N/A	

* $\alpha = 0,05$. Nivel de significancia de la prueba. N/A= No aplicable

VI.1 Modelo de Pulimento en función de la petrografía de los agregados

Se calibró un modelo destinado a correlacionar directamente la composición petrográfica de los agregados y el valor de PSV. La Ecuación 10 muestra la especificación matemática seleccionada. En ella, α_i y β_i son constantes de calibración y FM_i representa la fracción de mineral o roca i , presente en el agregado.

$$\frac{1}{PSV} = \alpha_i \left\{ \sum_{i=1}^{13} \beta_i FM_i \right\} \quad (10)$$

La calibración arrojó un coeficiente de correlación de 0,99. La Tabla VI.2 muestra los valores de significancia estadística de los coeficientes. Se aprecia que todas las variables son significativas.

El valor-P en el análisis ANOVA para la regresión resultó menor a 0.05, por tanto existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95.0%.

De este modo, el modelo refuerza los resultados mostrados en la Tabla VI.1 y plantea explícitamente la relación entre PSV y petrografía.

Tabla VI.2: Relación de significancia de las constantes de calibración β del modelo PSV versus petrografía.

Fragmento Litológico	Valor $\beta/2,06 \times 10^{-4}$	Error Estándar	Estadístico t	Valor-p
Andesita	1,00	8.55E-06	24.0733	0
Arenisca	4,19	0.00012	6.69018	0
Basalto	1,14	8.41E-06	27.8653	0
Caliza	1.45	0.000112	2.65844	0.02
Cuarzo	0.95	1.131E-05	17.2996	0
Dacita	1,49	9.131E-06	33.8032	0
Diorita	0,35	2.229E-05	3.24683	0.007
Epidocita	2,68	0.000198	2.77795	0.018
Granito	1,39	1.343E-05	21.3521	0
Lutita	1,64	5.956E-05	5.67012	0
Piroxeno	1,78	0.0000504	7.28705	0
Plagioclasa	1,14	6.737E-06	34.8349	0
Toba	1,43	1.414E-05	20.7748	0

La ecuación del modelo es válida para las condiciones de borde indicadas en la tabla Tabla VI.3.

Tabla VI.3 Condiciones de borde para el modelo PSV versus petrografía.

Fragmento mineral o litológico	% Volumen
Andesita	0-50
Basalto	0-55
Granito	0-30
Dacita	0-40
Diorita	0-20
Tobas	0-25
Cuarzo	0-30
Plagioclasa	0-60
Lutita	0-5
Epidocita	0-2
Caliza	0-3
Arenisca	0-3
Piroxeno	0-6

a) *Validación del modelo.*

La validación consistió en comprobar que los valores de PSV obtenidos mediante la Ecuación 9 son estadísticamente iguales al valor observado en laboratorio. Para ello se utilizó un 20% de los agregados estudiados y se determinó su PSV. El gráfico mostrado en la Figura VI-9 de los valores predichos v/s observados muestra la buena correlación estadística del modelo.

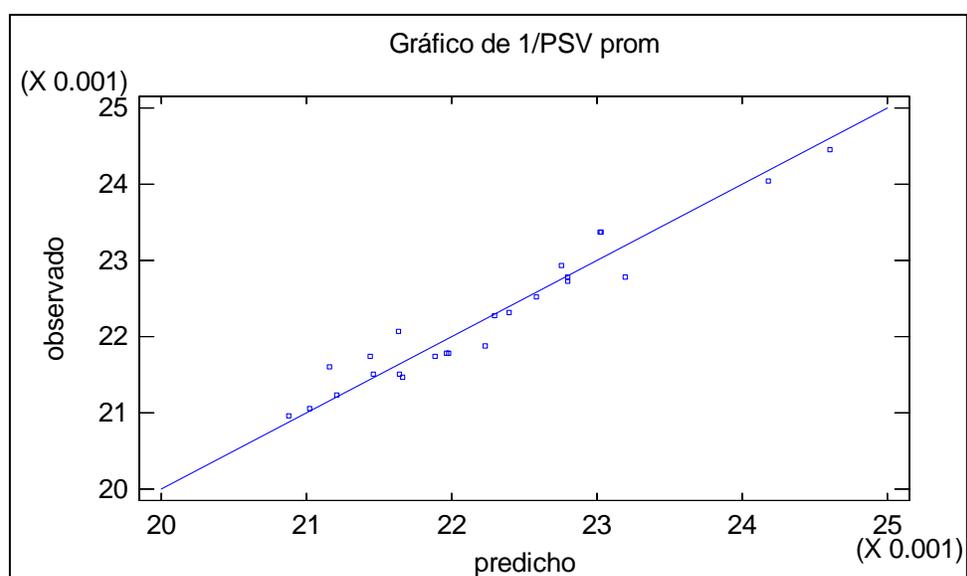


Figura VI-9: Grafico modelo observado v/s predicho

Para materializar la validación se realizó un “Test-t de muestras independientes” y un “Test-t de muestras pareadas” entre los valores predichos por la ecuación y los valores observados en laboratorio. Los resultados estadísticos de estas pruebas se muestran en la Tabla VI.4.

Tabla VI.4: Resultados Test-t para validación modelo PSV versus petrografía

Test- t para PSV	Muestras independientes	Muestras Pareadas
Intervalo de confianza	[44.2629, 49.3704]	[-5.233, 3.59967]
Valor – t	-0.375413	-0.475352
Valor –p	0.715193	0.654577

Los resultados del primer test-t (muestras independientes) indican que no hay diferencia significativa entre la media del PSV observado y la media del PSV predicho con la Ecuación 10 (valor-p muy superior a 0,05).

Los resultados del segundo test-t (pareado) indican que no hay diferencia significativa entre cada uno de los PSV predichos con el modelo y cada uno de los PSV observados en laboratorio (valor-p muy superior a 0,05).

Por tanto, el modelo determinado permite confirmar que, dentro del espacio de inferencia considerado, existe una relación significativa entre el PSV y la composición petrográfica de los agregados y que puede ser descrita mediante una ecuación.

Este modelo permite estimar a priori los valores del PSV de los agregados, pudiendo ser aplicado cuando se requiere valorar de manera general las características de los agregados de un empréstito particular.

VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

VII.1 Conclusiones

- Se comprobó que existe una relación entre el pulimento a las 6 horas y la petrografía de los agregados. La caracterización petrográfica mostró que la mayoría de los agregados Chilenos utilizados en construcción de pavimentos tienen una alta presencia de Andesitas, Basaltos y Plagioclasas (63.4% en volumen). Los análisis estadísticos mostraron que agregados con alto predominio de los componentes litológicos antes mencionados arrojan valores de PSV más altos, es decir, son menos susceptibles al pulimento. Se calibró un modelo simple con alta significancia estadística que permitió inferir un comportamiento general de los agregados a partir de su petrografía.
- Se comprobó que el valor de pulimento a las 6 horas determinado según la normativa BSI, es adecuado para caracterizar el valor de equilibrio de pulimento del agregado, toda vez que los resultados del ensayo extendido a 9 y 12 horas no arrojaron diferencias estadísticamente significativas entre ellos y el valor de pulimento a las 6 horas.
- Los resultados de pulimento a las 6 horas mostraron que los valores de PSV de los agregados chilenos oscilan entre 44 y 57. El 83% de los agregados estudiados cumplieron con el valor mínimo de PSV establecidos en la norma Británica.
- Se comprobó que no existe una relación estadísticamente significativa entre el origen de los agregados estudiados (pozo, cantera, fluvial) y el valor del PSV.
- Se implementó el ensaye de pulimento acelerado y se diseñó un procedimiento de control de calidad del ensaye, basado en la evaluación estadística de la repetibilidad y reproducibilidad de los equipos Péndulo Británico y Máquina de Pulimento Acelerado.

- Se definió una ecuación calibrada para Chile para calcular el PSV en función de los resultados obtenidos con el equipo local de la forma:

$$\text{PSV} = S + (46 - C)$$

- Se estableció un intervalo de control para el agregado patrón de origen Británico ensayado con el equipo local.

$$42,5 \leq \text{RD}_{\text{AP}} \leq 49,5$$

- Se propuso una ecuación para comparar el valor PSV determinado en Chile con los valores de cualquier especificación que utilice la metodología y el agregado patrón del Reino Unido.

$$\text{PSV}_c = \text{PSV} + 6,5$$

VII.2 Recomendaciones respecto del ensaye de pulimento

- La macro textura de las probetas, el acondicionamiento de los equipos (Pulimento Acelerado y Péndulo Británico), el control de la temperatura de ensaye, el control de la tasa de aplicación de los abrasivos y el seguimiento estricto de la metodología de ensayo son claves para asegurar una baja variabilidad de los resultados del ensayo de Pulimento Acelerado.
- Es recomendable que la normativa nacional deje establecido claramente el origen del agregado patrón a utilizar en el ensaye. Quedó demostrado que los rangos de verificación son propios de cada agregado y dependen además de la reproducibilidad del equipo utilizado.
- Se recomienda para los nuevos equipos de Pulimento Acelerado que se implementen en Chile, efectuar pruebas de repetibilidad como las descritas en este trabajo y pruebas de reproducibilidad entre equipos utilizando el agregado patrón ya validado en esta investigación.
- Se propone una normativa de ensayo que pueda ser estudiada por la Dirección de Validación para su incorporación en el Manual de Carreteras de Chile.

VII.3 Recomendaciones para aplicación de especificación de pulimento en Chile

- Mientras no se cuente con estudios que permitan modelar el comportamiento de los agregados a escala real, no es posible establecer especificaciones de pulimento. Sin embargo, dado que este parámetro tiene directa relación con el valor potencial de Resistencia al Deslizamiento que ofrece un pavimento en servicio y a que este trabajo proporciona una visión general respecto de los posibles valores de PSV que tienen los agregados del país, se recomienda una metodología para la aplicación paulatina de exigencias de PSV consistente en tres etapas como se muestra en la Figura VII-1.
- En la primera etapa se propone se especifique un mínimo PSV de 40 para todos los agregados utilizados en caminos nuevos, cuyo pavimento sea de tipo asfáltico. Se propone generar además, una base de datos que incluya al menos información sobre el tipo de superficie de rodado, ubicación y geometría del camino, PSV de los agregados, macrotextura y tránsito solicitante. También se recomienda efectuar estudios de pulimento sobre agregados artificiales que puedan ser utilizados en zonas de mayor demanda de fricción (paraderos, curvas, intersecciones, etc.)
- Para la segunda etapa se propone realizar estudios que permitan determinar relaciones entre el PSV de los agregados, tránsito solicitante y la Resistencia al Deslizamiento terminal de la superficie del pavimento. Con esto definir preliminarmente una nueva exigencia de PSV mínima para los áridos.
- Finalmente en una tercera etapa y en base a los resultados y conclusiones obtenidas de los estudios realizados durante la segunda etapa, definir exigencias mínimas de PSV en caminos nuevos según demanda de fricción y tránsito, sin perjuicio de los análisis económicos pertinentes.

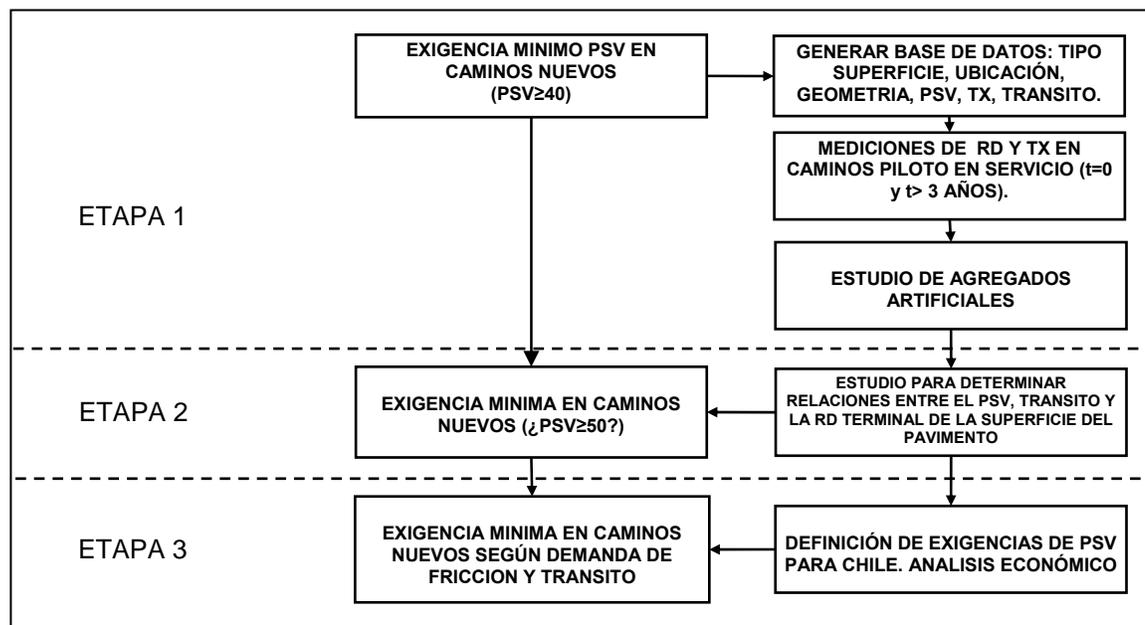


Figura VII-1 Recomendaciones para la aplicación de especificaciones de PSV en Chile

VII.4 Futuras líneas de investigación

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos y el espacio de inferencia utilizado, se proponen las siguientes líneas de investigación:

- Desarrollar un estudio para definir un agregado patrón de origen local, mediante la realización de ensayos paralelos con el potencial agregado patrón y el utilizado en este estudio. Determinar ecuaciones y rangos de validación propios del agregado. Paralelamente buscar materiales abrasivos de origen local.
- Realizar un estudio a largo plazo para evaluar el comportamiento de los agregados en el pavimento cuando es sometido a diferentes niveles de tránsito. Realizando mediciones periódicas de Resistencia al Deslizamiento con equipo ad hoc y determinando paralelamente el valor del Coeficiente de Pulimento Acelerado.

