

NO MARC
66662

T
C355V
2014



UNIVERSIDAD DE VALPARAÍSO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



“VALIDACIÓN DE UN NUEVO MÉTODO DE
CONTROL DE COMPACTACIÓN DE MEZCLAS
ASFÁLTICAS, BASADO EN LA IMPEDANCIA
ELÉCTRICA”

Por

Saúl Alexis Castro Droguett

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

Prof. Guillermo Brante Lara.

Septiembre, 2014

- Granulometría
- compactación
- ASFALTOS

R. 16923

Agradezco:

A mi amada madre que siempre estuvo ahí para apoyarme y darme un consejo o una palabra de aliento. Sé que desde el cielo aun me sigue apoyando y dando las fuerzas para continuar.

Agradezco a mi padre y a mis hermanos que los quiero mucho, gracias por estar siempre conmigo y haberme dado la oportunidad de estudiar esta carrera.

A Jocelyn por el apoyo y la paciencia que me ha tenido en esta difícil etapa.

A mis tíos, primos y familiares en general por su empatía y apoyo.

A la gente del Laboratorio Regional de Vialidad de la V región, En especial al Sr. José Vergara por su buena disposición a ayudarme.

Agradezco a todos los que hicieron posible este logro.

Muchas gracias.

Índice

CONTENIDO

LISTA DE ACRÓNIMOS

LISTA DE FIGURAS

Resumen

1. Introducción

2. Objetivos

3. Marco teórico

Dedicatoria:

A mi madre: Flor María Droguett Aqueveque.

4. Metodología

5. Resultados

5.1. Descripción de la muestra

5.2. Descripción de los instrumentos

5.3. Descripción de la muestra de datos

5.4. Descripción de los resultados

5.5. Descripción de los resultados

5.6. Descripción de los resultados

5.7. Descripción de los resultados

5.8. Descripción de los resultados

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1. Conclusiones

6.2. Recomendaciones

6.3. Recomendaciones

6.4. Recomendaciones

6.5. Recomendaciones

7. Anexos

7.1. Anexo 1

7.2. Anexo 2

7.3. Anexo 3

7.4. Anexo 4

Índice

GLOSARIO.....	6
LISTA DE ABREVIATURAS.....	7
LISTA DE FIGURAS.....	8
Resumen.....	12
1.-Introducción.....	14
2- Objetivos.....	17
2.1- Objetivo General.....	17
2.2.- Objetivos específicos.....	17
3.- Planificación de trabajo.....	18
4.- Marco teórico.....	20
4.1.- Mezcla asfáltica en caliente.....	20
4.2.- Método de diseño Marshall.....	21
4.3.- Visación de la dosificación.....	23
4.3.1.- Granulometría.....	23
4.3.2.- Densidad real seca.....	23
4.3.3.- Desgaste de Los Ángeles.....	24
4.3.4.- Cubicidad de las Partículas.....	24
4.3.5.- Análisis Marshall.....	24
4.4.- Densidad, Compactación y métodos de control.....	25
4.4.1.- Densidad Marshall.....	26
4.4.2.- Control de compactación en obra (autocontrol).....	26
4.4.3.- Método nuclear MC-V8 (8.502.9) ASTM D 2950-82.....	27
4.4.4.- Método no nuclear AASHTO TP 68-04.....	30
4.4.5.- Método de Extracción de Testigos.....	34
5.- Desarrollo.....	35
5.1.- Resultados de la visación.....	35
5.2.- Toma de datos y muestras en terreno (autocontrol y control receptivo).....	37
5.2.1.- Datos extraídos durante el control receptivo.....	37
5.2.2.- Datos para análisis en condiciones de Repetibilidad.....	39

5.3.- Comparación de método no nuclear y método nuclear	40
6.- Análisis estadístico de los datos obtenidos en terreno.....	43
6.1.- Análisis de los datos tomados en condiciones de repetibilidad.....	44
6.2.- Análisis de datos tomados durante el control receptivo.....	46
6.2.1.- Determinación del factor de corrección.....	46
6.2.2.- Análisis descriptivo	49
6.3.- Análisis de los datos con pruebas de hipótesis.....	53
6.3.1- Análisis de normalidad de datos.....	53
6.3.2.- Análisis de los datos con pruebas de hipótesis	58
7.1.- Consideraciones finales.....	69
8.- Bibliografía.....	70
ANEXO 2- Visación de las dosificaciones.....	75
A-2.1- Granulometría MC-V8 (8.202.3).....	75
A-1.2- Densidad real, neta y absorción.....	78
A-1.2.1- Capa intermedia.....	78
A-1.2.2- Carpeta asfáltica	81
A-1.3- Desgaste de los ángeles.....	83
A.1.4- Cubicidad de las partículas.....	85
A-1.5- Análisis Marshall.....	87
A-1.5.1- Densidad Marshall	88
A-1.5.2- Determinación de la resistencia a la estabilidad y fluidez de la mezcla.....	90
A-1.5.3- Cálculo del porcentaje Vacíos en el Agregado Mineral (V.A.M).....	91
ANEXO 3- Tablas de valores críticos para pruebas de hipótesis.....	92

GLOSARIO

Briquetas.- Son cilindros de mezcla asfáltica diseñados en laboratorio con la finalidad de ensayarlas y determinar propiedades de la mezcla asfáltica.

Densificación.- Proceso mecánico en el cual se logra que una capa asfáltica logre aumentar su densidad.

Detectores GM.- Es un instrumento que permite medir la radiactividad de un objeto o lugar.

Dieléctrico.- Se denomina dieléctrico al material mal conductor de electricidad, por lo que puede ser utilizado como aislante eléctrico, y además si es sometido a un campo eléctrico externo, puede establecerse en él un campo eléctrico interno.

Disgregación de la mezcla.- Separación de los elementos que conforman la mezcla asfáltica.

Dosímetro.- Aparato o dispositivo que mide la dosis de radiactividad, que se usa cuando se emplean métodos nucleares para determinar humedad y densidad.

Espectroscopía.- La espectroscopía es el estudio de la interacción entre la radiación electromagnética y la materia, con absorción o intercambio de energía.

Granulometría.- Técnica para la medida del tamaño de las partículas que forman un material granular.

Pruebas paramétricas.- Son procedimientos estadísticos de decisión basados en la distribución de los datos reales.

LISTA DE ABREVIATURAS

AASHTO.- American Association of State Highway and Transportation Officials (Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes).

Ec.- Ecuación

fig.- Figura.

GM.- Geiger Mueller.

MÁX.- Máximo

MÍN.- Mínimo.

NCh.- Norma Chilena.

Pág.- Página.

PQI.- Pavement Quality Indicator (indicador de calidad del pavimento).

V.A.M.- Vacíos del agregado mineral.

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1.1- Densímetro nuclear, PQI-380 y equipo de extracción de testigos	16
Figura 3.1- Planificación de trabajo.....	19
Figura 4.1- Esquema de un pavimento asfáltico.	20
Figura 4.2- Gráficos típicos de estabilidad, densidad y porcentaje de vacíos, v/s porcentaje de asfalto en una mezcla asfáltica	21
Figura 4.3- Equipo de compactación Marshall (figura izquierda) y Máquina Marshall (figura derecha).....	22
Figura 4.4- Briquetas preparadas con el contenido óptimo de asfalto.....	26
Figura 4.5- Densímetro nuclear Troxler Modelo 3430.	28
Figura 4.6- Densímetro nuclear. Esquema retro transmisión.	29
Figura 4.7- PQI-380 Transtech.....	30
Figura 4.8- PQI-380 Partes y accesorios.	31
Figura 4.9- Esquema de funcionamiento teórico "Equipo no nuclear".....	32
Figura 4.10- Campo eléctrico a través del material.	33
Figura 4.11- Testiguera de bajo rendimiento.	34
Figura 5.1- Ruta F-50 Lo Orozco-Quilpué.	37
Figura 5.2- Esquema de toma de datos en terreno.	39
Figura 6.1- Esquema para análisis de los datos tomados en terreno.....	43
Figura 6.2- Desviación promedio de los grupos de datos en condiciones de repetibilidad..	45
Figura 6.3- Rango promedio de los grupos de datos en condiciones de repetibilidad.....	45
Figura 6.4- Diferencia entre densidad de testigo y método de autocontrol en la carpeta asfáltica	48
Figura 6.5- Desviación estándar de los datos tomados con los métodos de control de densidad en la carpeta asfáltica y la capa intermedia.	50
Figura 6.6- Rangos de densidad determinados a la carpeta asfáltica.....	51
Figura 6.7- Promedios de densidad determinados a la carpeta asfáltica y en la capa intermedia por los métodos de autocontrol y densidades determinadas a testigos.	52
Figura 6.8- Gráfico P-P de los datos tomados con el método nuclear y no nuclear en la carpeta asfáltica y capa intermedia.	55
Figura 6.9- Curvas normales graficadas según los datos tomados en la carpeta asfáltica y capa intermedia.	56
Figura 6.10- Curvas normales con medias iguales, para las variables "Testigos", "No nuclear" y "Nuclear" en la carpeta asfáltica y capa intermedia.	57
Figura 6.11- Grupos de datos formados para análisis mediante estadística descriptiva y pruebas de hipótesis.	58
Figura 6.12- Tipo de caso prueba T según resultado de prueba F , para contraste método de autocontrol-testigos en carpeta asfáltica y capa intermedia.	64
Figura 6.13- Resultados pruebas de hipótesis.	66
Figura A2.1- Áridos reducidos por cuarteo y tamizados.	75
Figura A2.2- Granulometría capa intermedia.	77
Figura A2.3- Granulometría carpeta asfáltica Lo Orozco.	78

Figura A2.4-	Máquina de los Ángeles laboratorio de vialidad de Valparaíso.	84
Figura A2.5-	Muestra para ensaye Cubicidad de las partículas.....	86
Figura A2.6-	Máquina de compactación.....	87
Figura A2.7-	Máquina Marshall.....	90

LISTA DE TABLAS

	Pág.	
Tabla 1.1.-	Algunas emergencias nucleares por accidentes con densímetro nuclear.....	15
Tabla 3.1.-	Ensayes aplicados en la visación de la mezcla.....	18
Tabla 4.1.-	Ensayes y análisis del Manual de Carreteras aplicados en el análisis Marshall.....	25
Tabla 4.2.-	Especificaciones para las capas asfálticas.	25
Tabla 5.1.-	Análisis granulométrico de la mezcla de trabajo.	35
Tabla 5.2.-	Carpeta asfáltica. Características de la mezcla determinadas en la visación..	36
Tabla 5.3.-	Capa intermedia. Características de la mezcla determinadas en la visación...	37
Tabla 5.4.-	Tiempo estimado de operación de equipos de autocontrol.....	38
Tabla 6.1.-	Desviación estándar y rango de las densidades tomadas en condición de Repetibilidad.....	44
Tabla 6.2.-	Densidades tomadas en terreno para establecer el factor de corrección en los equipos de autocontrol.....	47
Tabla 6.3.-	Estadística descriptiva de los datos tomados en control receptivo.....	49
Tabla 6.4.-	Prueba de normalidad aplicada a los grupos de densidades tomadas a la carpeta asfáltica y a la capa intermedia.....	54
Tabla 6.5.-	Medias y desviaciones estándar de las densidades determinadas en la carpeta asfáltica y capa intermedia.....	56
Tabla 6.6.-	Parámetros determinados a las densidades obtenidas por los métodos de control de densidad en la carpeta asfáltica y la capa intermedia, necesarios para la aplicación de pruebas de hipótesis.	60
Tabla 6.7.-	Resultados prueba de hipótesis "F" de comparación de varianzas.....	61
Tabla 6.8.-	Determinación de parámetros t y t_{crit} para varianzas iguales (Caso a).....	65
Tabla 6.9.-	Determinación de parámetros t y t_{crit} para varianzas distintas (Caso b).....	65
Tabla A1.1.-	Densidades determinadas con "Método nuclear" y "Método no nuclear" en condiciones de repetibilidad de valores en la carpeta asfáltica.....	71
Tabla A1.2.-	Densidades determinadas con el método nuclear en la carpeta asfáltica y capa intermedia.	72
Tabla A1.3.-	Densidades determinadas con el método no nuclear en la carpeta asfáltica y capa intermedia.....	73
Tabla A1.4.-	Densidades determinadas a los testigos extraídos del control receptivo.....	74
Tabla A2.1.-	Ponderación de los áridos en las mezclas.	76
Tabla A2.2.-	Granulometría pétreos de la capa intermedia (binder) Lo Orozco ruta F-50.....	76
Tabla A2.3.-	Granulometría pétreos de la Carpeta de Rodadura Lo Orozco ruta F-50.....	77
Tabla A2.4.-	Densidad real, neta y absorción de los pétreos gruesos utilizados en la capa intermedia.....	79
Tabla A2.5.-	Densidad real, neta y absorción de los pétreos finos utilizados en la capa intermedia.....	80
Tabla A2.6.-	Densidad real, neta y absorción de los pétreos utilizados en la capa intermedia.....	81
Tabla A2.7.-	Densidad real, neta y absorción de los pétreos gruesos utilizados en la carpeta asfáltica.....	81