BIBLIOGRAFIA

Ahadi, M.R. (2008). *Development of an Alternative Test Procedure to “BS812” for Accelerated Polishing of RoadStones*, 2nd International Safer Roads Conference, UK.

ASTM E303-93(2003) *Standard Test Method for Measuring Surface Frictional Properties Using the British Pendulum Tester*. ASTM International. Estados Unidos.

Boscaino, G., Praticò F., Vaiana, R.: “*Time-Dependant Surface Properties of Asphalt Friction Courses: Earlier Experiments By a New Accelerated Test*”. 15th SIV Conference, Paper 69, Italy, 2005.

BRITISH STANDARD.(1989). *Testing Aggregates – Part 114: Method for determination of the polished –stone value*. BSI 812-114:1989, p. 8, British Standard Institute, 1989.

Cafiso, S.; Taormina, S. (2006) *Texture Analysis Of Aggregates For Wearing Courses In Asphalt Pavements*. International Journal Of Pavement Engineering. Pp 1-10.

COMISIÓN PERMANENTE DEL ASFALTO (2005). *Especificaciones Técnicas de Mezclas Asfálticas en Caliente de Bajo Espesor para carpeta de Rodamiento*. Versión 3, Argentina.

de Solminihac Et Al., (2005) *Investigación y Desarrollo de Procedimientos para la Medición y Control de la Fricción en Pavimentos en Chile*. Proyecto Fondef D03i-1042. Pontificia Universidad Católica De Chile.

de Solminihac Et Al., (2008) *Prototipo De Normativa De Evaluación De La Repetibilidad Y Reproducibilidad En Equipos De Medición De Resistencia Al Deslizamiento*. Tm-032-07b. Proyecto Fondef D03i-1042. Pontificia Universidad Católica De Chile.

Desing Manual Of Road And Bridges (2006) *Volume 7 Pavement Design And Maintenance*. Section 5 Surfacing And Surfacing Materials. Part 1

Desing Manual Of Road And Bridges (1999) *Volume 7 Pavement Design And Maintenance*. Section 5 Surfacing And Surfacing Materials. Part 3.

Desing Manual Of Road And Bridges (1999) *Volume 7 Pavement Design And Maintenance*. Section 3 Pavement Maintenance Assessment. Part 1

Echaveguren, T. (2008) *Modelación de la Resistencia al Deslizamiento en Pavimentos*. Tesis Doctoral, Pontificia Universidad Católica de Chile. Chile.

EN 1097-8 (1999) *Ensayos para Determinar las Propiedades Mecánicas y Físicas de los Áridos. Parte 8 Determinación del Coeficiente de Pulimento Acelerado*. Unión Europea.

Hosking, R. (1992) *Road Aggregates And Skidding*. State Of The Art Review/4. Transport Research Laboratory, U.K.

INV E-232 (2003) *Pulimento Acelerado de los Agregados*. Norma de ensayo. Colombia

Lees, G.(1978) Skid resistance of Bituminous and Concrete Surfacing. Chapter 6. Pell, P. (Ed.). *Developments in Highways Pavements Engineering* (pp 219- 285). 1st. Edition London.

Lédée, V.; Delanande, G.; Dupont, P.(2005) *Skid Resistance And Aggregates*. Bulletin Des Laboratoires Des Ponts Et Chaussées 255. Francia. Pp 91-116.

Liang, R.Y. (2003) *Blending Proportions Of High Skid And Low Skid Aggregate. Final Report*. Department Of Civil Engineering, University Of Akron., The Ohio Department Of Transportation And The U.S. Department Of Transportation, Federal Highway Administration. Estados Unidos.

Manual Carreteras (2003) *Especificaciones Técnicas Generales de Construcción*, Vol 5. Dirección de Vialidad, MOP Chile.

Manual Carreteras (2003) *Especificaciones y Métodos de Muestreo, Ensaye y Control*, Vol 8. Dirección de Vialidad, MOP Chile.

MASTRAD (2007), *Skid Tester Calibration Rig Operating Instruction S892*. Mastrad Limited. UK.

Montgomery , D., Runger., G. (2003). *Applied Statistics and Probability for Engineers*.1a. ed.). New York, EE.UU.: John Wiley and Sons.

MTRD (2002) *Improved Friction Based Intervention Criteria for Safety and Asset Management*. MTR Report N°135. Australia.

Pagola, M. (2002). *Características Antiderrapantes de las Calzadas Pavimentadas. Su Relación con las Propiedades Intrínsecas de los Áridos*. Tesina Maestría En Ingeniería Vial Universidad Nacional De Rosario Facultad De Ciencias Exactas Ingeniería Y Agrimensura Escuela De Postgrado Y Educación Continua. Argentina

Perry, M.J.; Woodside, A.R.; Woodward, W.D.H. (2001) *Observations On Aspects Of Skid-Resistance Of Greywacke Aggregate*. School Of The Built Environment, University Of Ulster, Newtownabbey, Co. Antrim. *Quarterly Journal Of Engineering Geology And Hidrogeology* , Uk. Pp 347-352.

Roe, P.G.; Hartshorne, S.A. (1998) *The Polished Stone Value Of Aggregates And In-Service Skidding Resistance*. Trl Report 322. Transport Research Laboratory. U.K.

TL Gestein – StB.(2004) *Tecnische Lieferbedingungen für Gesteinskornungen im Straßenbau*. Alemania.

TRANSIT N.Z. (2002) *Specifications for Skid Resistance Investigation and Treatment Selection*. TNZ T10. Nueva Zelanda.

UNE 146130: 2000 *Áridos Para Mezclas Bituminosas Y Tratamientos Superficiales De Carreteras, Aeropuertos Y Otras Áreas Pavimentadas*. Anexo D Sección 1, 2 Y 3.

WESSEX (2005), *Accelerated Polishing Machine Operating Instruction S882*. Wessex Engineering Ltd. UK.

Williams, H.; Turner, F.; Gilbert, Ch. (1968) *Petrografía*. Compañía Editorial Continental S.A. México.

Woodbridge, M.E.; Dunford, A.; Roe, P.G. (2006) *Wehner-Schulze Machine: First Uk Experiences With A New Tester For Polishing Resistance In Aggregates*. Project Report Ppr144. Transport Research Laboratory, U.K.

Woodward, W.D.H; Woodside, A.R And Jellie, J.H. (1998). *Higher Psv And Other Aggregate Properties*. Transport And Road Assessment Centre, University Of Ulster, Northern Ireland.

Woodward, W.D.H; Woodside, A.R And Jellie, J.H. (2004). *Improved Prediction Of Aggregate Skid Resistance Using Modified Psv Test*. In Sinha, K., Fwa, T.F., Cheu, R. Lee, D-H. (Eds), *Proceedings of 8th International Conference on Applications of Advanced Technologies in Transportation Engineering*. pp. 460 – 464, China.

XP P18-580 (1997) *Dètermination de la Rèsistance au Polissage Accèlerè des Gravillons. Mèthode par Projection*. Francia.

A N E X O S

ANEXO A: RESULTADOS ENSAYO PULIMENTO

A-1. Resumen resultados ensayo de pulimento ciclo estándar

Zona	Región	Agregado Nº	RD Péndulo Británico		PSV
			3 h.	6 h.	
Norte	XV	1	51.1	42.2	42.8
		2	63.4	51.6	50.4
	I	3	51.5	41.7	40.9
		4	48.4	39.2	37.9
		5	59.9	50.7	50.5
	II	6	53.8	45.1	43.9
		7	52.0	43.5	42.8
		8	53.5	43.9	43.9
		9	55.4	46.0	46.5
	III	10	58.5	46.7	47.5
Centro	IV	11	53.8	44.3	44.0
	V	12	55.3	45.0	44.8
		13	55.8	45.2	45.9
		14	56.1	46.7	46.0
	VI	15	54.3	44.6	45.3
		16	58.2	48.6	46.6
	RM	27	58.3	48.2	47.7
		28	55.9	46.5	45.5
		29	57.4	46.6	47.1
		30	56.5	45.8	44.4
VII	17	54.9	44.4	44.0	
Sur	VIII	18	56.7	45.8	46.5
		19	55.7	45.1	44.9
		20	54.3	43.1	41.6
	IX	21	58.9	47.8	46.3
		22	56.9	46.1	45.7
	X	23	57.6	48.1	47.7
		24	57.3	46.8	46.0
		25	54.4	44.8	43.6
26		55.2	45.2	45.9	
Gran Media			55.7	45.6	45.2
Máximo Absoluto			63.4	51.6	50.5
Mínimo Absoluto			48.4	39.2	37.9
Desv. estándar			2.9	2.5	2.6
Coef. de variación			0.05	0.05	0.06

A-2. Resultados ensayo de pulimento ciclo estándar

Origen	3				6			
	P1	P2	P3	P4	P1	P2	P3	P4
30	60.0	59.6	54.8	63.0	48.3	47.0	42.3	50.0
2	65.0	74.9	66.3	64.0	54.0	56.7	55.2	50.3
16	63.2	60.1	60.3	60.3	53.7	45.2	50.0	49.8
21	65.5	64.8	64.3	55.2	50.2	50.2	55.7	44.7
20	55.8	59.0	59.7	53.0	41.3	48.0	49.5	41.7
4	54.7	52.3	50.0	51.3	43.7	45.0	40.0	39.8
23	55.3	60.3	56.0	61.7	45.3	51.3	48.7	49.7
6	56.7	55.0	56.2	55.3	49.3	45.0	49.7	45.0
28	58.2	59.7	55.0	56.0	48.2	48.7	46.0	46.0
25	53.0	55.7	54.7	53.3	44.7	45.0	43.0	43.7
27	57.5	64.8	55.8	58.5	49.3	54.0	44.3	49.3
19	60.0	55.7	57.7	54.0	49.3	46.0	45.3	45.7
8	54.0	54.0	55.7	52.0	42.2	43.3	45.0	45.7
24	56.0	56.7	56.0	59.0	46.0	45.7	48.7	45.0
7	52.3	51.7	56.3	53.0	43.7	41.7	46.0	42.0
11	52.7	54.2	56.0	53.3	46.3	45.0	44.0	40.0
14	57.7	59.3	53.7	60.0	50.0	50.0	45.3	47.8
3	55.0	54.2	49.3	48.0	41.0	40.0	40.0	40.7
1	52.0	55.0	51.3	51.3	41.7	45.0	42.2	45.3
17	56.0	54.3	55.0	55.0	45.0	40.7	45.0	42.0
22	58.7	56.5	57.5	56.5	48.3	42.0	45.3	45.7
18	53.3	56.0	62.7	58.2	42.7	45.0	50.7	47.5
9	56.7	56.8	55.0	58.3	45.7	46.0	45.3	46.7
29	60.0	57.5	59.0	60.7	46.7	47.7	47.5	49.0
12	58.3	56.5	52.0	52.7	47.3	46.0	43.0	42.3
15	55.3	55.0	57.2	52.3	44.3	44.0	47.3	47.2
26	56.7	59.0	55.0	56.0	47.2	48.3	45.3	45.7
5	62.7	59.5	60.3	60.0	51.0	47.8	51.3	51.0
10	59.0	58.7	59.0	58.3	46.7	46.7	48.3	44.7
13	55.0	56.3	55.0	58.3	42.7	46.7	46.7	46.3
5	56.5	59.3	60.3	60.3	48.7	49.7	54.3	52.0
25	54.7	57.5	51.0	55.0	45.0	49.0	44.0	44.3
6	54.0	52.0	51.3	50.0	44.0	44.0	41.0	42.7
17	54.0	52.3	55.0	57.7	44.3	45.7	46.0	46.5
22	56.7	55.0	57.5	57.0	47.3	45.3	48.3	46.3
12	57.8	53.7	55.3	55.7	45.0	43.3	46.0	47.3
27	60.0	56.0	57.0	56.3	50.7	45.3	47.3	45.0
21	53.0	55.0	59.0	54.3	44.7	45.3	47.5	44.0
29	54.7	54.7	57.2	55.7	46.3	45.3	45.3	45.3
11	54.0	51.7	53.3	55.0	45.3	43.3	45.0	45.0
20	0.0	51.7	50.0	53.7	Pq	39.3	40.0	44.0
23	59.7	55.0	56.3	56.3	48.3	48.0	47.5	46.3

Origen	3				6			
	P1	P2	P3	P4	P1	P2	P3	P4
14	58.0	54.0	53.3	52.7	45.3	43.3	45.3	46.3
24	58.0	55.7	58.3	58.3	47.3	46.3	50.0	45.0
28	55.0	55.7	53.0	54.3	45.3	45.0	44.7	47.8
16	56.0	56.0	54.3	55.3	46.3	45.3	48.7	50.0
3	52.3	53.3	50.0	49.7	44.0	42.0	44.7	41.0
7	50.0	52.7	49.3	50.3	44.0	43.3	44.0	43.7
30	55.0	55.3	52.7	51.3	46.0	46.0	42.7	43.7
26	55.0	56.0	51.3	52.7	46.0	46.0	41.0	42.2
1	50.3	49.3	52.0	47.8	41.3	40.7	42.2	39.3
13	52.3	55.7	55.7	57.7	44.3	45.0	45.0	45.0
15	53.7	54.3	52.3	54.0	44.0	45.0	41.3	44.0
9	56.0	54.3	54.0	52.3	48.3	45.0	45.0	46.0
19	52.7	56.3	58.0	51.0	39.7	45.0	47.5	42.7
4	44.0	45.7	45.0	44.0	34.7	34.7	38.3	37.5
2	59.0	58.3	60.0	59.7	47.5	48.3	50.7	50.3
8	54.3	54.0	50.0	54.0	44.7	45.0	40.0	45.0
18	59.3	56.0	55.3	53.0	46.0	41.7	48.7	44.3
10	62.3	54.7	56.0	59.7	50.0	42.3	46.0	49.0

A-3. Resultados ensayo de pulimento ciclo extendido

Origen	3				6				9				12			
	P1	P2	P3	P4												
5	56.5	59.3	60.3	60.3	48.7	49.7	54.3	52.0	51.3	50.3	53.7	54.3	49.3	49.7	52.3	52.7
25	54.7	57.5	51.0	55.0	45.0	49.0	44.0	44.3	48.0	47.0	43.0	45.7	47.0	45.0	40.0	39.7
6	54.0	52.0	51.3	50.0	44.0	44.0	41.0	42.7	48.3	45.3	42.3	42.0	45.7	45.0	38.0	39.7
17	54.0	52.3	55.0	57.7	44.3	45.7	46.0	46.5	47.0	50.7	44.7	45.0	46.3	49.7	40.7	40.7
22	56.7	55.0	57.5	57.0	47.3	45.3	48.3	46.3	46.3	46.3	48.3	50.0	46.7	44.0	44.0	43.0
12	57.8	53.7	55.3	55.7	45.0	43.3	46.0	47.3	45.3	45.3	44.3	46.0	43.0	44.3	43.0	43.0
27	60.0	56.0	57.0	56.3	50.7	45.3	47.3	45.0	51.7	51.0	51.3	51.3	48.0	44.0	50.7	47.0
21	53.0	55.0	59.0	54.3	44.7	45.3	47.5	44.0	53.0	48.0	47.0	47.7	46.3	44.3	42.3	46.7
29	54.7	54.7	57.2	55.7	46.3	45.3	45.3	45.3	50.3	47.7	48.0	50.7	47.0	47.0	45.0	46.0
11	54.0	51.7	53.3	55.0	45.3	43.3	45.0	45.0	45.0	45.0	47.3	44.7	42.7	40.3	44.3	41.7
20	PQ	51.7	50.0	53.7	PQ	39.3	40.0	44.0	44.3	46.3	PQ	38.0	42.0	42.0	PQ	36.3
23	59.7	55.0	56.3	56.3	48.3	48.0	47.5	46.3	47.7	48.0	50.7	49.7	45.7	44.3	47.7	46.0
14	58.0	54.0	53.3	52.7	45.3	43.3	45.3	46.3	48.3	51.3	50.3	44.0	45.0	48.0	46.0	44.3
24	58.0	55.7	58.3	58.3	47.3	46.3	50.0	45.0	52.3	51.0	48.3	45.0	50.7	45.3	47.0	46.7
28	55.0	55.7	53.0	54.3	45.3	45.0	44.7	47.8	48.0	52.7	47.7	48.3	45.0	48.3	44.7	45.0
16	56.0	56.0	54.3	55.3	46.3	45.3	48.7	50.0	51.7	50.3	47.0	47.0	48.0	49.0	45.7	44.3
3	52.3	53.3	50.0	49.7	44.0	42.0	44.7	41.0	47.3	44.0	44.0	43.3	41.3	41.7	43.3	41.3
7	50.0	52.7	49.3	50.3	44.0	43.3	44.0	43.7	47.7	48.0	44.3	44.0	44.3	45.3	40.7	43.0
30	55.0	55.3	52.7	51.3	46.0	46.0	42.7	43.7	43.0	43.7	47.7	45.3	42.0	41.7	45.7	43.0
26	55.0	56.0	51.3	52.7	46.0	46.0	41.0	42.2	42.3	44.0	47.3	46.7	40.3	41.0	46.0	44.3
1	50.3	49.3	52.0	47.8	41.3	40.7	42.2	39.3	44.0	39.3	43.7	45.3	42.0	38.7	43.3	39.7
13	52.3	55.7	55.7	57.7	44.3	45.0	45.0	45.0	44.0	43.7	48.7	47.0	46.7	45.0	46.3	45.0
15	53.7	54.3	52.3	54.0	44.0	45.0	41.3	44.0	42.3	44.0	44.7	48.3	41.0	44.0	43.0	46.3
9	56.0	54.3	54.0	52.3	48.3	45.0	45.0	46.0	45.0	46.7	48.3	47.7	44.0	46.7	47.7	44.7
19	52.7	56.3	58.0	51.0	39.7	45.0	47.5	42.7	45.3	43.3	43.7	45.7	48.0	53.3	40.0	47.3
4	44.0	45.7	45.0	44.0	34.7	34.7	38.3	37.5	36.7	48.0	35.0	34.0	35.3	37.0	33.7	34.3
2	59.0	58.3	60.0	59.7	47.5	48.3	50.7	50.3	53.3	51.0	51.0	50.0	52.3	49.0	50.3	51.0
8	54.3	54.0	50.0	54.0	44.7	45.0	40.0	45.0	40.3	43.7	44.3	46.3	39.3	44.7	43.0	44.3
18	59.3	56.0	55.3	53.0	46.0	41.7	48.7	44.3	48.3	44.0	49.3	45.3	48.3	49.3	48.0	42.0
10	62.3	54.7	56.0	59.7	50.0	42.3	46.0	49.0	47.7	45.7	49.3	44.7	44.7	48.3	49.7	45.7

**ANEXO B: ESPECIFICACIONES DE PULIMENTO DEL REINO UNIDO
(HD 36_06 Part 1 V7 Section 5)**

Site category	Site description	IL	Minimum PSV required for given IL, traffic level and type of site									
			Traffic (cv/lane/day) at design life									
			0-250	251-500	501-750	751-1000	1001-2000	2001-3000	3001-4000	4001-5000	5001-6000	Over 6000
A1	Motorways where traffic is generally free-flowing on a relatively straight line	0.30	50	50	50	50	50	55	55	60	65	65
		0.35	50	50	50	50	50	60	60	60	65	65
A2	Motorways where some braking regularly occurs (eg. on 300m approach to an off-slip)	0.35	50	50	50	55	55	60	60	65	65	65
B1	Dual carriageways where traffic is generally free-flowing on a relatively straight line	0.3	50	50	50	50	50	55	55	60	65	65
		0.35	50	50	50	50	50	60	60	60	65	65
		0.4	50	50	50	55	60	65	65	65	65	68+
B2	Dual carriageways where some braking regularly occurs (eg. on 300m approach to an off-slip)	0.35	50	50	50	55	55	60	60	65	65	65
		0.4	55	60	60	65	65	68+	68+	68+	68+	68+
C	Single carriageways where traffic is generally free-flowing on a relatively straight line	0.35	50	50	50	55	55	60	60	65	65	65
		0.4	55	60	60	65	65	68+	68+	68+	68+	68+
		0.45	60	60	65	65	68+	68+	68+	68+	68+	68+
G1/G2	Gradients >5% longer than 50m as per HD 28	0.45	55	60	60	65	65	68+	68+	68+	68+	HFS
		0.5	60	68+	68+	HFS	HFS	HFS	HFS	HFS	HFS	HFS
		0.55	68+	HFS	HFS	HFS	HFS	HFS	HFS	HFS	HFS	HFS
K	Approaches to pedestrian crossings and other high risk situations	0.5	65	65	65	68+	68+	68+	HFS	HFS	HFS	HFS
		0.55	68+	68+	HFS	HFS	HFS	HFS	HFS	HFS	HFS	HFS
Q	Approaches to major and minor junctions on dual carriageways and single carriageways where frequent or sudden braking occurs but in a generally straight line.	0.45	60	65	65	68+	68+	68+	68+	68+	68+	HFS
		0.5	65	65	65	68+	68+	68+	HFS	HFS	HFS	HFS
		0.55	68+	68+	HFS	HFS	HFS	HFS	HFS	HFS	HFS	HFS
R	Roundabout circulation areas	0.45	50	55	60	60	65	65	68+	68+	HFS	HFS
		0.5	68+	68+	68+	HFS	HFS	HFS	HFS	HFS	HFS	HFS
S1/S2	Bends (radius <500m) on all types of road, including motorway link roads; other hazards that require combined braking and cornering	0.45	50	55	60	60	65	65	68+	68+	HFS	HFS
		0.5	68+	68+	68+	HFS	HFS	HFS	HFS	HFS	HFS	HFS
		0.55	HFS	HFS	HFS	HFS	HFS	HFS	HFS	HFS	HFS	HFS

Notes:

- Site categories are grouped according to their general character and traffic behaviour. The Investigatory Levels (IL) for specific categories of site are defined in HD 28 (DMRB 7.3.1). The IL to be used here must be that which has been allocated to the specific site on which the material is to be laid, as determined by following the procedures in HD 28.
- Motorway or dual carriageway slip roads may fit in a number of groups depending on their layout. For example, a free-flowing section close to the main line would be in Group 1 whereas the end of an off-slip approaching a give way line or the point at which a queue develops would be in Group 3. Some slip roads with gradients may be in Group 4. Use the most appropriate Group depending upon the Site Category from HD 28 that was used to determine the IL.
- Where '68+' material is listed in this Table, none of the three most recent results from consecutive PSV tests relating to the aggregate to be supplied must fall below 68. See paragraph 3.21.
- Throughout this Table, HFS means specialised high friction surfacing, incorporating calcined bauxite aggregate and conforming to Clause 924 of the Specification (MCHW 1) will be required. Where HFS is required on the approaches to a hazard, the minimum treatment length must be 50m. This may be extended where queuing traffic or sightlines indicate that 50m may not be sufficiently long.
- For site categories G1/G2, S1/S2 and R any PSV in the range given for each traffic level may be used for any IL and should be chosen on the basis of local experience of material performance. In the absence of this information, the values given for the appropriate IL and traffic level must be used.
- Where designers are knowledgeable or have other experience of particular site conditions, an alternative psv value can be specified.

ANEXO C: ACONDICIONAMIENTO DE EQUIPOS PARA ENSAYO DE PULIMENTO ACELERADO

C-1. Acondicionamiento inicial de ruedas de goma maciza

Se acondicionó las ruedas según lo indicado en la norma BSI 812 la Rueda de goma maciza para el ensayo. Un ejemplo se muestra en la tabla ..y en el grafico

Tablas Acondicionamiento Rueda de goma

Lectura N°	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Probeta 5	Probeta 6
1	50	53	51	53	55	50
2	50	51	50	52	54	50
3	50	51	51	51	52	50
4	49	50	50	50	52	49
5	49	50	49	51	51	49
Promedio	49.3	50.3	50.0	50.7	51.7	49.3

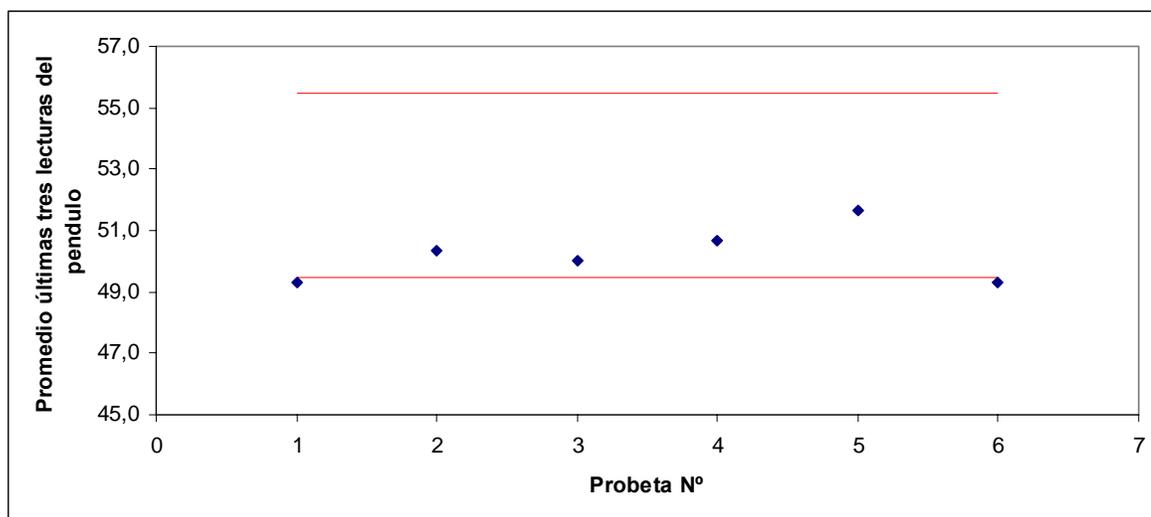


Figura D-1: Resultado de acondicionamiento rueda de goma maciza.