Tabla A2.8.-	Densidad real, neta y absorción de los pétreos finos utilizados en la carpeta asfáltica.....	82
Tabla A2.9.-	Densidad real, neta y absorción de los pétreos utilizados en la carpeta asfáltica.....	82
Tabla A2.10.-	Desgaste de los Ángeles de los agregados pétreos utilizados en la carpeta.	83
Tabla A2.11.-	Desgaste de los Ángeles de los agregados pétreos utilizados en capa intermedia.....	84
Tabla A2.12.-	Cubicidad de las partículas de los áridos de la carpeta asfáltica Lo Orozco ruta F-50.....	86
Tabla A2.13.-	Cubicidad de las partículas de los áridos de la capa intermedia, "Lo Orozco ruta F-50".....	86
Tabla A2.14.-	Espesores y alturas de las briquetas ensayadas en el análisis Marshall.....	88
Tabla A2.15.-	Pesadas seca, bajo agua y saturada superficialmente seca de briquetas de ensayo Marshall.	89
Tabla A2.16.-	Densidad Marshall y absorción de agua de la capa intermedia y de la carpeta asfáltica.	89
Tabla A2.17.-	Fluidez y Estabilidad de la mezcla.	90
Tabla A2.18.-	Cálculo de Vacíos del agregado mineral V.A.M.	91
Tabla A3.1.-	Prueba F, Valores críticos para $\alpha=0,005$	92
Tabla A3.2.-	Prueba T, Valores críticos para $\alpha=0,005$	93

Resumen

El presente trabajo de título, consistió en analizar la validez de un nuevo método de control de compactación de mezclas asfálticas en caliente, el cual se pretende que reemplace al método nuclear utilizado de manera tradicional en Chile. Mediante este método se determinó la densidad en varios puntos dentro de dos capas asfálticas, basándose en la impedancia eléctrica de la mezcla.

Se pueden distinguir tres etapas en el desarrollo de este trabajo "Visación de las mezclas", "Toma de densidades en terreno" y "Análisis de datos tomados en terreno".

Durante el desarrollo de este trabajo se visaron las mezclas utilizadas en la capa intermedia y la carpeta asfáltica puestas en obra, de acuerdo a las especificaciones del Manual de Carreteras de la Dirección de Vialidad, Volúmenes 5 y 8. Se comprobó que éstas cumplen con dichas especificaciones y con las desviaciones permitidas con respecto a la memoria de cálculo.

Se determinaron densidades con el "Método nuclear" y "Método no nuclear" en dos mezclas distintas puestas en terreno, las cuales fueron utilizadas en el contrato "Mejoramiento de la Ruta F-50 Sector de Lo Orozco- Quilpué Tramo DM- 17,578.35 - DM 29,497.99", en la comuna de Quilpué, provincia de Marga-Marga, Región de Valparaíso, en el mes de Marzo del 2013.

Se hicieron análisis basados en la "teoría de la inferencia estadística", se contrastaron los grupos de densidades medidas durante el control receptivo de la obra con ambos métodos de autocontrol frente a las densidades determinadas a testigos, se confirmó la normalidad de los datos a través de la aplicación de "Pruebas de Normalidad". Con la aplicación de pruebas de hipótesis, se comprobó que las densidades medidas con el equipo PQI utilizado en el método No nuclear (nuevo método), no presenta diferencias frente a las densidades determinadas a testigos extraídos de la carpeta asfáltica, sin embargo en la capa intermedia las pruebas aplicadas arrojaron variaciones significativamente diferentes entre éstos dos métodos debido a que no fue posible aplicar el factor de corrección en esta capa.

Se estudió un grupo de densidades tomadas en 10 puntos diferentes dentro de la carpeta asfáltica con el equipo densímetro nuclear y el equipo PQI con el fin de determinar la variación de las densidades medidas por estos dos aparatos en condiciones de repetibilidad. Se observaron medidas de dispersión inaceptables en las densidades tomadas por el equipo densímetro nuclear, teniendo un rango de medición promedio de $106,5 \text{ kg/m}^3$ en circunstancias que no debió haber variación, sin embargo, las densidades medidas por el PQI no registraron mayores variaciones siendo el promedio de $1,2 \text{ kg/m}^3$.

Se evidenciaron en obra las ventajas de la aplicación del nuevo método de autocontrol mostrando grandes avances frente al método nuclear, sobre todo en lo que se refiere a seguridad, mantenimiento, operación y traslado, además de la ligereza del equipo.

En base a los resultados obtenidos en este trabajo de título, se llegó a concluir que "El equipo PQI utilizado en el método no nuclear es perfectamente aceptable para medir densidades de pavimentos asfálticos in situ, ya que provee resultados al menos tan buenos como el método nuclear, y debido a su rapidez permite ahorrar tiempo y así trabajar la mezcla en su temperatura de compactación"

1.-Introducción

Con el paso del tiempo la tecnología ha evolucionado bastante, introduciendo maquinaria y equipos en prácticamente todas las áreas de la ingeniería, es por esto que los profesionales deben mantenerse al día con los avances tecnológicos, de tal manera de aplicar los conocimientos en los procesos constructivos y realizar obras más eficientes, seguras y amigables con el medioambiente.

Es sabido que las carreteras y caminos juegan un papel fundamental en el desarrollo económico de un país, *"la expansión de la infraestructura vial puede elevar el rendimiento de los proyectos que las empresas privadas llevan a cabo, lo que incrementa la rentabilidad de las inversiones del sector privado"* [1], por lo que se hace sumamente necesario asegurar que los proyectos de pavimentación cumplan con las especificaciones establecidas en el diseño y que al construir vías de calidad, duraderas en el tiempo, y con un mínimo costo de mantención.

La duración de los pavimentos asfálticos está íntimamente ligada a la densificación de éstos; la falta de compactación puede provocar diversos problemas en la carpeta, como por ejemplo: disgregación, erosión, ahuellamiento por el paso de vehículos e infiltración. Todo esto produce un deterioro prematuro del pavimento [2].

En Chile, el Manual de Carreteras Volumen 8, propone un método nuclear¹ para determinar in situ la densidad de capas asfálticas mediante ensayo no destructivo, utilizando para ello un equipo "densímetro nuclear". Este método se aplica como control de compactación en obra y su utilización se ha masificado a pesar de operar mediante radiación ionizante.

El densímetro nuclear utiliza una fuente de bajo nivel de radiactividad para determinar estimaciones de densidad. A medida que se compacta la carpeta, éste determina la densidad y el porcentaje de compactación, referido a la densidad Marshall, valor de referencia para la determinación del grado de compactación obtenido en este método de diseño, de la carpeta asfáltica colocada en obra.

El uso del densímetro nuclear obliga a adoptar diversas medidas de seguridad en la obra para cumplir estrictas normas que regulan su uso debido a la fuente radiactiva con que opera. La fuente es una barra de Cesio 137, se encuentra emitiendo radiación en forma constante, incluso cuando está siendo utilizada, por lo que cualquier descuido se puede transformar en un riesgo innecesario.

¹ Manual de Carreteras volumen 8. Numeral 8.502.9 Auscultaciones y prospecciones; "Método nuclear para determinar in situ la densidad de capas asfálticas"

de fuga radiactiva. Por otro lado, este método expone al operador a una pequeña dosis de radiación cada vez que opera el equipo, debido a esto la persona encargada debe portar siempre un dosímetro para evaluar su exposición a la radiación.

Durante el año 2012 se produjeron diversos accidentes con densímetro nuclear, basta ver las noticiarios o indagar en la Web para conocer los accidentes que han salido a la luz pública durante ese año en los cuales se ha debido evacuar el sector involucrado debido al riesgo de radiación (tabla 1.1).

Tabla 1.1- Algunas emergencias nucleares por accidentes con densímetro nuclear.

FECHA	LUGAR	DESCRIPCIÓN	FUENTE
07-12-2012	Talcahuano	Densímetro nuclear dañado por rodillo, se aisló la zona y se traslado la capsula que contiene la fuente a un búnker	http://noticias.terra.cl/nacional/policial/talcahuano-emergencia-por-accidente-con-densmetro-nuclear_aacaf4fba577b310VgnVCM4000009bcc_eb0aRCRD.html
03-12-2012	Rancagua	Se produjo un accidente con éste equipo, por lo que las autoridades acordonaron la zona y sacaron a las familias que estaban en lo inmediato.	http://www.theclinic.cl/2012/12/03/emergencia-en-ruta-que-une-rancagua-y-donihue-por-accidente-con-densimetro-nuclear/
14-09-2012	Puchuncaví	Choque contra densímetro nuclear en las cercanías de Codelco en Puchuncaví provoca perímetro de seguridad de 250 mt.	http://www.ucvradio.cl/bsite/2012/09/14/choque-contr-un-densimetro-nuclear-en-las-cercanias-de-codelco-puchuncavi-provoca-perimetro-de-seguridad-de-250-metros/

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, TRANSTECH ha introducido al mercado el "Pavement Quality Indicator" (PQI); equipo no nuclear, el cual determina la densidad de la capa asfáltica de forma más segura ya que

no utiliza radiación ionizante. Éste se basa en la resistividad del material para determinar su densidad y grado de compactación.

Este equipo no requiere de licencias especiales ni autorizaciones ambientales para su uso ni mantención ni traslado, por lo que se presenta como una alternativa mucho más segura tanto para la salud del operador como para el medioambiente.

En cuanto a seguridad, este equipo se puede transportar en la cabina de un vehículo y no se necesita controlar la exposición al campo eléctrico, no requiere de licencias especiales para operación, ni autorizaciones del Servicio de Salud para su almacenamiento ni traslado. El PQI como control de compactación in situ se ha comenzado a implementar recientemente en Chile, por lo que no hay conocimiento sobre su precisión. Se pretende que este aparato reemplace al densímetro nuclear en el corto plazo por lo que la Dirección de Vialidad ha comenzado a promover su utilización.



Figura 1.1- Densímetro nuclear, PQI-380 y equipo de extracción de testigos.

Fuente: Imágenes tomadas en terreno.

2- Objetivos

2.1- Objetivo General

Determinar mediante análisis estadístico, la validez de un nuevo método de control de compactación de mezclas asfálticas, que reemplace el método nuclear empleado habitualmente en Chile.

2.2.- Objetivos específicos

1. Visar el diseño de la mezcla entregado por el contratista empleando la normativa del Manual de Carreteras 2012.
2. Analizar la dispersión de un grupo de densidades determinadas en condición de repetibilidad con ambos métodos de autocontrol ("Método nuclear" y "Método no nuclear") en la carpeta asfáltica.
3. Realizar estimaciones de densidad con ambos métodos de autocontrol, contrastando éstas, con las densidades reales obtenidas del control receptivo de la obra mediante muestras físicas (testigos).
4. Comparar en terreno los dos métodos de autocontrol (Método nuclear y Método no nuclear).

3.- Planificación de trabajo

El trabajo de título desarrollado se planificó básicamente en tres etapas:

- 1) Visación de la mezcla en laboratorio.
- 2) Toma en terreno de densidades y muestras físicas.
- 3) Análisis de los datos obtenidos en terreno.

La primera etapa consistió en extraer una muestra de cada uno de los distintos materiales constituyentes de las dos mezclas asfálticas desde el sitio de acopio de la obra. Se ensayaron las muestras de acuerdo a la normativa aplicable y se determinó si las propiedades físicas, mecánicas e hídricas, cumplen con las tolerancias aceptadas por el Manual de Carreteras. En esta etapa se realizaron los ensayos de laboratorio indicados en la tabla 3.1, en la cual se indica el ensaye o método aplicado y el numeral correspondiente en el Manual de Carreteras.

Tabla 3.1- Ensayes aplicados en la visación de la mezcla.

ENSAYE	NUMERAL
VISACIÓN DE LA MEZCLA	8.003.9
MÉTODO DE DISEÑO MARSHALL	8.302.47
GRANULOMETRÍA	8.202.3
DENSIDAD REAL	8.202.20 y 8.202.21
DESGASTE DE LOS ÁNGELES	8.202.11
CUBICIDAD DE LAS PARTÍCULAS	8.202.6
ANÁLISIS MARSHALL	8.302.40

Fuente: Elaboración propia

La segunda etapa consistió en tomar datos (densidades in situ) con ambos equipos de autocontrol y extraer muestras testigos cada 1750 m² de pavimento de acuerdo a lo especificado para el control receptivo de las obras².

La tercera etapa consistió en analizar los datos obtenidos en la segunda etapa mediante inferencia estadística.

² Manual de carreteras volumen 5. Numeral 5.408.304 Mezclas asfálticas en caliente "tolerancias y multas)

Se contrastaron las densidades obtenidas con los dos equipos de autocontrol y las obtenidas del control receptivo mediante extracción de testigos.

La figura 3.1 muestra, en forma general, la planificación que se hizo para el desarrollo de este trabajo, desde la visación de la muestra hasta el análisis de los datos tomados en terreno.

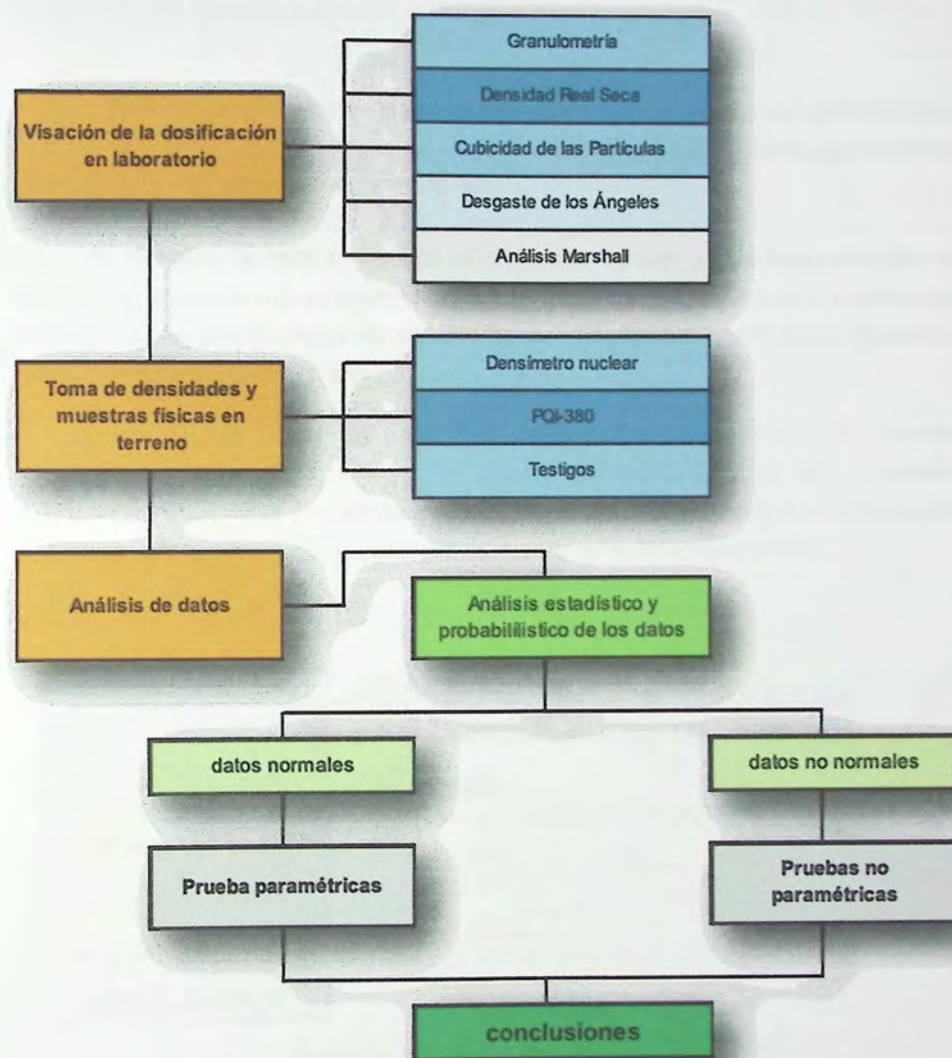


Figura 3.1- Planificación de trabajo.

4.- Marco teórico

4.1.- Mezcla asfáltica en caliente

Una mezcla asfáltica es una combinación de material asfáltico y agregados pétreos en proporciones exactas que se utiliza para construir pavimentos flexibles. Éstos generalmente se constituye de varias capas compactadas (fig. 4.1).

El mezclado se hace en caliente en una planta central, y se coloca sobre una base debidamente preparada o en un pavimento existente. Estas mezclas pueden ser producidas con un amplio rango de combinaciones de agregados, con características particulares adecuadas al diseño específico y a su uso en la construcción.

La mezcla asfáltica debe ser duradera y resistente a las sollicitaciones de tránsito a través de su estabilidad, debe ser impermeable y además trabajable, para su fácil colocación y compactación. Las mezclas también deben ser capaces de transmitir y distribuir la carga a la base, de tal manera de no sobrepasar la capacidad de soporte del material subyacente.

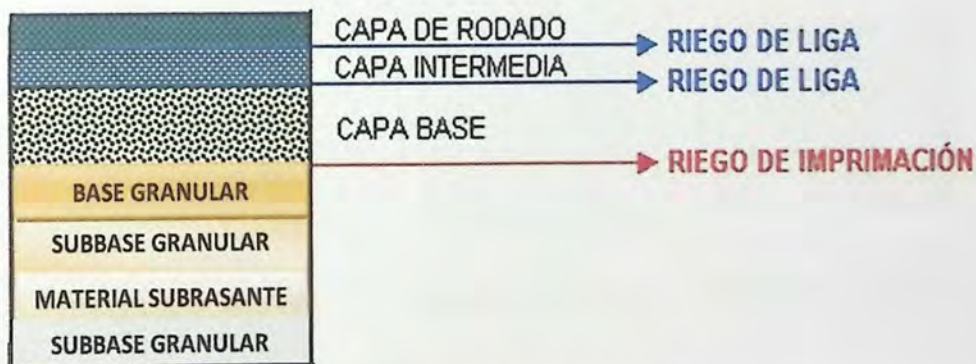


Figura 4.1- Esquema de un pavimento asfáltico.

Fuente: Diapositivas profesor Guillermo Brante.

4.2.- Método de diseño Marshall

El método Marshall es utilizado de forma habitual en Chile para el diseño de mezclas asfálticas en caliente, es aplicable a mezclas que contienen agregados con tamaños máximos de 25.0 mm o menos, puede ser usado para el diseño en laboratorio como para el control in situ de mezclas. El propósito de este método es establecer el contenido óptimo de asfalto para una combinación específica de agregados, basándose en la estabilidad y el contenido de vacíos de la mezcla [3].

Según éste, en laboratorio se preparan series con distintas graduaciones, se confeccionan probetas con moldes normalizados de 63,5mm (2.5 pulgadas) de espesor por 101,6 mm (4 pulgadas) de diámetro para preparar las muestras de cada graduación con distintos porcentajes de asfalto incrementando 0,5%. Uno de los puntos más importantes dentro del método Marshall es el "Análisis Marshall", método por el cual se determina la resistencia a la deformación plástica a probetas de mezcla asfáltica compactada, cargadas sobre su manto lateral. Antes de ensayar se determina la densidades de los agregados, asfalto y mezcla compactada, luego de esto se somete al ensayo de estabilidad y fluidez utilizando la máquina Marshall, con estos resultados se puede controlar las condiciones más desfavorables de impermeabilidad y durabilidad de la mezcla y así fijar márgenes para evitar el exceso o escasez de asfalto.

El contenido óptimo de asfalto se determina considerando las curvas de densidad, estabilidad y huecos en la mezcla (fig. 4.2).

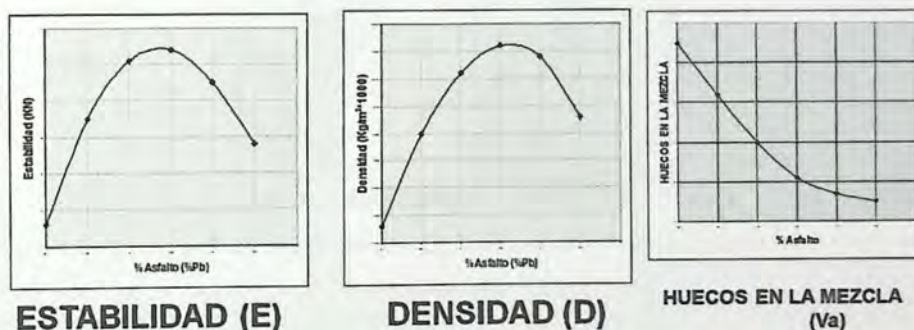


Figura 4.2- Gráficos típicos de estabilidad, densidad y porcentaje de vacíos, v/s porcentaje de asfalto en una mezcla asfáltica

Fuente: Diapositivas profesor Guillermo Brante.

De dichas curvas se determinan los porcentajes de asfalto que entreguen:

- Máxima estabilidad (P_{b1}).
- Máxima densidad (P_{b2}).
- Contenido de asfalto para un 5% de huecos. (P_{b3}).

Con la ecuación 1 se calcula el porcentaje de asfalto de diseño.

$$P_b \text{ óptimo} = \frac{P_{b1} + P_{b2} + P_{b3}}{3} \quad (\text{Ec. 1})$$

La figura siguiente muestra el equipo de compactación (molde de compactación, extractor, martillo de compactación, pedestal de compactación, sujetador de molde y mordaza), y la "Máquina Marshall" utilizada para evaluar la resistencia a la deformación plástica de las probetas (fig. 4.3).

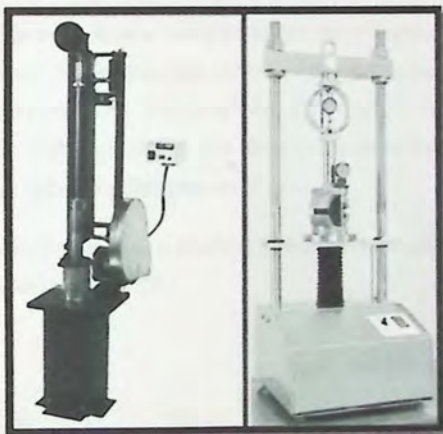


Figura 4.3- Equipo de compactación Marshall (figura izquierda) y Máquina Marshall (figura derecha).

Fuente: Elaboración Propia

4.3.- Visación de la dosificación

La finalidad de visar las mezclas asfálticas es entre otras, la de controlar el diseño, las propiedades físicas, las propiedades mecánicas y las especificaciones de cada uno de los materiales constituyentes de la mezcla, esto a fin de detectar posibles errores en la memoria de cálculo. Para ello la Dirección de Vialidad a través del Manual de Carreteras establece los procedimientos para visar las mezclas asfálticas en caliente y sus agregados pétreos [4].