C-2. Acondicionamiento y verificación de Zapatas de goma equipo Péndulo Británico

- Se realizó el acondicionamiento de las zapatas nuevas siguiendo estrictamente el procedimiento indicado en la norma de ensayo BSI. El gráfico muestra un ejemplo de los resultados obtenidos.

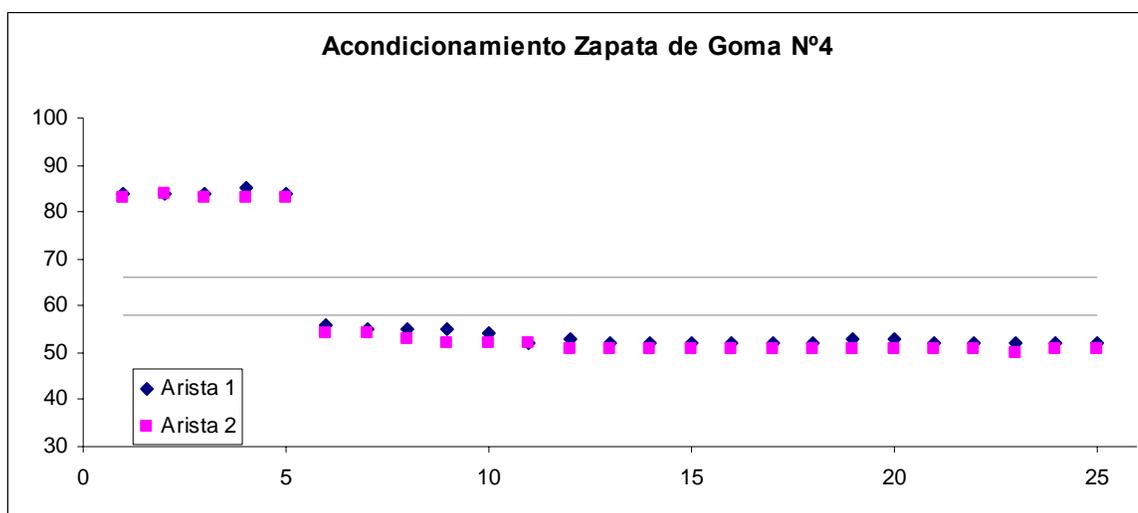


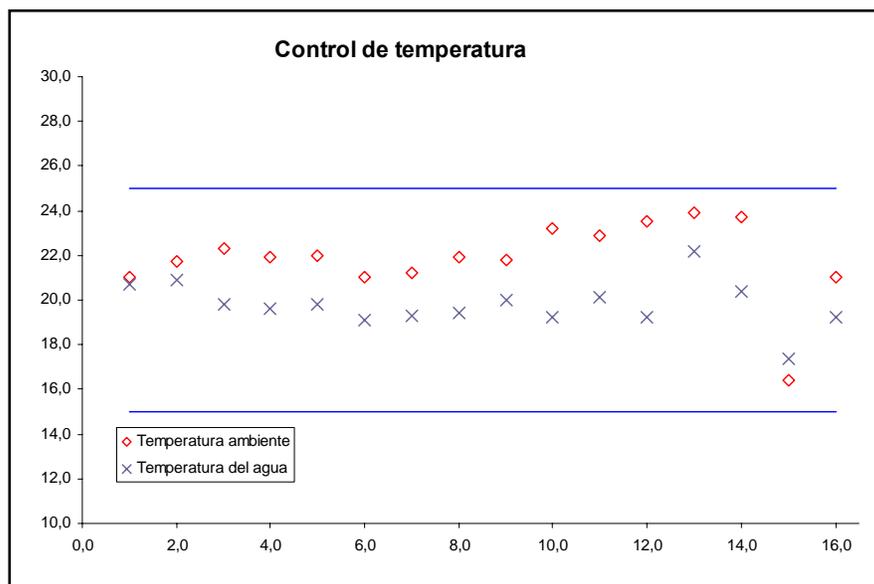
Grafico Ejemplo acondicionamiento zapatas de goma.

- Se realizó un análisis de varianza para determinar la influencia de la zapata de goma en los resultados de la lectura del Péndulo Británico. Según la prueba realizada se determinó con un 95% de nivel de confianza que la zapata utilizada afecta significativamente los resultados de RD determinado con péndulo. Por esta razón se utilizaron dos zapatas elegidas al azar para efectuar las lecturas durante el ensayo de pulimento. La tabla muestra el resultado del análisis mencionado.

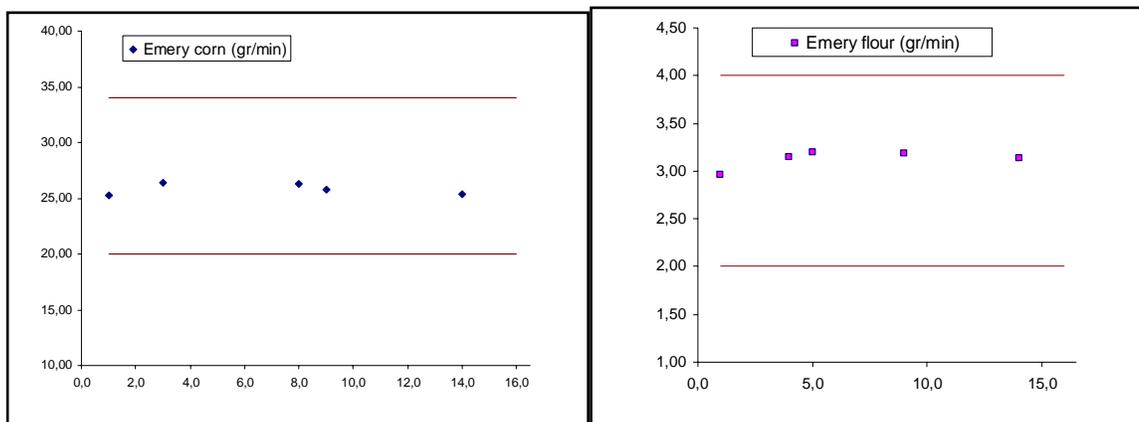
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Pendulos	30	4	7.4	13	0
B:Probeta	123	4	31	54	0
C:Zapata	121	2	60	107	0
INTERACCIONES					
AB	5.1	16	0.3	0.6	0.88
AC	12	8	1.5	2.6	0
BC	56	8	7	12	0

ANEXO D: PRUEBAS DE VERIFICACION DE LA VARIABILIDAD DEL ENSAYO DE PULIMENTO ACELERADO

D-1. Control de temperatura ambiente: Todos los valores dentro de los rangos especificados por la norma de ensaye. Se probó la influencia de la temperatura en los resultados de pulimento, ensayando a 15°C y a 25°C sin efecto significativo sobre él.



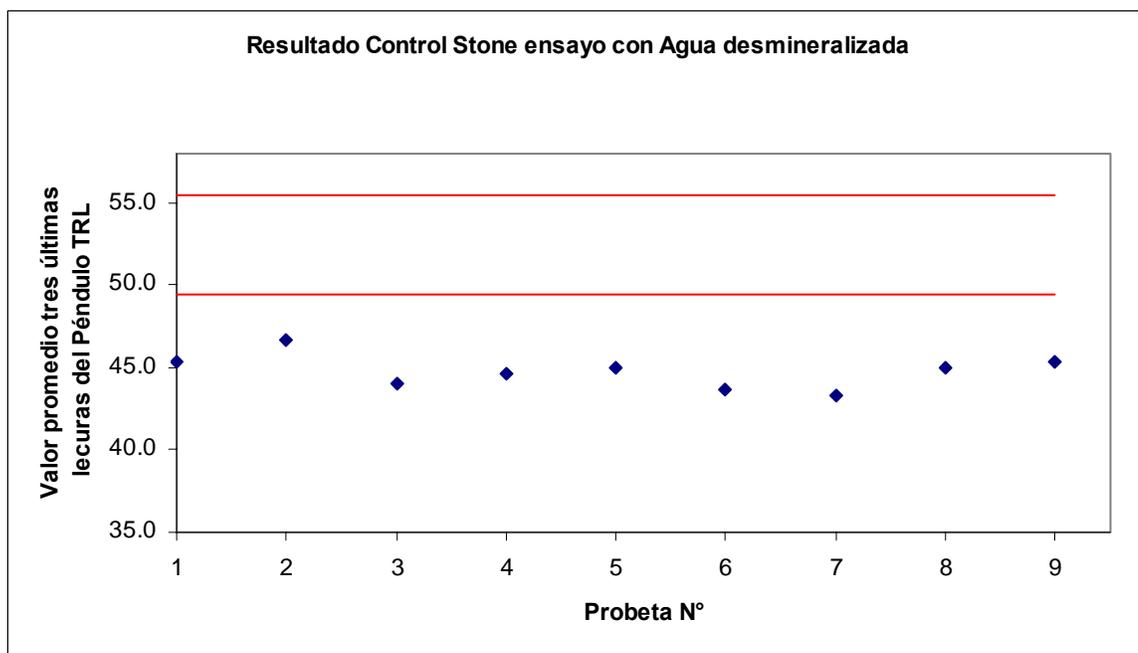
D-2. Control tasa de abrasivos: Todos los valores dentro de los rangos especificados por la norma de ensaye para el abrasivo grueso y fino.



D-3. Ensayo en Laboratorio IMAE de la Universidad de Rosario-Argentina: Se ensayaron probetas de agregado patrón inglés confeccionadas en Chile y en Argentina, obteniendo los mismos resultados que los obtenidos con el equipo Chileno. Se evaluó la influencia de la zapata de goma del Péndulo Británico. Se probaron zapatas nuevas y usadas sobre las mismas probetas, sin obtener diferencias significativas. Se compararon las zapatas utilizadas en Chile de origen Británico y las utilizadas en Argentina de origen local, no obteniendo diferencias significativas en los resultados.

Probeta	IMAE					LNV (min-max)			
	3 hrs		6 hrs		CPA	3 hrs		6 hrs	
Probeta LNV	58	59	40	43	46	55	59	44	49
Probeta IMAE	59	59	42	42	46				
Nº4	53	54	36	38	41	44	46	34	39
Nº2	63	63	48	47	52	58	60	47,5	50
Patrón IMAE	54	53	36	36	40	N/A			

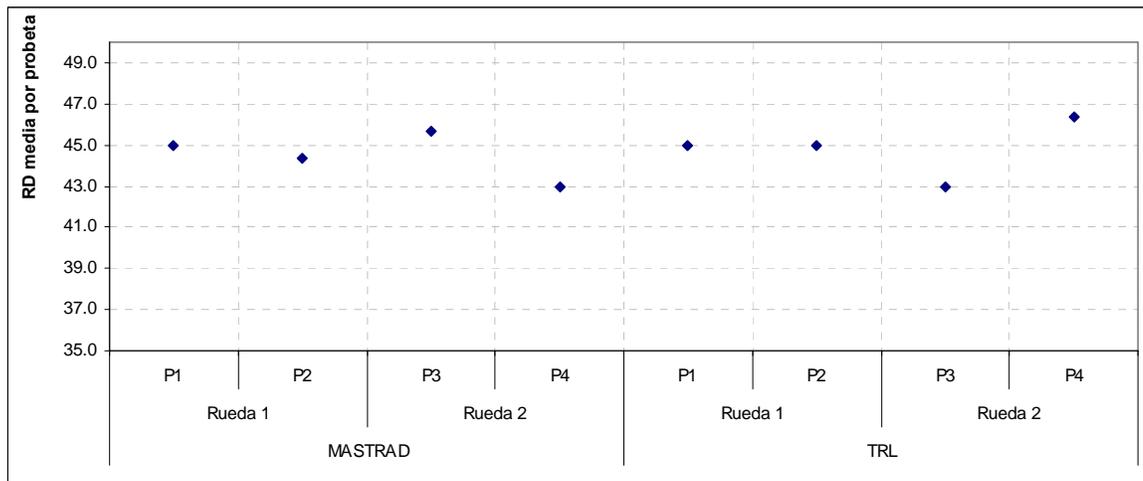
Probeta Nº	Zapata IMAE						Zapata LNV						R
	1	2	3	4	5	media	1	2	3	4	5	media	
1	72	72	72	72	72	72	72	72	73	73	72	72	0
2	72	73	73	73	73	73	71	71	72	71	72	71	1
3	48	49	50	50	50	49	48	49	50	50	50	49	0
4	49	48	48	48	48	48	48	49	50	50	50	49	-1
5	66	67	67	67	68	67	66	65	66	66	66	66	1
6	65	67	67	67	67	67	64	64	65	65	65	65	2
7	64	65	66	67	65	65	63	64	64	64	65	64	1
8	64	65	65	64	64	64	64	65	64	64	65	64	0



D-5. Influencia del Operador en el ensayo: Diferentes operadores confeccionaron probetas de AP, las que se ensayaron en un mismo ciclo de pulimento, no obteniendo diferencias significativas en los resultados.

D-6. Verificación del Agregado patrón: Se solicitó directamente al Transport Research Laboratory del Reino Unido una muestra de AP para poder verificar que el agregado utilizado en esta investigación efectivamente era el patrón inglés. Se confeccionaron probetas con ambos agregados y se ensayaron en un mismo ciclo de pulimento. Se obtuvo una diferencia media de 0,3 unidades PSV, no resultando significativa. Todos los resultados se muestran en la tabla...