Este trabajo no busca discutir los procedimientos y normas aplicados, por lo que a continuación, sólo se mostrará un resumen lo suficientemente claro para comprender el texto y en el Manual de Carreteras, se muestran con detalle los procedimientos utilizados en la visación.

4.3.1.- Granulometría

Este análisis se realiza a los áridos constituyentes de la mezcla. Consiste en determinar la distribución porcentual en masa de los distintos tamaños de partículas que constituyen un pétreo separado por tamiz. Los resultados se muestran en una gráfica semilogarítmica, donde en la ordenada se muestra el porcentaje de material que pasa por determinada malla, y en la abscisa, se muestran las aberturas de los tamices utilizados en el ensayo.

El análisis se realiza de acuerdo al método 8.202.3 del Manual de Carreteras Volumen 8, el cual es una adaptación de la NCh 165 of 77.

4.3.2.- Densidad real seca

Este ensayo, consiste en determinar la densidad que considera el volumen macizo de las partículas del material pétreo seco, más el volumen de los poros accesibles e inaccesibles de estas partículas. El ensayo se realiza por separado a las fracciones finas y gruesas, de acuerdo a los métodos 8.202.20 y 8.202.21 del Manual de Carreteras Volumen 8, los cuales son una adaptación de las normas Chilenas NCh 1117 E of 77 y NCh 1239 of 77 respectivamente.

4.3.3.- Desgaste de Los Ángeles

El propósito de este ensayo es determinar la resistencia al desgaste del material pétreo mayor a 2,5 mm, sometiendo la muestra a una carga abrasiva mediante la "Máquina de los Ángeles". El ensayo se realiza de acuerdo al método 8.202.11 del Manual de Carreteras volumen 8, el cual es una adaptación de la NCh 1369-78.

Las especificaciones del manual aceptan un desgaste máximo de 25% para carpetas asfálticas y 35% para la capa intermedia [5].

4.3.4.- Cubicidad de las Partículas

El objetivo de este análisis es determinar el porcentaje de partículas chancadas, rodadas y lajeadas de la fracción de un pétreo retenido en el tamiz 5 mm, es aplicable a los áridos que se emplean en la construcción de las diferentes capas que constituyen un pavimento asfáltico y el ensayo se realiza de acuerdo a la normativa vigente [6].

El ensayo consiste básicamente en separar cada partícula de la muestra, según corresponda en fracción chancada, rodada y lajeada, para luego determinar la masa de cada una de estas fracciones y calcular el porcentaje de ésta respecto a la masa total de ensayo.

Existe una masa mínima de ensayo exigida por la norma y los resultados se expresan en: [Chancado: Ch_i (%) , Rodado: R_i (%) y Lajas: L_i (%)]

4.3.5.- Análisis Marshall

En este ensayo se confeccionan y se ensayan briquetas confeccionadas con el contenido de asfalto óptimo, con la finalidad de determinar si cumplen con las especificaciones establecidas en la norma y con los parámetros considerados en el diseño.

Se determina la densidad, el contenidos de vacíos, estabilidad y fluencia de las briquetas y se compara con las especificaciones. Este ensayo esta normado por el método 8.302.40 del Manual de Carreteras Volumen 8, el cual es una adaptación de la norma americana AASHTO T 245-82.

Tabla 4.1- Ensayes y análisis del Manual de Carreteras aplicados en el análisis Marshall.

ENSAYES Y ANÁLISIS	NUMERAL APLICADO
Densidad de probetas compactadas	8.302.38
Estabilidad y deformación	8.302.40
Vacios del agregado mineral V.A.M	8.302.47

Fuente: Manual de carreteras volumen 8

Las exigencias para la estabilidad, fluidez, huecos de aire y vacíos en el agregado mineral se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 4.2- Especificaciones para las capas asfálticas.

ESPECIFICACIÓN	RODADURA	INTERMEDIA
Estabilidad mínima (N)	90000	8000
Fluidez (0,25 mm)	8-16	8-16
Huecos de aire (%)	4-6	3-8
Vacios en el agregado mineral tamaño máx. 25 mm (%)	MIN 14	MIN 14

Fuente: Manual de carreteras volumen 5

4.4.- Densidad, Compactación y métodos de control

La densidad en las mezclas asfálticas depende de forma directa del grado de compactación de éstas. Una buena compactación de la mezcla dará como resultado pavimentos más densos, lo que ayuda a evitar deformaciones provocadas por el paso de vehículos, disminuye la infiltración de agua provocada por huecos en la capa y ayuda a evitar la segregación por falta de compactación [2].

El Manual de Carreteras define la compactación del concreto asfáltico como una operación mecanizada para lograr en una capa de mezcla asfáltica la densidad deseada.

4.4.1.- Densidad Marshall

La densidad Marshall corresponde a la media aritmética de las densidades determinadas a las briquetas ensayadas durante el análisis Marshall (fig.4.4), esto es la máxima densidad posible de lograr en la mezcla para un contenido de asfalto óptimo. La densidad de estas briquetas se determina utilizando el método 8.302.38 del Manual de Carreteras volumen 8, la norma acepta una tolerancia de $\pm 20 \text{ kg/m}^3$ con respecto a la densidad presentada en la memoria de cálculo.

Esta densidad será la referencia para la calcular el grado de compactación de la mezcla asfáltica colocada en terreno.

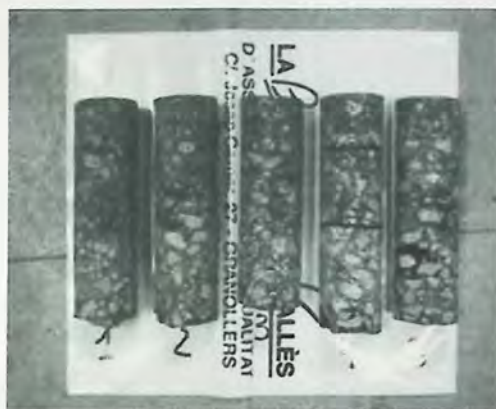


Figura 4.4- Briquetas preparadas con el contenido óptimo de asfalto.

Fuente: Elaboración propia

4.4.2.- Control de compactación en obra (autocontrol)

Según las exigencias de las especificaciones técnicas, la capa intermedia y la carpeta de rodadura, deben ser compactados en obra hasta alcanzar una densidad no inferior al 97 % de la densidad obtenida en la dosificación visada por el laboratorio Regional según el método Marshall (densidad Marshall).

A medida que la mezcla asfáltica se esparce y se compacta sobre la capa granular, o sobre una capa preexistente, el autocontrol procede a medir la densidad de la capa asfáltica con el fin de

verificar el cumplimiento del porcentaje de compactación exigido, y así dar por terminada la faena de compactación en el sector de trabajo.

Actualmente en Chile se utilizan dos métodos para determinar la densidad y el porcentaje de compactación de estas capas. Uno consiste en extraer y analizar una muestra física (testigo) del lugar en que se desea conocer la densidad, y el otro es mediante la utilización de un densímetro nuclear, el cual determina la densidad utilizando un método no destructivo. En este trabajo se experimentará la utilización de un tercer método, que consiste en determinar la densidad y porcentaje de compactación utilizando el equipo "PQI-380". Este, es un método de ensaye no destructivo y se basa en la impedancia eléctrica de la capa, en los siguientes numerales se puede leer una descripción más detallada de los métodos anteriormente nombrados.

4.4.3.- Método nuclear MC-V8 (8.502.9) ASTM D 2950-82

4.4.3.1.- Descripción del método

Este es un método de ensaye no destructivo, utiliza radiación ionizante para determinar la densidad relativa de las capas asfálticas y se utiliza como método de control de compactación en obra, los rayos gama emitidos por una fuente de Cesio 137 penetran en el material y un detector GM (Geiger y Muller), cuenta los fotones retro-dispersados por los electrones del material asfáltico y los transforma en una medida de densidad [7]. El equipo utilizado en este método se llama "Densímetro nuclear". El Manual de Carreteras de la Dirección de Vialidad en el volumen 5 "Auscultaciones y Prospecciones", establece una metodología adaptada de la norma americana ASTM D 2950-82 para determinar in situ la densidad de capas asfálticas compactadas mediante radiación ionizante. La figura 4.5 muestra el modelo 3430; densímetro nuclear utilizado en este trabajo.



Figura 4.5- Densímetro nuclear Troxler Modelo 3430.

Fuente: Manual del equipo.

4.4.3.2.- Densímetro nuclear

El densímetro nuclear (fig. 4.5) es un equipo portátil utilizado en la construcción de obras civiles para determinar densidades de suelos, hormigones y mezclas asfálticas, también se utiliza para medir humedad de bases y contenido de asfalto de una mezcla. En obra se utiliza este equipo para autocontrolar la densidad de los pavimentos asfálticos ya que se emplea un método de ensayo no destructivo y no se necesita de muestras físicas para determinar densidades en terreno.

En las mezclas asfálticas, este equipo determina la densidad y el grado de compactación (referente a la densidad Marshall) de la capa, utilizando una fuente radiactiva. Debido a esto, el equipo debe ser utilizado por un operador calificado y autorizado por la autoridad competente, además debe tener permisos especiales para su utilización almacenamiento y traslado [8].

4.4.3.3.- Teoría de funcionamiento método retrodispersión

El densímetro nuclear Troxler modelo 3430 determina la densidad relativa de las capas asfálticas mediante retro-transmisión o retrodispersión de rayos gama, cuantificando el número de fotones emitidos por una fuente de Cesio-137. Los detectores GM ubicados en la base del

medidor detectan los rayos gamma y un microprocesador convierte los conteos en una medida de densidad expresándola en kg/m^3 [7].

En el método de retrodispersión o retrotransmisión (fig. 4.6), para llegar a los detectores, los fotones gama deben primero pasar a través del material, donde chocan con los electrones allí presentes y deben ser dispersados (reflejados) al menos una vez, antes de alcanzar los detectores de la sonda, la sonda dispone de blindajes entre la fuente y los detectores, a fin de evitar que los fotones puedan acceder a los éstos directamente sin ser dispersados por el material.

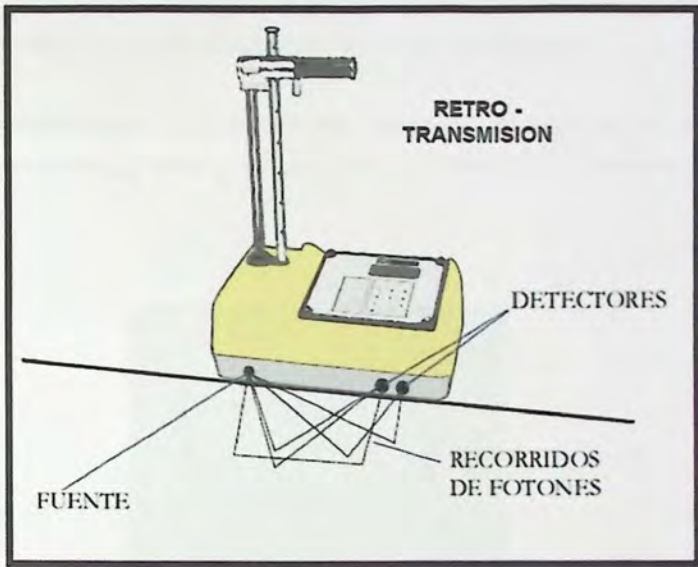


Figura 4.6- Densímetro nuclear. Esquema retro transmisión.

Fuente: Manual del equipo

4.4.4.- Método no nuclear AASHTO TP 68-04

4.4.4.1.- Descripción del método

Éste, es un método de ensaye no destructivo, consiste en determinar la densidad de capas asfálticas mediante impedancia eléctrica, el equipo utilizado en éste método es el "PQI-380" (fig. 4.7), el que determina la densidad relativa de las capas asfálticas utilizando geometría de medición "average" (promedio), "single" (individual), "continuous" (continuo) y "segregations" (segregación), también puede utilizarse para establecer la densidad óptima para una energía de rodillado determinada y verificar el cumplimiento de densidad en las capas asfálticas [9].