Agregado patrón	MASTRAD				TRL			
Probeta	Rueda 1		Rueda 2		Rueda 1		Rueda 2	
Zapata	P1	P2	P3	P4	P1	P2	P3	P4
1	46	45	48	44	46	46	46	49
2	45	44	47	44	46	45	44	48
3	45	45	47	43	45	45	43	47
4	45	44	45	43	45	45	43	46
5	45	44	45	43	45	45	43	46
Media por probeta	45.0	44.3	45.7	43.0	45.0	45.0	43.0	46.3
Media por rueda	45.0		44.6		44.3		44.7	
DStd rueda	0.5		1.9		0.0		2.4	
Diferencia entre muestras	0.7		-0.1					



ANEXO E: RESULTADO DE ENCUESTA PARA LA SELECCIÓN DE EMPRESTITOS

Región	Ubicación	Origen	Camino	Tipo Pavimento
I	Angel Rojas Km 16	Cantera	R-1 Rotonda Chipana	BG-TSD-CA
I	Sector Gallinazo	Cantera	Conservación Global	BG-TSD-CA
I	Km;20 Ruta A-865	Pozo Guatacondo	Hilarico-Pampa Soledad	BG-TSD-CA
I	Ruta 5 a 7,3 m al oriente del Km 1765.6	San Jorge	Hilarico-Pampa Soledad-Escalerilla	BG-TSD-CA
II	R-24 a 1400m al sur Km 12,160	Vecchiola	Obra de Emergencia Prov. Tocopilla	CA
II	R-B-710 a 1400 oeste del Km57000	Vecchiola	Mejoramiento R-710-B70 Paposo-Varilla II etapa	Cape Seal
II	R5 Km 1341 a 4.5KM poniente	Vecchiola	Mejoramiento Av.Salvador Allende II etapa	Hormigón
II	R-25 a 3000m Este del Km 104500	Esco Ltd.	Mejoramiento R-25 Circunvalación Calama	CA
II	Pozo San Jorge R-5 a 7300m norte km 1675	San Jorge	Obra de Emergencia Antofagasta	CA
II	R-26 a 900m norte Km8.600	Pavimentos Norte	Mejoramiento costanera Norte II etapa	CA
II	R-25 a 4200m Oriente Km. 4.000	Leandro Sembler	(C.P.)R-25 Calama - Alto la Sierra Gorda	CA
II	Planta Camino Roca Roja Km:5500	Petreatos	Mejoramiento Av.Salvador Allende II etapa	Hormigón
III	Cantera (Ruta 5 Norte km 804 lado izquierdo faja)	Cardones	R-5	CA-TSD

III	Cantera	El Buitron	Sin información	Hormigón
IV	Río Elqui (Ruta 41-Ch a 14 km de la Serena)	B.Algarrobito	R-5N.Cruce 4 Esquinas/cruce Videla Coquimbo	CA
V	Río Maipú	Sta.Gloria Asfalcura	R-l-80-G Sector Rapel- Litueche	CA
V	Río Aconcagua	Planta hanus	Av. Directa Camino San José	Sello
V	Río Ligua	Tricam la Ligua	Global Camino Petorca	Sello
VI	Est. Zamorano	Tafca	Global Ruta-H-66	CA
VI	Río Cachapoal	Bitumix Gultro	C.P Cam. Y Com. De Rengo, Coico y Olivar	CA
VI	Estero Antivero	Tafca	Mej.R-151 Roma-Polonia KM:0.0-7.5	CA
VII	Río Maule	Planta Bitumix "Talca"	Ruta 5 Sur km 262.	CA
VIII	Río Bio Bio. Camino Los Angeles-Coihue-Renaico.	Coihue	Global Anillo Sur	CA
VIII	Río Ñuble. Camino Chillán-Nueva Aldea-Tomé, km28.	Islamih	Anillo Nueva Aldea	CA
VIII	Río Ñuble. Camino Chillán-Nueva Aldea-Tomé, km27	Cosmito	Chacras Buenas	CA
VIII	Río Bio Bio	Bio-Bio	Global Anima VI Etapa	Hormigón
VIII	Río Carampangue	Redregel	Global Anima VI Etapa	Hormigón
VIII	Río Ñuble	Boldar	Anillo Nueva Aldea	CA

VIII	Pozo los Ángeles	Los Ángeles	Global Anima VI Etapa	Hormigón
IX	Río Cautín	Chacarero	Imperial Carahue	CA
IX	Río Cautín. Camino viejo Temuco-Cajón km2.	Sierra Nevada	Los Guindos 2 Etapa	TSD
IX	Río Cautín	Becker	Chol-Chol	TSD
IX	Pozo Vásquez , Provincia Malleco	Sin información	sin información	NA
X	Río Rahue	Donw Ling	Puente Pirmaiquen	CA
X	Pozo la Vara	Pétreos	Mejoramiento Pto.de Puerto Montt Av. Parque Industrial	Hormigón
X	Pto. San Antonio	San Felipe	Mej. R-V843 y S/R R-V-85 Puerto	CA
X	Pozo Recondo	Recondo	Mej. R-V615 - V-605 Cruce R-5 Colonial Alerce	CA
X	Río Rahue	Peters	Bahía Mansa	
RM	Río Clarillo	Bitumix Pte.Alto	Santiago - El Volcán	CA
RM	Río Maipú	Sta.Gloria Asfalcura	Cuesta Lo Prado	CA
RM	Cantera Cuenca de santiago	Bitumix Puente Verde	Planta asfáltica. Caminos de la zona norte de la RM	CA
RM	Cantera	La Farge	Mejoramiento Camino Naltahua 0,000-1700	TSD

**ANEXO F: RESULTADOS ENSAYOS DE CARACTERIZACION MECANICA
DE LOS AGREGADOS**

F-1 Desgaste de los Ángeles:

Región	Agregado N°	Origen	Planta	DLA (%)
XV	1	Km 20 R-A865	Pozo Guatacondo	15.9
I	2	Cantera	Angel Rojas Km 16	16.2
	3	Cantera	Sector Gallinazo	19.2
	4	Km 7300m A Oriente	San Jorge	19.5
	5	R-B710 a 1400m	Vecchiola	20.4
II	6	R-240 a 1400m	Vecchiola	20.2
	8	R-5 Km 1341	Vecchiola	26.4
	9	Pozo San Jorge	San Jorge	18.6
III	10	Cantera	Cardones	25.6
IV	11	Río Elquí	Bitumix .Algarrobito	16.0
V	12	Río Maipú	Asfalcura	12.0
	13	Río Ligua	Hanus	16.7
	14	Río Aconcagua	Tricam La Ligua	13.8
VI	15	Río Cachapoal	Bitumix Gultro	12.1
	16	Estero Zamorano	Tafca	14.5
VII	17	Río Maule	Bitumix Talca	11.7
VIII	18	Río Bio Bio	Coihue	13.9
	19	Río Ñuble	Islamin	13.9
	20	Río Ñuble	Cosmito	15.8
IX	21	Río Cautín	Chacarero	17.1
	22	Río Cautín	Sierra Nevada	19.6
X	23	Pozo Recondo	Recondo	23.5
	24	Pto. San Antonio	San Felipe	16.0
	25	Pozo la Vara	Petreos	17.9
	26	Río Rahue	Donw Ling	16.7
RM	27	Río Clarillo	Bitumix Puente Alto	13.8
	28	Río Maipú	Santa Gloria (Asfalcura)	12.0
	29	Cantera Cuenca Stgo.	Puente Verde	13.9
	30	Cantera Lo espejo	Lafarge	14.9
			Media	16.8
			Desviación estándar	3.85
			Mínimo	11.7
			Máximo	26.4

F-2 Ensayo de Trituración

Corte	Ret	Rm	Asfalto	Hormigon
40-20	0		0	0
20-10	23	23	1.000	0
2,5-1,25	16		0.485	0.479
1,25-0,63	17	33	0.515	0.521

Región	Origen N°	Origen	Planta	Itp Gruesos 20-10	Itp Finos		Asfalto		Hormigón
					2,5-1,25	1,25-0,630	Max 20%	Max 4%	Max 4%
					$IT_t(\%) = \sum IT_{pi} \times \frac{ni}{100}$		$IT_t(\%) = \sum IT_{pi} \times \frac{ni}{100}$		$IT_t(\%) = \sum IT_{pi} \times \frac{ni}{100}$
						ITt Gruesos (%)	ITt Finos (%)	ITt Finos (%)	
XV	1	Km 20 R-A865	Pozo Guatacondo	0	0.65	0.4	0	0.52	0.52
I	2	Cantera	Angel Rojas Km 16	0	2.4	1.3	0	1.83	1.83
	3	Cantera	Sector Gallinazo	0	1.3	1	0	1.15	1.14
	4	Km 7300m Oriente	San Jorge	24.8	1.1	0.5	24.8	0.79	0.79
II	5	R-B710 a 1400m	Vecchiola	15.2	1.9	1.55	15.2	1.72	1.72
	6	R-240 a 1400m	Vecchiola	12	0.95	0.65	12	0.80	0.79
	7	R-25 a 3000	Esco LTDA.	15.3	1.8	2.2	15.3	2.01	2.01
	8	R-5 Km 1341	Vecchiola	20.4	1.2	0.35	20.4	0.76	0.76
III	9	Pozo San Jorge	San Jorge	11.3	1	0.6	11.3	0.79	0.79
III	10	Cantera	Cardones	16.3	1.9	1.4	16.3	1.64	1.64
IV	11	Rio Elqui	Bitumix Algarrobito	12.3	2.05	1.55	12.3	1.79	1.79
V	12	Rio Maipo	Asfalcura	9.3	2.2	1.65	9.3	1.92	1.91
VI	15	Rio Cachapoal	Bitumix Gultro	11.7	1.05	0.7	11.7	0.87	0.87
	16	Estero Zamorano	Tafca	10.75	2.2	1.35	10.75	1.76	1.76
VII	17	Rio Maule	Bitumix Talca	8.4	1.45	1	8.4	1.22	1.22

VIII	18	Rio Bio Bio	Coihue	10.2	2.85	2.2	10.2	2.52	2.51
	19	Rio Ñuble	Islamin	11.2	3	2.2	11.2	2.59	2.58
Región	Origen N°	Origen	Planta	20-10	2,5-1,25	1,25-0,630	ITt Gruesos (%)	ITt Finos (%)	ITt Finos (%)
IX	21	Rio Cautin	Chacarero	13.6	2.6	1.5	13.6	2.03	2.03
X	23	Pozo Recondo	Recondo	15.4	3.3	2.1	15.4	2.68	2.68
	24	Pto. San Antonio	San Felipe	9	2.05	1.1	9	1.56	1.56
	25	Pozo la Vara	Petreos	10.4	1.9	1.2	10.4	1.54	1.54
	26	Rio Rahue	Donw Ling	10.8	1.2	1.2	10.8	1.20	1.20
RM	27	Río Clarillo	Bitumix Puente Alto	10.7	2.6	2.15	10.7	2.37	2.37
	28	Río Maipú	Santa Gloria	8.4	1.1	0.85	8.4	0.97	0.97
	29	Cantera	Puente Verde	10.9	1.2	1.3	10.9	1.25	1.25
	Promedio							11.13	1.53
Max							24.80	2.68	2.68
Min							8.40	0.52	0.52
Desv. Est.							3.99	0.63	0.63

F.2 Ensayo de Desintegración por el Método de los Sulfatos

Región	Agregado N°	Origen	Planta	3/8-N°4	Asfalto					Hormigón	
					N°8-N°4	N°16-N°8	N°30-N°16	N°50-N°30	P(%) Finos	P(%) Finos	
XV	1	Km 20 R-A865	Pozo Guatacondo	89.3	93.4	96.8	97.4	94.6	1.9	3.5	
I	2	Cantera	Angel Rojas Km 16	0.0	83.6	92.2	95.2	94.8	4.0	6.0	
	3	Cantera	Sector Gallinazo	0.0	94.0	96.3	97.7	97.8	1.6	2.6	
	4	Km 7300m Oriente	San Jorge	90.6	93.1	96.6	97.7	96.7	1.8	3.0	
	5	R-B710 a 1400m	Vecchiola	85.9	95.2	97.8	97.6	96.9	1.3	2.6	
II	6	R-240 a 1400m	Vecchiola	93.5	91.9	97.1	97.5	96.7	2.0	2.9	
	7	R-25 a 3000	Esco LTDA.	95.9	90.7	96.8	96.5	93.8	2.4	3.9	
	8	R-5 Km 1341	Vecchiola	90.2	98.1	99.1	99.2	98.1	0.6	1.3	
	9	Pozo San Jorge	San Jorge	97.9	96.3	98.4	98.2	97.8	1.0	1.7	
III	10	Cantera	Cardones	88.6	93.9	96.4	95.8	96.7	1.8	3.5	
IV	11	Rio Elqui	Bitumix .Algarrobito	94.9	93.9	98.2	97.1	96.6	1.6	2.6	
V	12	Rio Maipo	Asfalcura	81.6	88.2	99.8	98.0	95.4	2.4	3.1	
VI	15	Rio Cachapoal	Bitumix Gultro	89.7	89.1	95.5	94.5	95.8	2.9	4.6	
	16	Estero Zamorano	Tafca	88.3	85.2	92.7	96.4	95.3	3.6	5.2	
VII	17	Rio Maule	Bitumix Talca	94.1	98.5	97.4	97.5	96.6	0.9	2.3	
VIII	18	Rio Bio Bio	Coihue	88.4	94.1	97.4	95.8	96.7	1.7	3.2	
	19	Rio Ñuble	Islamin	88.6	92.0	96.7	97.3	96.5	2.0	3.2	
IX	21	Rio Cautin	Chacarero	93.2	97.1	96.7	96.4	97.4	1.2	2.7	
X	23	Pozo Recondo	Recondo	95.9	94.2	95.9	96.1	96.9	1.8	3.2	
	24	Pto. San Antonio	San Felipe	98.7	97.2	96.6	95.1	97.1	1.3	2.9	