En el desarrollo de este trabajo se determinó densidades utilizando método de medición "single". En los numerales siguientes se describe con mayor detalle el funcionamiento teórico de este equipo.



Figura 4.7- PQI-380 Transtech.

Fuente: Elaboración propia

4.4.4.2.- PQI-380

El indicador de calidad del pavimento PQI-380, es un equipo no nuclear, utilizado para determinar densidad de mezclas asfálticas en caliente, utiliza espectroscopia de impedancia para medir la respuesta eléctrica del asfalto de la que se calcula su densidad.

El campo eléctrico se transmite a través del material desde la placa sensora del PQI-380, luego la impedancia es medida y utilizada en el cálculo de la densidad de una mezcla específica. El PQI mide densidades en pavimentos con espesores que van de 0,75 pulgadas a 6 pulgadas (20 mm a 150 mm), el equipo cumple con la norma AASHTO TP 68-04. (Standard Method of Test for Density of In-Place Hot-Mix Asphalt (HMA) Pavement by Electronic Surface Contact Devices). Las partes y accesorios que componen el PQI-380 se muestran en la figura siguiente.



Figura 4.8- PQI-380 Partes y accesorios.

Fuente: Manual del PQI-380

4.4.4.3.- Teoría de funcionamiento

El PQI-380 genera un campo electromagnético utilizando un transmisor, el que trabaja a frecuencias de un megahercio (Valores comprendidos entre AM y FM). El funcionamiento se basa en el principio de la impedancia eléctrica, el campo eléctrico es sensible y varía en función de la impedancia eléctrica (resistencia al paso de la corriente) del material ensayado, la cual varía de forma proporcional a la constante dieléctrica que a su vez es inversamente proporcional al volumen de huecos y al porcentaje de compactación. Al compactar la mezcla se reduce el porcentaje de huecos, por lo tanto el campo eléctrico va a variar en función de la densidad de la mezcla asfáltica. En términos generales el equipo opera bajo el principio de medición de los cambios del campo eléctrico resultante del paso de éste a través de un material dieléctrico (pavimento de mezcla asfáltica).

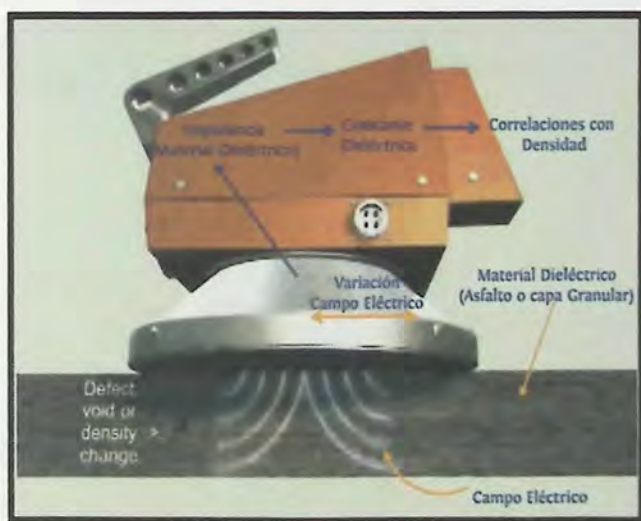


Figura 4.9- Esquema de funcionamiento teórico "Equipo no nuclear".

Fuente: Prezzi presentaciones.

La apreciación de la intensidad del campo eléctrico se efectúa por medio de las fuerzas mecánicas con las que el campo actúa sobre cuerpos cargados. Puesto que según la ley de Coulomb, la fuerza de acción entre dos cargas en un medio dado depende de la magnitud de éstas y de la distancia entre ellas, se adopta como medida cuantitativa del campo, la fuerza mecánica

con que éste actúa en el punto dado del espacio sobre la unidad de carga positiva, colocada en el punto. Esta magnitud se denomina intensidad del campo eléctrico y se designa con la letra E [10].

$$E = \frac{q_1 \times q_2}{4\pi \epsilon \cdot \epsilon_0 r^2} \quad (\text{Ec. 2})$$

La constante dieléctrica ϵ muestra en cuántas veces la fuerza de interacción de dos cargas en un medio es menor que en el vacío, siendo idénticas las demás condiciones, ésta es una magnitud adimensional y en una capa asfáltica será mayor mientras mayor sea el grado de compactación de la mezcla, por lo tanto se deduce que al compactar la mezcla y reducir el porcentaje de vacíos, la constante dieléctrica de la capa asfáltica aumenta, con lo que se reduce la intensidad del campo eléctrico, la figura siguiente ilustra el paso del campo eléctrico a través de la capa asfáltica.

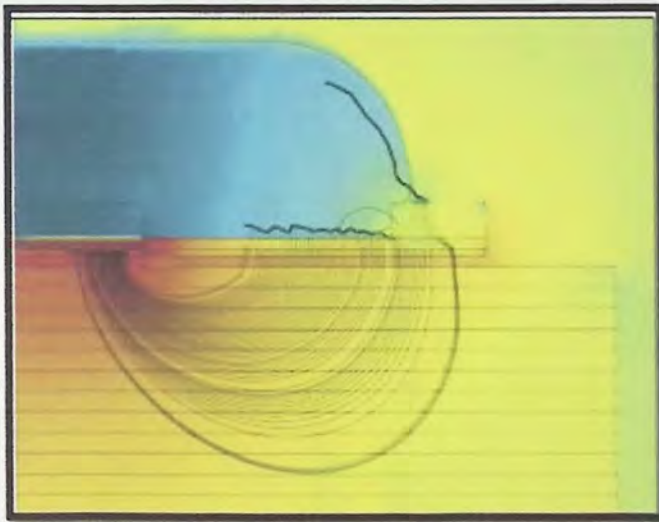


Figura 4.10- Campo eléctrico a través del material.

Fuente: Manual del equipo PQI-380

4.4.5.- Método de Extracción de Testigos

Este método define los procedimientos para la extracción de muestras por aserrado (testigos), se basa en el método 8.502. del Manual de Carreteras Volumen 8. Consiste básicamente en extraer una muestra cilíndrica del pavimento terminado utilizando para ello una "testiguera", la finalidad de este ensayo es recepcionar las obras, ya que al analizar los testigos se puede verificar el cumplimiento de las especificaciones de diseño (principalmente densidad y espesor), con lo que se asegura la calidad y la duración de las obras contratadas.

El equipo que se utiliza para la extracción de muestras se llama testiguera, se pueden apreciar dos categorías "alto rendimiento" y "bajo rendimiento", las cuales se diferencian por su peso, potencia, rendimiento y maniobrabilidad.

En el desarrollo de este trabajo de título, se utilizó la testiguera de bajo rendimiento. La ventaja de éstas, es que son equipos portátiles, se utilizan en pavimentos y preferentemente en estructuras, dada su gran versatilidad, pues son lo suficientemente pequeños y livianos para moverlos e instalarlos con relativa facilidad.



Figura 4.1- Testiguera de bajo rendimiento.

<http://www.fmtl.cl/>

5.- Desarrollo

Todos los análisis hechos a los agregados pétreos y a la mezcla asfáltica, se basaron en la normativa del Manual de Carreteras volúmenes 5 y 8, los detalle de la visación se muestran en el anexo 2 (visación de las mezclas).

En este capítulo también se describe brevemente la metodología utilizada para la toma de datos en terreno con los equipos de autocontrol y control receptivo.

5.1.- Resultados de la visación

La tabla 5.1, muestra un resumen del análisis granulométrico hecho a la capa intermedia y a la carpeta asfáltica, comparando los resultados con la banda presentada en memoria de cálculo. Se observa que los resultados del análisis granulométrico (mostrados en las columnas "% que pasa") se encuentran dentro de los límites especificados en la memoria de cálculo (mostrados en las columnas "Banda de trabajo"), esto para la capa intermedia y la carpeta asfáltica.

Tabla 5.1- Análisis granulométrico de la mezcla de trabajo.

TAMIZ		CAPA INTERMEDIA		CARPETA ASFÁLTICA	
NCH	ASTM	% Que pasa	Banda de trabajo	% Que pasa	Banda de trabajo
20	3/4"	100	100	100	100
12,5	1/2"	75	65-75	85	78-88
10	3/8"	52	44-54	72	66-76
5	N° 4	30	26-36	48	42-52
2,5	N° 8	21	18-26	34	28-36
0,63	N° 30	9	5 -11	21	16 -22
0,315	N° 50	6	2 -8	14	9 -15
0,16	N° 100	4	01-abr	8	5-9
0,08	N° 200	3	0,45-7,5	6	3-0

Fuente: Elaboración propia.

Las tablas siguientes, muestran un resumen de los análisis hechos a la capa intermedia y a la carpeta asfáltica, se indican los valores obtenidos en la mezcla y las especificaciones para los diferentes ensayos aplicados, se observa que los resultados obtenidos mostrados en la columna "Mezcla", cumplen con los parámetros de diseño indicados en la columna "Especificación", esto en la carpeta asfáltica y en la capa intermedia.

Tabla 5.2- Carpeta asfáltica. Características de la mezcla determinadas en la visación.

CONSTANTES FÍSICAS		MEZCLA	ESPECIFICACIÓN
DENSIDAD REAL SECA	kg/m ³	2619	2628 ± 20
DESGASTE DE LOS ÁNGELES	%	12,9	MÁX 25
PARTÍCULAS CHANCADAS	%	92	MÍN 90
PARTÍCULAS LAJEADAS	%	0	MÁX 10

PARÁMETROS MARSHALL		MEZCLA	ESPECIFICACIÓN
DENSIDAD MARSHALL	kg/m ³	2331	2329 ± 20
V.A.M	%	15,5	MÍN 14
FLUIDEZ	mm	13,7	MÍN 8 MÁX 16
ESTABILIDAD	N	10305	MÍN 9000

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 5.3- Capa intermedia. Características de la mezcla determinadas en la visación.

CONSTANTES FÍSICAS		MEZCLA	ESPECIFICACIÓN
DENSIDAD REAL SECA	kg/m ³	2616	2620± 20
DESGASTE DE LOS ÁNGELES	%	11,3	MÁX 35
PARTÍCULAS CHANCADAS	%	88	MÍN 70
PARTÍCULAS LAJEADAS	%	3	MÁX 10

PARÁMETROS MARSHALL		MEZCLA	ESPECIFICACIÓN
DENSIDAD MARSHALL	kg/m ³	2292	2301 ± 20
V.A.M	%	16,2	MÍN 14
FLUIDEZ	mm	13,1	MÍN 8 MÁX 16
ESTABILIDAD	N	8036	MÍN 8000

Fuente: Elaboración Propia

Los análisis hechos a las dos mezclas cumplen en su totalidad con las especificaciones, tanto en las constantes físicas como en los parámetros Marshall.

5.2.- Toma de datos y muestras en terreno (autocontrol y control receptivo)

5.2.1.- Datos extraídos durante el control receptivo

Los datos fueron extraídos desde la carpeta asfáltica y de la capa intermedia, en el contrato "Mejoramiento de la Ruta F-50 sector de Lo Orozco- Quilpué tramo DM- 17.578,35 al DM- 29.497,99 comuna de Quilpué provincia de Marga-Marga Región de Valparaíso" en el mes de Marzo del 2013.



Figura 5.1- Ruta F-50 Lo Orozco-Quilpué.

Fuente: Elaboración propia.

En el proyecto de pavimentación de esta ruta, se contempló pavimentar una extensión de aproximadamente 12 kilómetros de calzada doble, con un ancho de pista de 3,5 m. por lado; aproximadamente 84000 m² por capa. Teniendo en cuenta esto y que los equipos de autocontrol tienen una base no mayor a 0,05 m² en la cual determinan la densidad de la capa, La población de datos asciende a más de $1,7 \times 10^3$ puntos donde se podría determinar la densidad. Se debe tener en cuenta dos factores importantes que juegan en contra al momento de extraer los datos con los equipos de autocontrol.