	25	Pozo la Vara	Petreatos	96.7	90.2	95.5	93.1	96.1	2.8	4.5	
	26	Río Rahue	Donw Ling	97.8	95.3	97.6	95.4	95.5	1.6	3.2	
RM	27	Río Clarillo	Bitumix Puente Alto	72.8	83.3	94.0	94.8	94.3	4.0	6.1	
	28	Río Maipú	Santa Gloria (Asfalcura)	94.8	93.2	96.1	97.7	96.5	1.8	3.0	
				Asfalto						Hormigón	
	Agregado N°	Origen	Planta	3/8-N°4	N°8-N°4	N°16-N°8	N°30-N°16	N°50-N°30	P(%) Finos	P(%) Finos	
	29	Cantera Cuenca Stgo.	Puente Verde	87.5	90.6	91.4	95.4	97.0	2.8	4.9	
	30	Cantera Lo espejo	Lafarge	92.4	90.2	96.7	96.9	96.9	2.3	3.3	
									Promedio	2.84	3.42
								Ds	4.26	1.18	
								maximo	4.0	6.1	
								minimo	0.6	1.3	

Asfalto**ppr**

Tamices		% Pasa	% Pasa VALOR MEDIO	% Ret acum VALOR MEDIO	% Ret parc VALOR MEDIO
mm	ASTM				
25	1	100	100	0	0
20	3/4	100	100	0	0
12.5	1/2	80-95	88	13	13
10	3/8	70-85	78	23	10
5	Nº 4	43-58	51	50	27
2.5	Nº 8	28-42	35	65	16
1.25	Nº 16	interpolando	27	73	8
0.63	Nº 30	13-24	19	82	9
0.08	Nº 200	4-8	6	94	3

Hormigón

Tamices		% Pasa	% Pasa VALOR MEDIO	% Ret acum VALOR MEDIO	% Ret parc VALOR MEDIO
mm	ASTM				
10	3/8	100	100	0	0
5	Nº 4	95-100	98	3	3
2.5	Nº 8	80-100	90	10	8
1.25	Nº 16	50-85	68	33	23
0.63	Nº 30	25-60	43	58	25
0.315	Nº 50	10-30	20	80	23
0.16	Nº 100	2-10	6	94	14

ANEXO G: PROPUESTA DE NORMA DE ENSAYO DE PULIMENTO

METODO PARA DETERMINAR EL COEFICIENTE DE PULIMENTO ACELERADO (PSV) DE LOS AGREGADOS

1. Alcances y Campo de Aplicación

1.1 Este método establece el procedimiento de laboratorio para determinar el Coeficiente de Pulimento Acelerado (PSV) de los agregados, mediante la Máquina de Pulimento Acelerado con ayuda del Péndulo Británico.

1.2 Es aplicable a agregados de densidad neta entre 2.000 y 3.000 kg/m³.

1.3 Este método es una adaptación de la Norma UNE-EN1097(1999) y BSI812-114:1989.

2. Terminología

2.1 Coeficiente de Pulimento Acelerado (PSV). El Coeficiente de Pulimento Acelerado representa el valor de la Resistencia al Deslizamiento última que ofrece un agregado cuando es sometido a la acción del pulimento del tránsito en un período de tiempo dado, simulado en laboratorio con la Máquina de Pulimento Acelerado (MPA) mediante la carga de una rueda de goma y una mezcla de agua y abrasivos.

3. APARATOS

3.1 Máquina de Pulimento Acelerado

La máquina para el ensayo de pulimento de los agregados, representada en la Figura N°1, deberá montarse bien nivelada sobre una base rígida de hormigón. Tendrá las características que se indican a continuación.

a) Un mecanismo denominado "rueda de ensayo", de 45 mm de ancho y 406 mm de diámetro, sobre cuya periferia lisa se podrán fijar 14 probetas, como se indica en el numeral 7.2, con el fin de componer una superficie continua de rodadura, formada por las partículas de agregado de cada probeta.

b) Un sistema para hacer girar la rueda de ensayo alrededor de su eje a una velocidad de 320 ± 5 rpm.

c) Dos ruedas de goma maciza de 200 ± 3 mm de diámetro exterior y 38 ± 2 mm de ancho, montadas sobre llantas de dos diferentes colores. La llanta de color oscuro será usada

durante el ciclo de abrasivo grueso y la llanta de color claro será usada durante el ciclo de abrasivo fino. Deberán tener una dureza de 69 ± 3 IRHD. Las ruedas de goma maciza pueden obtener del fabricante de la máquina de pulimento.

d) Un mecanismo formado por un brazo de palanca alineado con la rueda de ensayo, que lleva en su parte central una de las ruedas de goma maciza montada en un eje paralelo al de la "rueda de ensayo", y en su extremo, una pesa. Este dispositivo permite que la superficie de las ruedas de goma maciza apoyen sobre las probetas de agregados de la "rueda de ensayo" con una fuerza total de 725 ± 10 N. Estas ruedas tienen la posibilidad de girar libremente sobre sus propios ejes, y giraran en un mismo plano

e) La máquina debe estar correctamente alineada y ambas ruedas deben girar libremente sin juego en sus ejes. El paralelismo de los planos de rotación de las dos ruedas en movimiento no podrán desviarse en más de $0,33^\circ$ (1 mm en 200 mm). La separación de los planos de rotación, medida entre los centros de las ruedas en movimiento, no deberá ser superior a 0,8 mm.

f) Un mecanismo para la alimentación continua del abrasivo grueso y agua en las cantidades especificadas. El abrasivo y el agua deberán alimentarse directamente sobre la rueda de ensayo, en las proximidades del punto de contacto con la rueda de goma maciza.

g) Un mecanismo para la alimentación continua del abrasivo fino y agua en las cantidades especificadas. El abrasivo y el agua deberán alimentarse directamente sobre la rueda de ensayo, en las proximidades del punto de contacto con la rueda de goma maciza.

h) mecanismo para suspender el brazo de palanca donde va colocada la pesa y evitar que la rueda de goma maciza este sometida a carga.

3.2 Péndulo Británico.

a) El Péndulo Británico será el aparato utilizado para efectuar la medida de resistencia al deslizamiento de las probetas de agregados que son sometidas al pulimento en laboratorio (ver Figura N°2). Sus características están contenidas en la Sección 8.602.24 del Manual de Carreteras Volumen 8. El péndulo deberá ser calibrado una vez al año siguiendo la metodología descrita en la norma EN1097-8:1999 Anexo D.

b) Una escala auxiliar en unidades F (F=medida de la resistencia al deslizamiento sobre probetas) será utilizada en las medidas de fricción sobre la superficie curva de las probetas de ensayo y en una longitud de deslizamiento de 76 ± 1 mm.

c) Las zapatas de goma a emplear serán de $31,75 \pm 0,5$ mm de longitud, $25,4 \pm 1,0$ mm de ancho y $6,35 \pm 0,35$ mm de espesor. La masa del conjunto, zapata y placa de soporte de aluminio, será de 20 ± 5 g, el cual va montado en el extremo del brazo del péndulo.

Cuando el borde posterior de la zapata está en contacto con la superficie a ensayar, el plano zapata con la horizontal origina un ángulo de aproximadamente $263\pm^{\circ}$.

Las aristas de las zapatas presentaran bordes rectos bien definidos, la goma no debe presentar contaminación por aceite, abrasivos, etc. Cuando la arista presente una zona rozada superior a 2,5 mm se debe cambiar de arista o bien de zapata si han sido empleadas ambas aristas.

Las zapatas se almacenaran en la oscuridad y a una temperatura de $20 \pm 5^{\circ}\text{C}$.

d) Un dispositivo para medir con Péndulo Británico cuando las probetas no se desmontan de la rueda de ensayo. Corresponde a un dispositivo para fijar la rueda de ensayo de la máquina de pulimento acelerado, coincidente con la probeta curva a medir, de tal forma que su eje horizontal quede alineado con el plano de desplazamiento del péndulo, y en su posición centrada respecto de la zapata de goma y del eje de suspensión de aquel.

e) Un dispositivo para medir con Péndulo Británico cuando las probetas se desmontan de la rueda de ensayo. Corresponde a un dispositivo para sujetar la probeta curva rígidamente, una vez desmontada de la rueda de ensayo, con su dimensión mayor en el sentido del plano de deslizamiento del péndulo, y centrada respecto de la zapata de goma y del eje de suspensión de aquél.

3.3 Moldes para la preparación de las probetas.

Los moldes metálicos empleados para la fabricación de las probetas serán del tipo que se indica en la Figura x, y consistirán en segmentos circulares de la rueda de ensayo con dimensiones de 90,6 mm de longitud, 44,5 mm de ancho y 13,0 mm de altura.

3.4 Tamices.

Tamices de las siguientes aberturas: 10 mm, 0,600 mm, 0,500 mm, 0,425 mm, 0,355 mm, 0,300 mm y 0,050 mm.

4. MATERIALES

4.1 Materiales abrasivos.

a) Abrasivo grueso: Arena silíceo dura y limpia o esmeril granulado, Se deberá emplear sólo una vez. Con granulometría especificada en tabla 4.1

Tabla 4.1 Requisitos granulométricos para el abrasivo fino.

Tamiz (mm)	% pasa
0,600	98-100
0,500	70-100
0,425	30-90
0,355	0-30
0,300	0-5

b) Abrasivo fino: Polvo de esmeril fino separado por corriente de aire o por lavado con agua. Todas las partículas deben pasar por tamiz de 0,050 mm.

Nota 1: Si no se dispone de certificado del fabricante o proveedor que acredite la conformidad de los materiales, se deberá comprobar la distribución granulométrica de ambos abrasivos.

4.2 Agregado patrón del coeficiente de Pulimento Acelerado (PSV)

Agregado de fuente reconocida, con un Coeficiente de Pulimento Acelerado PSV medio comprendido entre 40 y 50.

Nota 2: Hasta el momento la única fuente reconocida de agregado patrón es un depósito de árido de dolerita de cuarzo controlado por el Transport Research Laboratory (TRL) del Reino Unido.

Nota 3: El valor de PSV medio fue determinado a partir de un experimento controlado realizado con equipo de pulimento local.

Nota 4: Se podrá emplear una fuente alternativa siempre que se haya determinado en un experimento controlado, utilizando el agregado patrón del Reino Unido como referencia.

4.3 Agregado de referencia del Péndulo Británico

Agregado de fuente reconocida con un PSV medio comprendido entre 50 y 60.

Nota 5: Hasta el momento la única fuente reconocida de agregado patrón es un depósito de árido de basalto de olivita controlado por el Transport Research Laboratory (TRL) del Reino Unido.

Nota 6: El valor de PSV medio fue determinado a partir de un experimento controlado realizado con equipo de pulimento local.

Nota 7: Se podrá emplear una fuente alternativa siempre que se haya determinado en un experimento controlado, utilizando el agregado del Reino Unido como referencia.

4.4 Materiales para la fabricación de las probetas de ensayo.

a) Arena fina silíceas para el relleno de los intersticios entre las partículas del agregado que forme cada probeta, cuya totalidad pase por el tamiz de 160 μm .

b) Resina y endurecedor. La resina puede ser de tipo poliéster o epóxica.

c) Desmoldante para superficies metálicas

- d) Alambre de acero ordinario de aproximadamente 1.2 mm de diámetro, para armar las probetas.
- e) Hojas de plástico flexible y transparente, de acetato o polietileno de tamaño levemente superior al del molde.
- f) Cubierta metálica rígida con una cara plana y la otra curvada con un radio de 189 ± 5 mm. Ligeramente más anchas que el molde de fabricación de las probetas.
- g) Recipiente desechable para la mezcla de resina y endurecedor.
- h) Moldes mecanizados con precisión para la preparación de las probetas
- i) Material auxiliar. Pulverizador, espátulas, cepillo fino, cepillo cerdas duras, etc.

5. PREPARACION DE LAS MUESTRAS

5.1 Agregado para el ensayo.

Se reduce la muestra por cuarteo según Método 8.202.2 hasta obtener una cantidad mínima de 2 kg. El agregado a ensayar deberá ser gravilla limpia de polvo por lavado y secada en horno a una temperatura de $100\pm 5^{\circ}\text{C}$, con tamaño comprendido entre los tamices de 10 mm y 6,3 mm (3/8" y 1/4"). Se deberán eliminar todas las partículas aplanadas y alargadas.

Nota 8: El agregado a ensayar deberá ser una muestra representativa del material producido en planta de producción, ya que las gravillas que se trituran en el laboratorio pueden dar resultados erróneos. La textura superficial de las partículas que se sometan a la acción de pulimento en laboratorio, debe ser representativa de la textura superficial media del agregado a ensayar. Las partículas de aspecto diferente deberán distribuirse aleatoriamente entre las probetas a confeccionar para el agregado.

5.2 Agregado patrón de ensayo.

Con el método especificado en 5.1 se obtiene una masa mínima de 1 kg de agregado patrón para PSV.

6. PREPARACION DE LAS PROBETAS

6.1 Preparación de los moldes.

Se recubren ligeramente las superficies internas expuestas y los bordes superiores de los moldes de metal con el agente desmoldante, empleando cepillos de pelo fino.

6.2 Preparación del mortero con resina.

El mortero con resina se preparará mezclando en las proporciones adecuadas el endurecedor y la resina, utilizando como recipiente un vaso plástico desechable y homogeneizando manualmente la mezcla mediante su agitación con una espátula de tipo cuchillo. Por las características de estos productos, la mezcla deberá efectuarse en un tiempo límite que permita la manejabilidad necesaria para poder preparar la probeta antes de iniciarse el endurecimiento de la misma.

La proporción exacta de los componentes depende del tipo de resina utilizada. Se podrá añadir filler a la resina para hacerla menos fluida si es necesario.

Se recomienda efectuar pruebas con diferentes tipos de resina para encontrar los productos y proporciones más adecuadas para su empleo en la fabricación de probetas de ensayo.

6.3 Preparación de las probetas.

Se comenzará la preparación de las probetas disponiendo en el fondo del molde una capa constituida por 40 a 60 partículas del agregado a ensayar, del tamaño especificado en el numeral 5.1, situadas una al lado de la otra y tan cerca como sea posible, de manera que cubran el área del molde. La Figura N°3 muestra un ejemplo de la textura que debe tener la superficie de agregados de la probeta.

Las partículas de agregado se colocarán cuidadosamente una a una, escogiendo la cara más adecuada para que la superficie a pulimentar sea lo más plana posible, no debiendo presentar en ningún caso aristas cortantes respecto a la superficie de la rueda de goma maciza.

Una vez completado el fondo del molde con la capa de partículas del agregado así dispuestas, se rellenarán los intersticios que queden entre las partículas con la arena fina, hasta la mitad de la profundidad del agregado para que el mortero de agarre no fluya a la superficie. Se nivelan con un cepillo fino y soplando ligeramente, sin alterar la disposición de las partículas de árido.

A continuación se rellena el molde con el mortero de resina hasta que desborde, se coloca sobre la resina la hoja de papel de plástico flexible y se presiona el molde con la cubierta de metal rígida. A continuación se quita el exceso de resina con la espátula y se deja el molde con la cubierta hasta que la resina comience a endurecer para evitar deformaciones de la superficie de la probeta.

Las probetas así preparadas se mantendrán en sus moldes durante el tiempo necesario para su fraguado, al final del cual serán desmoldadas cuidadosamente. Las probetas podrán ser utilizadas en el ensayo una vez que haya terminado el período de endurecimiento de la resina. Se retira el árido fino suelto con un cepillo.

El agente desmoldante que se impregne en las partículas de agregado debe eliminarse por lavado con agua y jabón. Toda probeta que presente aflorando en su superficie mortero de resina o partículas de agregado movidas deberá ser descartada.

Se fabricarán cuatro probetas por cada tipo de agregado a ensayar. Las probetas fabricadas tendrán un espesor uniforme y mínimo de 12,5 mm; la superficie de asiento será un arco de círculo del mismo diámetro de la periferia de la rueda de ensayo (ver Figura N°4).

7. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO

7.1 Acondicionamiento de la rueda de goma maciza

Cuando se trate de una rueda de goma maciza nueva, deberá ser preparada antes de ser empleada en un ensayo, haciéndola girar durante 3 horas bajo un régimen de abrasivo fino y agua, y otras 3 horas bajo un régimen de abrasivo grueso y agua, en la misma forma que se especifica para el ensayo normal en el numeral 7.5, utilizando para este proceso 12 probetas de relleno y 2 probetas de agregado patrón no pulimentadas.

Una vez terminado el ciclo de pulimento, se someten las probetas de agregado patrón a medición de la Resistencia al Deslizamiento con Péndulo Británico, de acuerdo a lo indicado en el numeral 7.6. El coeficiente determinado debe estar comprendido en el intervalote valores especificados de PSV para la piedra patrón empleada.

Si la medida del PSV está fuera del intervalo especificado, se deberán hacer nuevas pruebas de preparación utilizando nuevas probetas fabricadas con agregado patrón.

7.2 Acondicionamiento de las zapatas de goma.

Se deberá confeccionar probetas con el agregado de referencia indicado en el numeral 4.3 cuyo PSV medio esté comprendido entre 50 y 60. Estas probetas se obtienen y pulen como si se tratase de una determinación real.

Las probetas de agregado de referencia se conservarán separadas de las otras probetas.

Cada arista de una zapata nueva que vaya a ser utilizada en medidas con Péndulo Británico sobre probetas de ensayo de pulimento, deberá ser acondicionada haciéndola pasar 5 veces sobre la superficie seca de una probeta de las indicadas en 7.2.1 y otras 20 veces sobre su superficie mojada.

7.3 Preparación de la rueda de ensayo.

Las catorce probetas a montar en la rueda de ensayo deben numerarse en la forma siguiente:

- a) 2 probetas del primer agregado, numeradas 1 y 2
- b) 2 probetas del segundo agregado, numeradas 3 y 4
- c) 2 probetas del tercer agregado, numeradas 5 y 6
- d) 2 probetas del cuarto agregado, numeradas 7 y 8
- e) 2 probetas del quinto agregado, numeradas 9 y 10
- f) 2 probetas del sexto agregado, numeradas 11 y 12
- g) 2 probetas de agregado patrón, numeradas 13 y 14

La distribución de las 14 probetas en la rueda de ensayo se hará de acuerdo al siguiente orden:

13-9-3-7-5-1-11-14-10-4-8-6-2-12.

Se montan las probetas alrededor de la periferia de la rueda de ensayo en el orden indicado. Se marcan las probetas de modo que se pueda determinar posteriormente la dirección de giro de la rueda. La superficie de ensayo de las probetas deberá formar una banda continua de partículas dispuestas sobre la periferia de un círculo de diámetro 406 ± 3 mm, sobre la cual la rueda de goma pueda rodar libremente sin chocar o patinar.

Nota 9: Se podrá utilizar probetas de relleno para completar la rueda de ensayo en caso que no se ensayen seis agregados diferentes.

7.4 Alimentación de abrasivos y agua.

7.4.1 Abrasivo grueso. La alimentación del abrasivo grueso mediante el mecanismo correspondiente, se efectuará de modo continuo a razón de 27 ± 7 g/min junto con el agua, cayendo sobre la rueda de ensayo por un período de tiempo de 3 horas ± 1 minuto. La velocidad de alimentación del agua será la suficiente para hacer llegar el abrasivo a la rueda de ensayo. Esta velocidad es aproximadamente la misma que la del abrasivo grueso.

7.4.2 Abrasivo fino. La alimentación del abrasivo fino mediante el mecanismo correspondiente, se efectuará de modo continuo a razón de 3 ± 1 g/min junto con el agua, cayendo sobre la rueda de ensayo por un período de tiempo de 3 horas ± 1 minuto. La velocidad de alimentación del agua será el doble de la del abrasivo fino $\pm 1,0$ gr/min.

7.5 Pulimento acelerado de las probetas.

7.5.1 Temperatura de ensaye. El pulimento acelerado se deberá realiza a una temperatura ambiente de $20 \pm 5^\circ\text{C}$.

7.5.2 Ciclo de pulimento con abrasivo grueso y agua. La rueda de ensayo con las probetas ya fijadas en su periferia como se indica en el numeral 7.3, se acopla al eje de la máquina en su posición normal de trabajo. Se pondrá la máquina en marcha a su velocidad de trabajo de 320 ± 5 rpm y en ese momento se apoya cargada la rueda de goma maciza (de color oscuro) sobre la superficie de las probetas mediante una pesa con una fuerza total de 725 ± 10 N. Seguidamente se hace funcionar el mecanismo de alimentación del abrasivo grueso, abriendo la llave del agua de forma que el caudal de alimentación sea para ambos el fijado en el numeral 7.4.1. Manteniendo este ciclo de pulimento durante un período de tiempo de 3 horas \pm 1 minuto.

Transcurrido este tiempo se detiene la máquina, se limpia completamente la rueda, el mecanismo de alimentación del abrasivo y las probetas por medio de agua, desmontando la rueda si es necesario para eliminar cualquier residuo de abrasivo grueso.

Nota 10: Es importante que el abrasivo grueso no tenga contacto con la rueda de goma maciza de color claro.

Nota 11: Evitar siempre aglomeraciones del abrasivo en la rampa de la tolva utilizando, cuando sea necesario, un chorro adicional de agua mediante un frasco lavador.

7.5.3 Ciclo de pulimento con abrasivo fino y agua. Se monta ahora la rueda de goma maciza de color claro y el mecanismo de alimentación para el abrasivo fino. Luego, se vuelve a poner en marcha la rueda de ensayo a la velocidad de 320 ± 5 rpm, apoyándose seguidamente la rueda de goma maciza sobre la superficie de las probetas aplicando una carga de 725 ± 10 N. Seguidamente se hace funcionar el mecanismo de alimentación del abrasivo grueso, abriendo la llave del agua de forma que el caudal de alimentación sea para ambos el fijado en el numeral 7.4.2. Manteniendo este ciclo de pulimento durante un período de tiempo de 3 horas \pm 1 minuto.

Transcurrido este tiempo se detiene la máquina, se limpia completamente la rueda, el mecanismo de alimentación del abrasivo y las probetas por medio de chorro de agua.

7.5.4 Se repite el proceso completo de ensayo con la máquina de pulimento utilizando una segunda rueda de ensayo conformada por las parejas de probetas no incluidas en la primera rueda.

Nota 12: Se debe evitar tocar con los dedos la superficie pulimentada de la probeta.

Nota 13: Con la rueda detenida evitar mantener la rueda de goma maciza bajo carga.

7.6 Medición con Péndulo Británico

7.6.1 Comprobación de las zapatas. Antes de proceder a las medidas de fricción del conjunto de probetas pulimentadas en cada rueda de ensayo, se deberá comprobar el estado de las zapatas ya acondicionadas. Esta comprobación se debe realizar con probetas preparadas con agregado de referencia como el indicado en el numeral 4.3 sometido a los dos ciclos de pulimento. Estas probetas deberán presentar una Resistencia al Deslizamiento de entre 50 y 60.

Cuando el valor medio de tres lecturas con Péndulo Británico es inferior a 50 se deberá rechazar la probeta y confeccionar una nueva.

7.6.2 Procedimiento operatorio. Finalizado el segundo ciclo de pulimento se desmontan las probetas de la rueda y se lavan a fondo con chorro de agua para eliminar todo el resto de abrasivo fino. Una vez perfectamente limpias, se sumergen con la superficie del agregado hacia abajo durante un período mínimo de 30 minutos, en agua a temperatura de $20\pm 2^{\circ}\text{C}$, y dispuestas en la misma forma en que se ensayarán.

Inmediatamente después de sacarlas del agua se efectúa con cada una de ellas el ensayo de fricción como se indica en 7.6.3. En ningún momento se debe permitir que las probetas se sequen antes del ensayo con el Péndulo Británico.

Para efectuar la medida del pulimento alcanzado por las probetas se requiere que la temperatura ambiente del recinto sea de $20\pm 5^{\circ}\text{C}$ por lo menos dos horas antes del comienzo del ensayo y durante el proceso del mismo. El péndulo de fricción y sus zapatas se mantendrá en la sala de trabajo por lo menos dos horas, antes de comenzar los ensayos, con el objeto de que el aparato pueda alcanzar la temperatura ambiente.

7.6.3 Medida con el péndulo. El péndulo se colocará sobre la base firme y nivelada que contiene el portaprobetas, procediéndose a su montaje y nivelación. A continuación se eleva el eje de suspensión del péndulo hasta que el brazo oscile libremente y se ajusta el mecanismo de la aguja de manera que cuando el brazo del péndulo y la aguja se suelten desde la posición horizontal del punto de reposo, la aguja indicadora se apoye sobre el cero en la escala de ensayo F.

A continuación, la probeta a medir se sujetará firmemente, mediante el dispositivo apropiado, dependiendo si la probeta se desmonta o no de la rueda de ensayo. Según que se emplee uno u otro dispositivo para la realización de las correspondientes medidas de ensayo (véase numeral 3.2d y 3.2e), las probetas deberán ser colocadas de manera que su dimensión mayor quede dispuesta en la misma dirección que la trayectoria a recorrer por la zapata y centrada respecto de ésta. La zapata deslizará sobre la probeta en sentido opuesto al sentido de rotación que tenía la rueda de ensayo en la máquina de pulimento. Para efectuar correctamente esta operación, es conveniente marcar un borde longitudinal en cada probeta. Si esta marca está en el lado más lejano del operador durante el proceso de pulimento, deberá quedar del lado más próximo al operador durante el proceso de medición con el péndulo, y viceversa.

Montado el péndulo y comprobado el "cero" del aparato, se ajustará la altura del péndulo de forma que la zapata de caucho, en su contacto sobre la probeta, recorra una longitud de 76 ± 1 mm.

En la realización de las medidas de cada conjunto de catorce probetas se utilizarán dos aristas de dos zapatas diferentes, acondicionadas como se indica en el numeral 7.2. Con objeto de distribuir las diferencias debidas a las distintas zapatas y para compensar los desgastes de las mismas, las probetas serán ensayadas con el péndulo de fricción en el siguiente orden:

1a. Zapata: Probetas 13-1-10-3-5-12-8.