Primero: al colocar el asfalto en obra, éste experimenta un rápido descenso en su temperatura. La faena de compactación debe ser rápida y por un corto periodo de tiempo, ya que se debe tener en cuenta que la compactación de la capa, debe hacerse mientras ésta se encuentre a una temperatura comprendida entre 110°C y 140°C. Durante este tiempo el equipo utilizado para la faena de compactación se encuentra operando de forma casi ininterrumpida y sólo se detiene el tiempo suficiente para determinar la densidad de autocontrol, lo cual hace que sea muy riesgoso tomar los datos durante esta faena.

Segundo: se debe contar con un operador calificado para operar el densímetro nuclear, el cual se debe hacer responsable del equipo y de todo lo que eso conlleva.

Debido a estos factores se decidió tomar los datos durante el control receptivo de la obra. Este procedimiento no está exento de inconvenientes y peligros ya que el testigo se extrae de un pavimento que está abierto al tráfico y durante el día.

Los datos fueron tomados de la siguiente forma: Se determinó el punto de extracción de testigo de acuerdo a la normativa considerando tomar un testigo cada 1750 m² de pavimento [11], luego se determinó la densidad de un punto utilizando el equipo "densímetro nuclear" mediante el sistema de "retrodispersión" maniobra que tarda aproximadamente 40 segundos, luego de esto y en el mismo punto, se determinó la densidad con equipo PQI utilizando el sistema "single", la maniobra tarda aproximadamente 13 segundos.

Tabla 5.4- Tiempo estimado de operación de equipos de autocontrol.

	EQUIPO NUCLEAR	EQUIPO NO NUCLEAR
INSTALACIÓN DEL EQUIPO (s)	15	10
TIEMPO DE MEDICIÓN (s)	15	3
ALEJARSE DEL EQUIPO (s)	10	0
TOTAL (s)	40	13

Fuente. Elaboración propia.

Finalizada esta operación, se extrajo el testigo del mismo punto donde fue estimada la densidad con ambos equipos y se registró las tres mediciones en una planilla, mientras se produjo la extracción, se tomaron datos con ambos equipos en los alrededores de la muestra, con esto, por cada testigo extraído durante el control receptivo se logró obtener entre 15 y 20 mediciones

con cada equipo, el esquema de la figura siguiente muestra los pasos adoptados en la toma de datos en terreno.

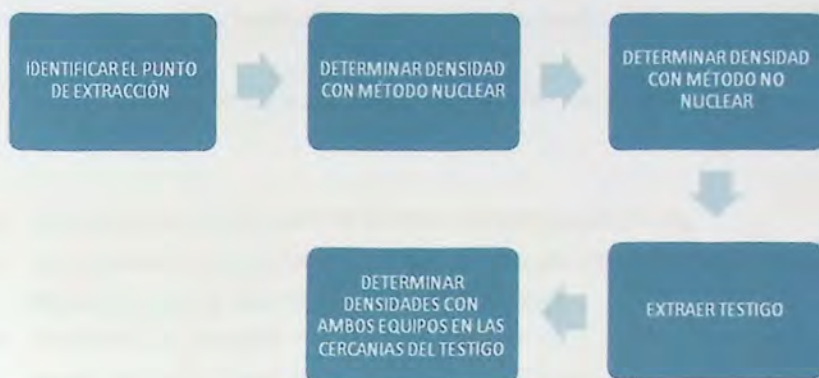


Figura 5.2- Esquema de toma de datos en terreno.

Fuente: Elaboración propia

5.2.2.- Datos para análisis en condiciones de Repetibilidad

Repetibilidad de resultados es la proximidad de concordancia entre los resultados de mediciones sucesivas del mismo mensurando, bajo las mismas condiciones, donde estas condiciones son llamadas condiciones de repetibilidad [12].

Las condiciones de repetibilidad incluyen:

- El mismo procedimiento de medición
- El mismo observador
- El mismo instrumento de medición
- Utilizando las mismas condiciones
- En un mismo lugar
- Repetición en un periodo corto de tiempo

La repetibilidad puede ser expresada en términos de las dispersiones características de los resultados, como por ejemplo la desviación estándar.

Se decidió tomar una serie de densidades para analizar la repetibilidad de los valores medidos. Se determinaron 10 valores de densidad por cada equipo, obtenidos en un mismo punto, sin variar las condiciones y durante un breve periodo de tiempo. El anexo 1 (densidades determinadas en las mezclas) muestra los resultados de estas mediciones.

Para asegurar que los datos tomados tuvieran condición de repetibilidad éstos se tomaron de la siguiente forma:

- 1) Se eligió un punto al azar dentro de la carpeta asfáltica ya compactada.
- 2) Se determinaron 10 densidades de forma consecutiva con densímetro nuclear, sin variar la posición del equipo y registrando los datos en una planilla.
- 3) Inmediatamente terminado el proceso con el densímetro nuclear (aproximadamente 4 minutos) se instaló en el mismo punto, el PQI-380 realizando el mismo proceso de medición y registrando la misma cantidad de mediciones.

Se realizó el mismo procedimiento en 10 puntos diferentes de la carpeta asfáltica y se calcularon las medidas de dispersión como la desviación estándar y el rango de los datos.

5.3.- Comparación de método no nuclear y método nuclear

Durante el desarrollo de este trabajo de título, se pudo comparar en terreno ambos métodos de autocontrol, detectando ventajas del PQI con respecto al densímetro nuclear, sobre todo en la manipulación del equipo y seguridad, se contrastaron 8 aspectos.

Peso del equipo.

- El equipo PQI pesa aproximadamente 7 kg
- El densímetro nuclear pesa cerca de 13 kg.

Tiempos de medición en capa asfáltica.

- El equipo PQI, en una capa asfáltica, realiza estimaciones de densidad en modo "Single" en 3 segundos.
- El equipo densímetro nuclear realiza mediciones en modo "retrodispersión" en 15 segundos.

Transporte.

- El equipo PQI puede ser transportado en la cabina de una camioneta sin problemas ya que no reviste riesgo para la salud.
- El densímetro nuclear, debe ser transportado en el pick up de la camioneta, bien sujeto para evitar daño o hurto.

Requisitos para almacenamiento

- El equipo PQI no necesita de condiciones especiales para su almacenamiento.
- El densímetro nuclear necesita de condiciones especiales para ser almacenado, debe cumplir con las disposiciones legales establecidas y estar debidamente autorizada por la autoridad sanitaria. Algunos requisitos son:
 - o Recinto de hormigón o albañilería, exclusivo para el almacenamiento del equipo, además debe estar alejado al menos 5 m de cualquier otra instalación.
 - o Debe estar señalizado con letreros que indique "peligro material radiactivo, solo personal autorizado".
 - o Mientras no se esté utilizando, el equipo debe estar almacenado en su bodega bajo llave.

Requisitos para el operador

- El operador del PQI no necesita de permisos especiales para operar este equipo.
- Se deberá contar con operadores autorizados de equipos densímetros nucleares, acreditando curso aprobado por una Institución reconocida por la Autoridad Sanitaria.

Documentación para almacenamiento, traslado y operación.

- El equipo PQI no necesita de ningún tipo de documentación ni condiciones especiales para su almacenamiento, traslado y operación.
- El densímetro nuclear necesita de permisos especiales otorgados por la autoridad sanitaria, y condiciones especiales para ser almacenado, operado y trasladado.

Riesgo para la salud.

- El equipo PQI efectúa mediciones sin riesgo para la salud.
- El equipo densímetro nuclear, al operar mediante radiación ionizante reviste riesgo para el operador, por lo cual éste debe portar un dosímetro para evaluar la exposición a la radiación.

Término de la vida útil

- El equipo PQI no tiene requisitos especiales para ser desechado.
- El destino de la fuente radioactiva desechada es el Centro de Estudios Nucleares de la Comisión Chilena de Energía Nuclear, ubicado en la comuna de La Reina.

6.- Análisis estadístico de los datos obtenidos en terreno

La figura siguiente ilustra el análisis estadístico que se hizo a los datos tomados en terreno con los tres métodos de control de densidad. Se tomaron datos en condición de repetibilidad en la carpeta asfáltica, y datos en las proximidades de los testigos extraídos durante el control receptivo, como indica los puntos 5.2.1 y 5.2.2 de este documento. Se estudió la dispersión de los datos tomados en condición de repetibilidad, y se utilizó la teoría de la inferencia estadística, para analizar los datos tomados durante el control receptivo.

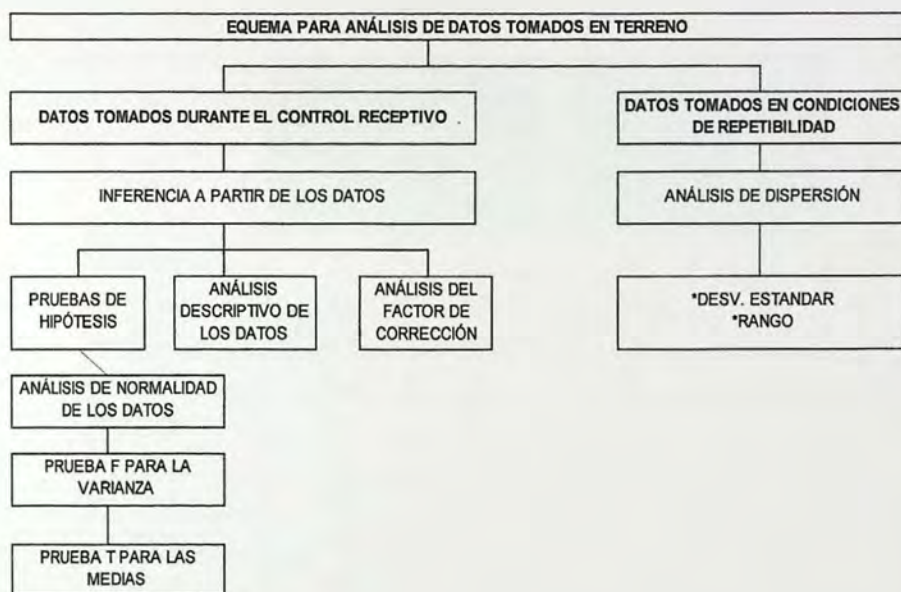


Figura 6.1- Esquema para análisis de los datos tomados en terreno.

Fuente: Elaboración propia

6.1.- Análisis de los datos tomados en condiciones de repetibilidad

Se analizaron los datos tomados con el "Método nuclear" y el "Método no nuclear" en condiciones de repetibilidad, se calcularon las medidas de dispersión como la desviación estándar y el rango de las densidades determinadas en cada punto (tabla 6.1), con el propósito de conocer las características de los datos.

La densidad de la carpeta asfáltica no varía de un momento a otro, por lo que no debió haber dispersión en las densidades medidas en cada punto. Los valores de densidad obtenidos en terreno en condiciones de repetibilidad se muestran en el anexo 1.

Tabla 6.1- Desviación estándar y rango de las densidades tomadas en condición de Repetibilidad.

	DESVIACIÓN. ESTANDAR (adimensional)		RANGO (kg/m ³)	
	MÉTODO NUCLEAR	MÉTODO NO NUCLEAR	MÉTODO NUCLEAR	MÉTODO NO NUCLEAR
PUNTO 1	7,7	0,7	21	2
PUNTO 2	42	0,7	101	2
PUNTO 3	35,4	0,3	130	1
PUNTO 4	26,4	0	96	0
PUNTO 5	58,7	0,7	101	2
PUNTO 6	39,1	0	121	0
PUNTO 7	32,6	0,5	89	1
PUNTO 8	29,2	0	101	2
PUNTO 9	42,7	0,5	144	1
PUNTO 10	49,3	0,5	161	1
PROMEDIO	36,3	0,4	106,5	1,2

Fuente: Elaboración propia

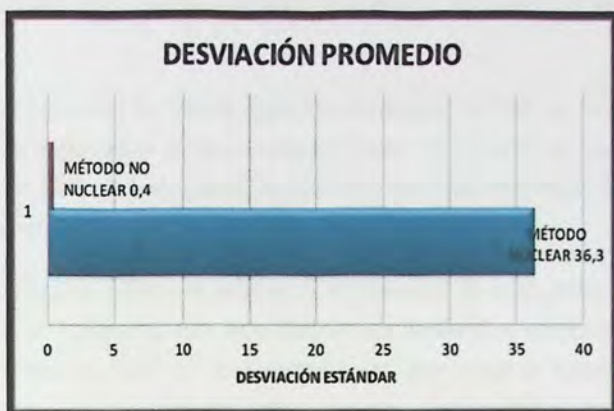


Figura 6.2- Desviación promedio de los grupos de datos en condiciones de repetibilidad.

Fuente: Elaboración propia



Figura 6.3- Rango promedio de los grupos de datos en condiciones de repetibilidad.

Fuente: Elaboración propia

El método nuclear arrojó una desviación estándar promedio de 36,3 en los 10 puntos analizados dentro de la carpeta asfáltica, mientras que en el método no nuclear, ésta resultó ser de 0,4 lo indica que las densidades medidas con el método nuclear, se encuentran más dispersos con respecto a la media, esto se reafirma al observar el rango de densidades determinadas. El método nuclear presenta un rango promedio de $106,5 \text{ kg/m}^3$ (4,57% promedio de error aleatorio), mientras que el método no nuclear; un rango promedio de $1,2 \text{ kg/m}^3$ (0,05% de error aleatorio).

Esto probablemente se puede explicar, comparando el funcionamiento teórico de cada equipo.

En el método nuclear los fotones siguen una trayectoria aleatoria, por lo que es improbable que el recorrido de éstos sea el mismo en cada estimación de densidad que se haga. Además de esto, la mezcla asfáltica es heterogénea, lo que hace aun más improbable que la cantidad de fotones dispersados sea la misma.

En el método no nuclear la estimación de densidad se hace midiendo la impedancia eléctrica del material, y utilizando ésta, en el cálculo de la densidad de la mezcla. Las propiedades eléctricas del material no varían de un momento a otro, por lo que la impedancia no presenta mayores variaciones. Esto hace que este método sea mucho más confiable que el método nuclear. Las densidades determinadas por estos dos métodos se muestran en el anexo 1.

6.2.- Análisis de datos tomados durante el control receptivo

6.2.1.- Determinación del factor de corrección

Los resultados que arrojan los métodos "Nuclear" y "No nuclear" son relativos, por esto, para convertir las densidades relativas en densidades reales se debió establecer un factor de corrección el cual se introduce en el equipo a fin de corregir las densidades relativas determinadas y transformarlas en densidades reales; ello mediante mediciones con equipo PQI-380 y densímetro nuclear, comparadas con densidades de testigos extraídos de la misma ubicación, seleccionada al azar. El método recomienda utilizar el promedio de la densidad de por lo menos siete testigos, y sus correspondientes mediciones de densidad con método "Nuclear" y "No nuclear"

Se determinó dicho factor para la carpeta asfáltica, con los testigos extraídos del control receptivo, y sus correspondientes densidades determinadas con los métodos de autocontrol (tabla 6.2).

Tabla 6.2- Densidades tomadas en terreno para establecer el factor de corrección en los equipos de autocontrol.

DENSIDADES PARA FACTOR DE CORRECCIÓN EN CARPETA ASFÁLTICA (kg/m ³)					
PUNTO	NUCLEAR	NO NUCLEAR	TESTIGO	DIFERENCIA CON TESTIGO	
	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	TESTIGO-NUCLEAR	TESTIGO-NO NUCLEAR
	(C)	(B)	(A)	(A-C)	(A-B)
1	2117	2166	2283	166	117
2	2163	2182	2283	120	101
3	2141	2182	2298	157	116
4	2110	2154	2306	196	152
5	2072	2160	2316	244	156
6	2115	2157	2285	170	128
7	2128	2263	2289	161	26
8	2147	2154	2295	148	141
9	2174	2160	2310	136	150
10	2275	2155	2249	-26	94
11	2364	2161	2262	-102	101
12	2256	2147	2257	1	110
13	2128	2160	2280	152	120
14	2133	2145	2295	162	150
15	2155	2137	2264	109	127
16	2144	2163	2210	66	47

FACTOR DE CORRECCIÓN	153	126
MÁXIMO	244	156
MÍNIMO	-102	94
RANGO	346	62

Fuente: Elaboración propia.

Se puede ver en la gráfica (Fig. 6.4), que la diferencia entre las densidades obtenidas por el método "No nuclear" y "Testigos", presenta una marcada tendencia manteniendo una diferencia casi constante, sin embargo se escapan los puntos 7 y 16 (valores mostrados en amarillo en la tabla 6.2). Por otro lado, la diferencia entre las densidades medidas con método "Nuclear" y las densidades obtenidas con "Testigos" se observa que los puntos 10, 11 y 12 se alejan de la tendencia (Fig. 6.4).

La gráfica siguiente muestra la diferencia de las densidades "Testigo-Autocontrol" en la carpeta asfáltica. Los datos graficados corresponden a la tabla 6.2

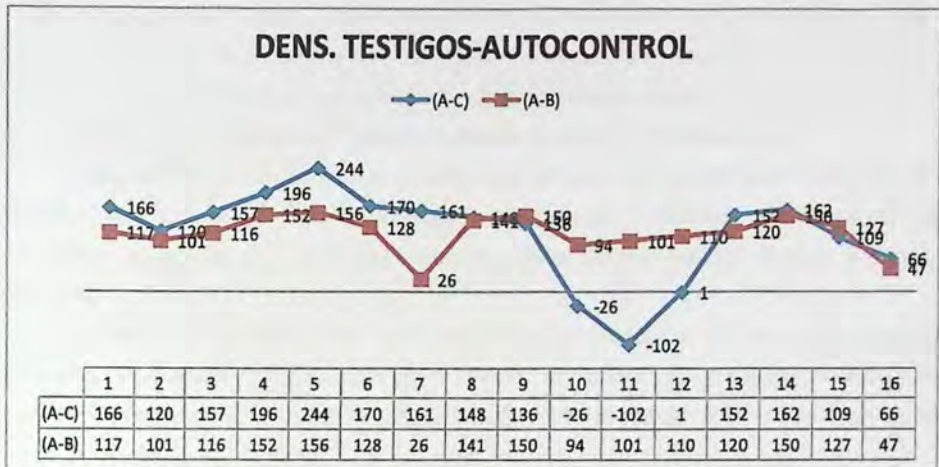


Figura 6.4- Diferencia entre densidad de testigo y método de autocontrol en la carpeta asfáltica.

Fuente: Elaboración propia.

Se determinó el factor de corrección (153 kg/m^3) para las densidades medidas en la carpeta asfáltica con el equipo densímetro nuclear, utilizando 13 de los 16 testigos extraídos en el control receptivo, se eliminaron los puntos 10, 11 y 12 de la variable "Testigo- Nuclear" (A-C) ya que se escapan de la tendencia. Este factor se sumó a la densidad determinada con el equipo, para transformarla en densidad real.

Se estableció el factor de corrección (126 kg/m^3) para las densidades medidas en la carpeta asfáltica con el equipo PQI-380 mostrado como variable "Testigo-No nuclear" (A-B) se eliminaron los puntos 7 y 16 ya que no formaban parte de la tendencia, el factor se sumó a la densidad determinada con el equipo PQI transformando los valores en densidad real.

No fue posible establecer un factor de corrección para la capa intermedia, debido a que la carpeta asfáltica se encontraba puesta en terreno, lo que impidió obtener valores con los equipos de autocontrol en dicha capa. Los valores de densidad tomados en terreno se encuentran en el anexo 1.

6.2.2.- Análisis descriptivo

En primera instancia se realizaron estadísticas descriptivas con el propósito de conocer las características de las muestra y tener una primera impresión sobre el comportamiento de las variables. Las tablas A1.2 , A1.3 y A1.4 del anexo 1 muestran las densidades determinadas en terreno de la carpeta asfáltica y la capa intermedia, con "Método nuclear", "Método no nuclear" y las densidades determinadas a los "Testigos" extraídos durante el control receptivo

Para los efectos de las tablas y gráficos mostrados en los numerales 6.2 y 6.3, se consideró lo siguiente: La variable "Testigos" muestran los parámetros estadísticos de las densidades determinadas a los testigos extraídos de la carpeta asfáltica durante el control receptivo.

La variable "No nuclear", muestra los parámetros estadísticos de los datos compensados, obtenidos con el equipo PQI-380 mediante el "Método no nuclear" en la carpeta asfáltica, y la variable "Nuclear"; los de los datos compensados obtenidos con densímetro nuclear mediante el "método nuclear".

Se muestra en la tabla 6.3 las medidas de dispersión y de tendencia central de las densidades obtenidas con los tres métodos de control de densidad, en la carpeta asfáltica y la capa intermedia.

Tabla 6.3- Estadística descriptiva de los datos tomados en control receptivo.

ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS	CARPETA ASFÁLTICA			CAPA INTERMEDIA		
	Testigos	No nuclear	Nuclear	Testigos	No nuclear	Nuclear
Promedio (kg/m ³)	2280	2271	2302	2293	2112	2040
Desviación estándar.	26,76	24,7	47,62	22,42	21,93	62,67
Varianza	715,98	610,18	2267,66	502,53	481,07	3927,90
Máximo (kg/m ³)	2316	2358	2434	2329	2160	2349
Mínimo (kg/m ³)	2210	2197	2176	2256	2048	1923
Numero de datos	16	223	224	16	255	255

Fuente: Elaboración propia.

Descriptivamente a través de la tabla precedente, se observa que los datos de la variable "Nuclear", se encuentran más dispersos respecto al promedio, en comparación con las variables "Testigos" y "No nuclear", tanto en la carpeta asfáltica como en la capa intermedia.

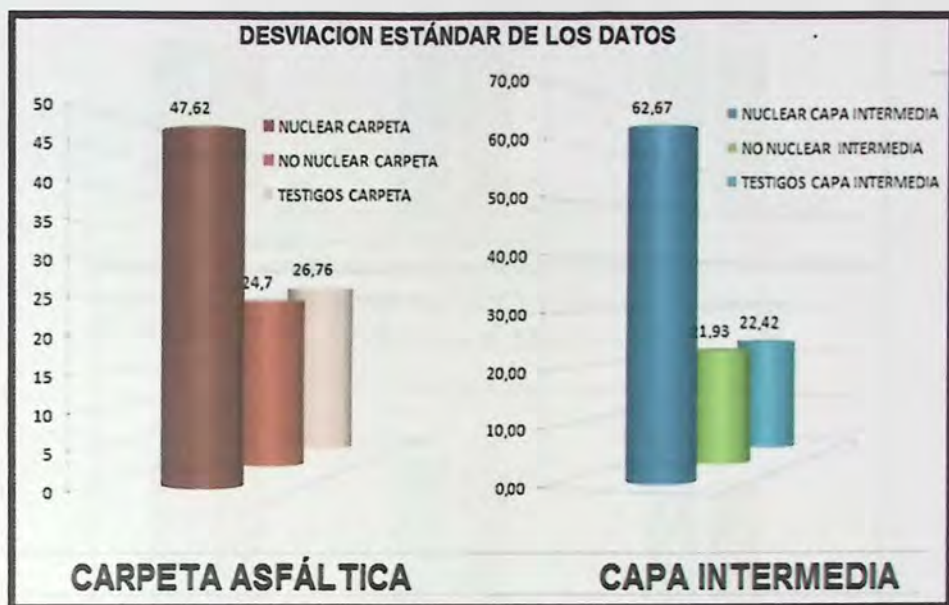


Figura 6.5- Desviación estándar de los datos tomados con los métodos de control de densidad en la carpeta asfáltica y la capa intermedia.

Fuente: Datos tomados en terreno.

Analizando la desviación estándar de los datos, se infiere en primera instancia que las variables "No nuclear" y "Testigos", presentan menor diferencia entre sí en ambas mezclas (fig. 6.5), sin embargo, la variable "Nuclear" presenta mayor dispersión con respecto a la media en ambas mezclas, lo cual se ratifica al observar los rangos de densidad medidos (fig. 6.6).