2a. Zapata: Probetas 7-11-6-4-9-2-14

Antes de efectuar las correspondientes medidas de ensayo, la superficie de las probetas y la arista de la zapata se humedecerán con abundante agua limpia, a la temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$, procurando no mover la zapata de su posición de ajuste.

Se procederá en este momento a la realización de las medidas, dejando caer libremente desde su posición de disparo el brazo del péndulo y la aguja indicadora, anotándose la lectura marcada por ésta en la escala graduada F y redondeando el valor leído a la centésima. Se devuelve la aguja indicadora a su posición horizontal.

Esta operación se repetirá 5 veces sobre cada probeta de idéntico material y operando siempre en las mismas condiciones, volviendo a mojar con agua la superficie de ensayo y la arista de la zapata antes de cada disparo. En estas condiciones, se tomará como valor medio el resultante de las tres últimas lecturas obtenidas sobre cada probeta, redondeadas a la décima (0,1).

8. OBTENCION DE RESULTADOS

8.1 Validez del ensayo.

Se calcula la media de los resultados obtenidos sobre las dos probetas fabricadas con agregado patrón del PSV de cada rueda ensayada. Los resultados se registrarán con aproximación de 0,1 unidades, dando dos resultados.

Si la diferencia entre estos dos resultados de ensayo obtenidos es superior a 5,0 unidades, o si uno de los dos resultados de ensayo cae fuera del intervalo especificado para el agregado patrón del PSV empleado, los resultados del ensayo completo deberán rechazarse y por tanto se deberá repetir el ensayo completo.

El intervalo especificado para el agregado patrón del PSV tipo TRL es **42,5 a 49,5**.

8.2 Cálculo del PSV del agregado ensayado.

Se calcula el valor medio “S” de los valores de pulimento registrados de cuatro probetas de cada muestra de agregado (dos por cada rueda ensayada) y se registra con aproximación a 0,1 unidades

Se calcula el valor medio “C” de los valores de pulimento registrados de cuatro probetas de agregado patrón del PSV (dos por cada rueda ensayada) y se registra con aproximación a 0,1 unidades

Se calcula el coeficiente PSV del agregado ensayado según la siguiente ecuación:

$$\text{PSV} = \text{S} + (46 - \text{C})$$

Esta ecuación es válida sólo para valores de “C” comprendidos entre 42,5 y 49,5.

8.3 Precisión.

8.3.1 Repetibilidad del ensayo de Pulimento Acelerado

El análisis de repetibilidad busca verificar si las medias de medidas repetidas de pulimento bajo las mismas condiciones de ensayo son iguales, y si están lo menos afectadas posible por la desviación estándar ponderada.

El cálculo de la repetibilidad se debe realizar comparando el resultado de la media de dos probetas de agregado pulidas en una misma rueda de ensayo, con los resultados de la media de dos probetas del mismo agregado pero pulidas en la rueda de ensayo siguiente inmediata.

Las cuatro probetas a utilizar para el cálculo de la repetibilidad deben ser fabricadas al mismo tiempo y por el mismo operador. Las condiciones de experimentación deben mantenerse constantes (temperatura, tasa de abrasivos, procedimiento, etc.)

De acuerdo al método ANOVA, dos mediciones son repetibles en tanto su desviación estándar sea cercana a cero. La significancia del ANOVA depende del valor F, el cual es significativo si $F > F_{\text{crítico}}$ o si el valor p es superior a la significancia dada al test, que debe ser de 5%. La desviación estándar ponderada obtenida proporciona el índice de repetibilidad r del ensayo.

Se considera como aceptable un $r = 3$ para el ensayo.

8.3.2 Reproducibilidad del ensayo de Pulimento Acelerado

El análisis de reproducibilidad busca verificar si las medias de medidas repetidas de pulimento son iguales, y si están lo menos afectadas posible por la desviación estándar ponderada, considerando cambios en las condiciones del ensayo.

El cálculo de la reproducibilidad se debe realizar comparando el valor de PSV obtenido con un equipo de pulimento respecto del PSV obtenido con otro equipo de pulimento de las mismas características. Se debe utilizar el mismo agregado patrón de ensayo y ajustarse a la metodología de ensayo establecida en este método de ensayo.

De acuerdo al método ANOVA, dos mediciones son repetibles en tanto su desviación estándar sea cercana a cero. La significancia del ANOVA depende del valor F, el cual es significativo si $F > F_{\text{crítico}}$ o si el valor p es superior a la significancia dada al test, que debe ser de 5%. La desviación estándar ponderada obtenida proporciona el índice de reproducibilidad R del ensayo de pulimento.

Se considera como aceptable un **R=5** para el ensayo.

Nota 14: Los límites aceptables para la repetibilidad y reproducibilidad del ensayo están recogido de los resultados de un experimento de precisión realizado en la Unión Europea por 18 laboratorios en el año 1996 (UNE-EN 1097-8:2000).

8.3.3 Repetibilidad de medidas con Péndulo Británico

La repetibilidad del equipo Péndulo Británico se determinará mediante la siguiente ecuación :

$$E = t \sigma n^{-\frac{1}{2}} \quad (2)$$

Donde “E” corresponde al error del ensayo, “t” al parámetro estadístico para un 95% de Nivel de confianza y “n” al número de ensayos.

Para determinar la repetibilidad se debe realizar 5 lecturas con péndulo sobre una misma superficie de ensayo. Repitiendo este procedimiento sobre 5 superficies diferentes.

El valor máximo admisible del error será de **1 BPN**.

Nota 15: Error admisible según lo establecido en la norma ASTM E303–93 (2003).

8.3.4 Reproducibilidad de medidas con Péndulo Británico

La reproducibilidad de las medidas del péndulo se determinará midiendo la Resistencia al Deslizamiento sobre 3 superficies diferentes, con dos equipos Péndulo Británico, efectuando 5 lecturas por cada superficie.

Para el cálculo de la reproducibilidad se deberá realizar un test-t de medias evaluando muestras independientes y pareadas para un nivel de confianza de 95%. Esto permitirá evaluar si existe diferencia significativa entre la media de las 5 lecturas obtenidas por cada equipo y/o si existe diferencia significativa entre cada una de las 5 lecturas obtenidas con un equipo y cada una de las 5 lecturas obtenidas con el otro equipo.

9. INFORME

El informe deberá incluir al menos la siguiente información:

- a) Referencia al método de ensayo utilizado para la determinación del PSV
- b) Ficha de sala con los datos recolectados en laboratorio, firmada por el ensayador.
- c) Identificación de la muestra de agregado ensayada.
- d) Valor medio del agregado patrón del PSV.
- e) Valores individuales y las medias de cada serie de ensayos de las cuatro probetas de agregado y las cuatro probetas del agregado patrón, con indicación clara de la rueda de ensayo con la que se ha obtenido cada valor.

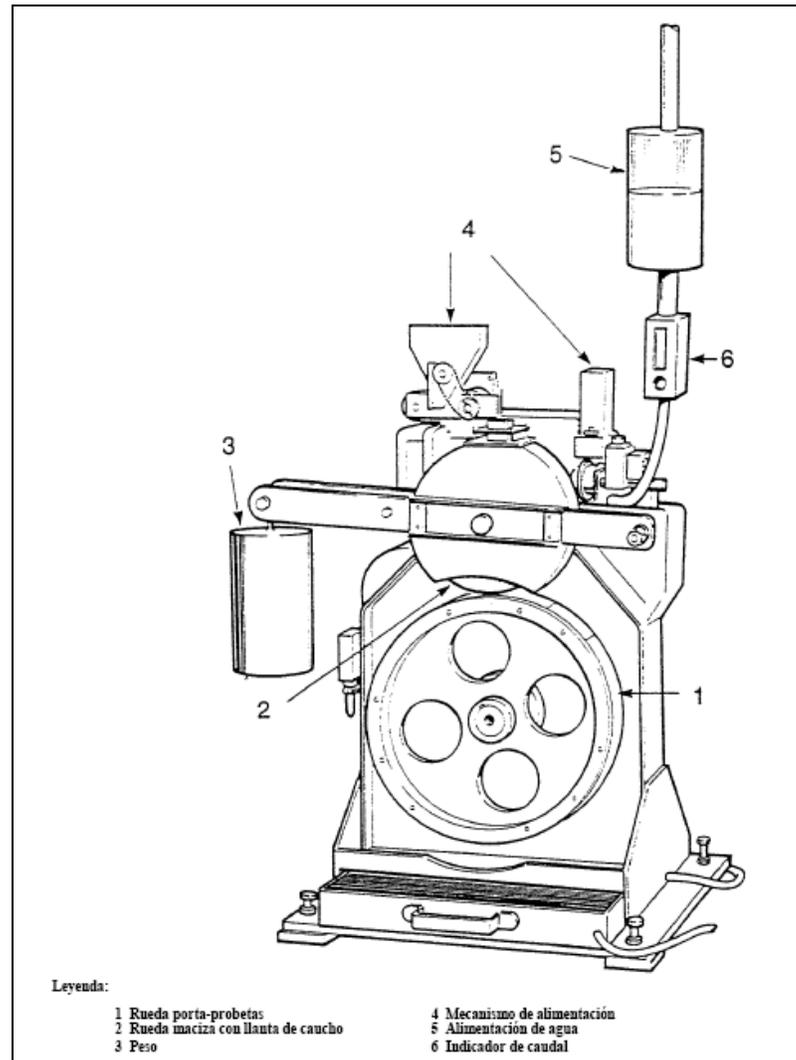


Figura N°1: Máquina de Pulimento Acelerado

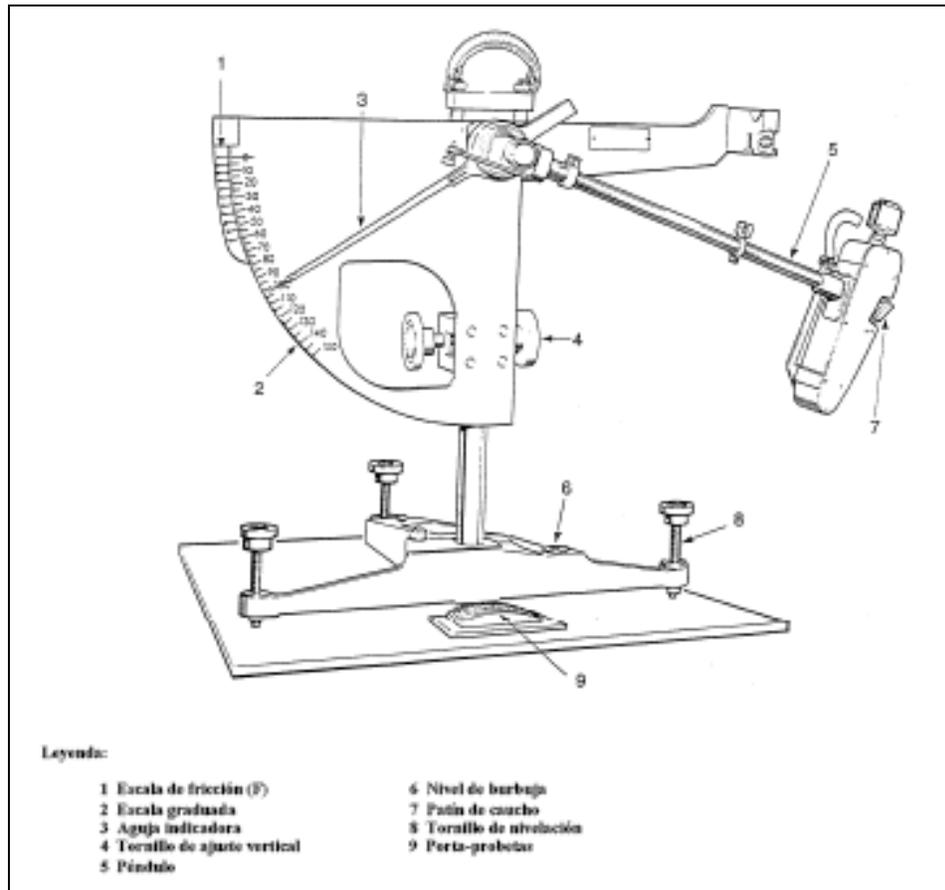


Figura N°2: Equipo Péndulo Británico



Figura N°3: Ejemplo textura superficial de la probeta para ensayo

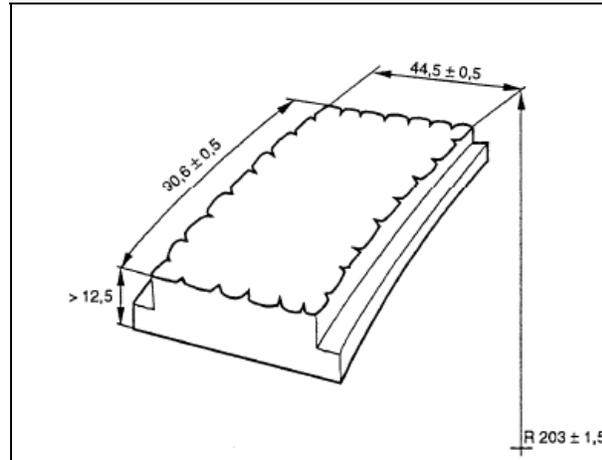


Figura N°4: Dimensiones probeta para ensayo (medidas en milímetros)