Se observó en los resultados del análisis, que las densidades determinadas con el método nuclear, presentan rangos de medición mayores con respecto a los otros dos métodos, presentando un rango de densidades medido de casi 6 veces mayor que la variable "Testigos", (426 contra 73) y casi 4 veces mayor que la de la variable "No nuclear" en la capa intermedia (112 contra 426) lo que se puede ver en la figura 6.6.



Figura 6.6- Rangos de densidad determinados a la carpeta asfáltica.

Fuente: Datos tomados en la carpeta asfáltica

La figura 6.7 muestra gráficamente los promedios de las densidades medidas en la carpeta asfáltica y la capa intermedia, para las variables Nuclear, No nuclear y Testigos. Se observa una diferencia entre las medias de las variables No nuclear y Nuclear de 9 y 22 kg/m³ respectivamente, con respecto a la media de la variable Testigos, en la carpeta asfáltica. En la capa intermedia la diferencia es mayor, debido a que no fue posible establecer el factor de corrección.

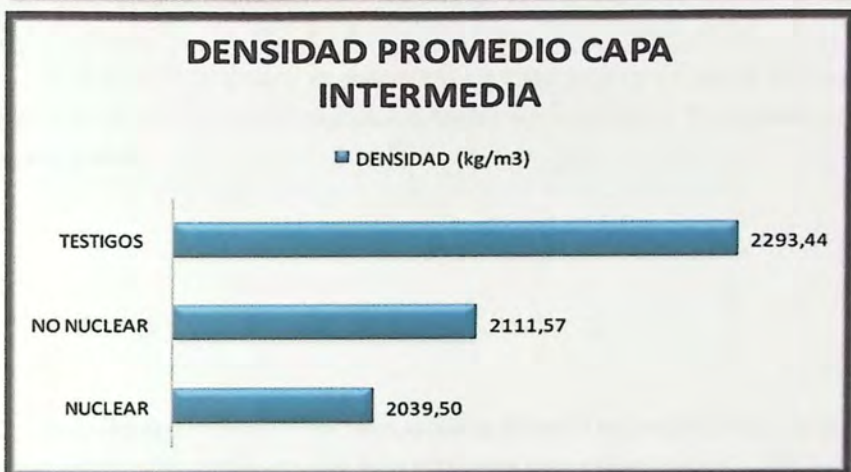
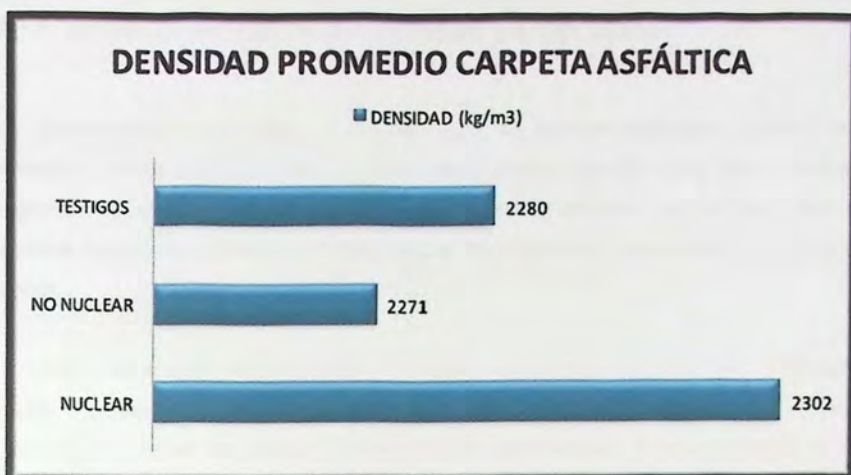


Figura 6.7- Promedios de densidad determinados a la carpeta asfáltica y en la capa intermedia por los métodos de autocontrol y densidades determinadas a testigos.

Fuente: Datos tomados en la carpeta asfáltica

Se concluye del análisis descriptivo que las variables No nuclear y Testigos, en las dos capas tienen medidas de dispersión cercanas, en torno a 26 en la carpeta asfáltica y 22 en la capa intermedia, lo cual no sucede con la variable Nuclear, ésta presenta desviaciones de 47 y 63 respectivamente.

6.3.- Análisis de los datos con pruebas de hipótesis

Las pruebas de hipótesis son procedimientos de decisión estadístico, basados en datos que puedan producir una conclusión acerca de algún sistema científico [13]. No es posible saber con absoluta certeza la verdad o falsedad de una prueba de hipótesis, ya que para estar seguros se debiera estudiar la población completa lo que en la mayoría de los casos es prácticamente imposible.

Éstas se pueden clasificar como "Pruebas de hipótesis paramétricas" y "Pruebas de hipótesis no paramétricas", su aplicación depende de la normalidad de los datos. Si éstos siguen una distribución normal, es correcto aplicar pruebas paramétricas, si no es el caso, se aplican pruebas No paramétricas.

En esta parte del trabajo, se compararon los datos tomados en terreno de acuerdo al numeral 5.2.1 de este documento, se analizó la normalidad de los datos a fin de establecer el tipo de prueba a aplicar.

6.3.1- Análisis de normalidad de datos

Se analizó la normalidad de los datos aplicando la prueba no paramétrica de "Kolmogorov-Smirnov" (prueba para variable con más de 50 datos) para las variables "Nuclear" y "No nuclear", y la prueba de "Shapiro Willk" (prueba para variable con menos de 50 datos) para la variable "Testigos", éstas comprueban el grado de ajuste de la variable en estudio, a la distribución normal.

Se utilizó el programa estadístico "SPSS Statistics 17.0". Las pruebas se hicieron a un nivel de significación $\alpha=0,05$ y las hipótesis planteadas fueron.

H_0 : La evidencia muestra que los datos siguen una distribución normal

H_1 : Se cuenta con información suficiente para decir que los datos no siguen una distribución normal.

Se acepta la hipótesis nula (H_0) para todo "P valor" mayor que 0,05.

La tabla 6.4 muestra que los P-valor obtenidos de las pruebas de normalidad en la carpeta asfáltica y la capa intermedia son mayores que 0,05, por lo que se acepta la hipótesis nula, esto quiere decir que la evidencia muestra que los datos siguen una distribución normal, por lo tanto se puede analizar éstos mediante pruebas paramétricas.

Tabla 6.4- Prueba de normalidad aplicada a los grupos de densidades tomadas a la carpeta asfáltica y a la capa intermedia.

CAPA	Método de control	Valor estadístico	N° de datos	P valor.	Prueba aplicada
CARPETA ASFÁLTICA	NUCLEAR	0,771	214	0,592	Kolmogorov-Smirnov
	NO NUCLEAR	1,158	223	0,137	Kolmogorov-Smirnov
	TESTIGOS	0,92	16	0,167	Shapiro- Willk
CAPA INTERMEDIA	NUCLEAR	0,583	239	0,886	Kolmogorov-Smirnov
	NO NUCLEAR	0,611	255	0,85	Kolmogorov-Smirnov
	TESTIGOS	0,958	16	0,623	Shapiro- Willk

Fuente: Análisis de datos con programa SPSS

La figura 6.8 muestra una grafica P-P para las densidades medidas en la carpeta asfáltica y la capa intermedia por "Método nuclear" y "Método no nuclear". Ésta, es una gráfica probabilística que muestra el grado de ajuste de la variable a la distribución de probabilidad normal, el valor de probabilidad esperado se muestra en la abscisa, y el valor de probabilidad observado se muestra en la ordenada.

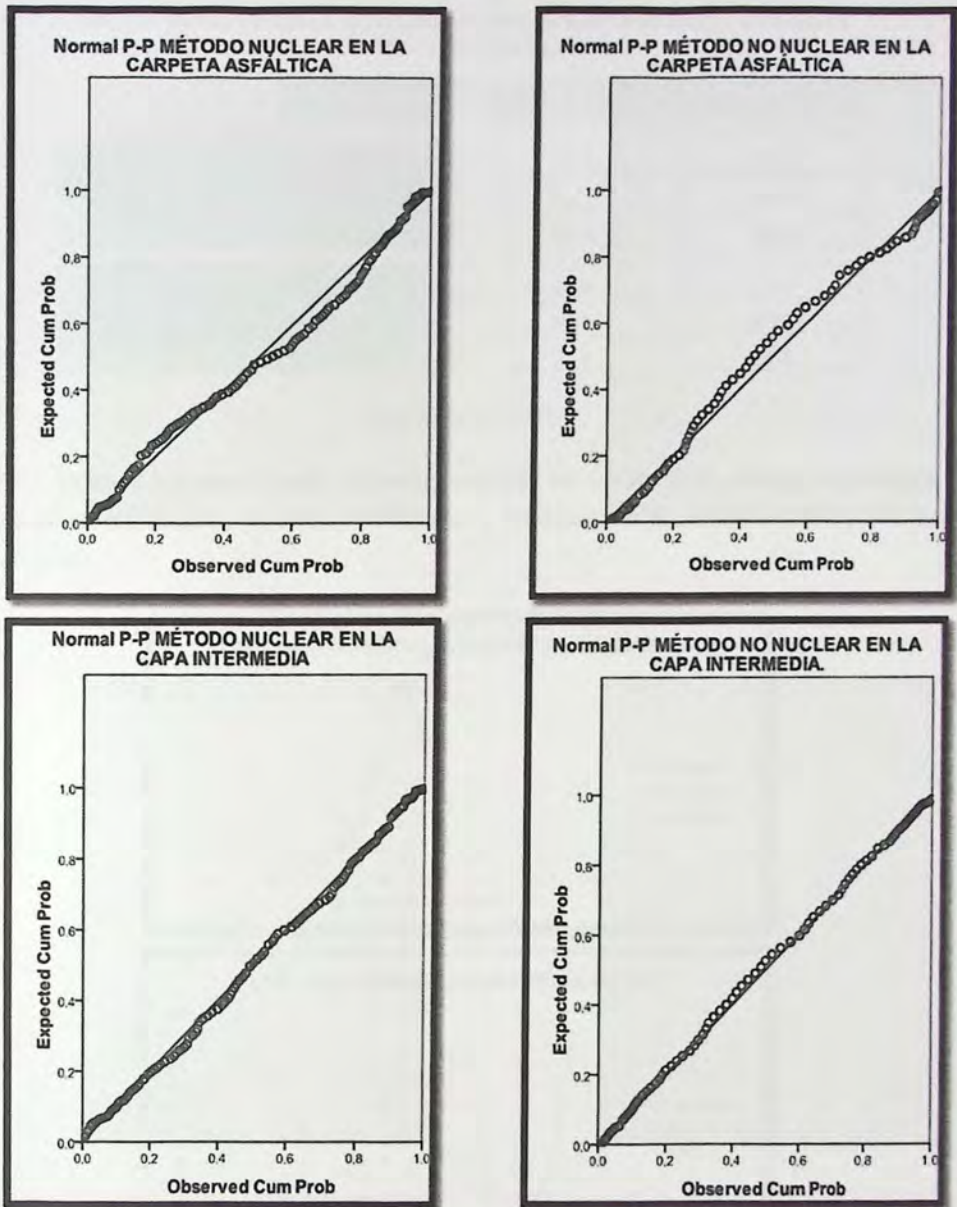


Figura 6.8- Gráfico P-P de los datos tomados con el método nuclear y no nuclear en la carpeta asfáltica y capa intermedia.

Fuente: Datos analizados con software SPSS statistics 17.0

Se graficaron las curvas normales de cada variable utilizando el programa Microsoft Excel, en base a los parámetros determinados en las tres variables (tabla 6.5)

Tabla 6.5- Medias y desviaciones estándar de las densidades determinadas en la carpeta asfáltica y capa intermedia.

	VARIABLE	DESV. ESTANDAR	MEDIA (kg/m ³)
CARPETA ASFÁLTICA	NUCLEAR	47,6	2302
	NO NUCLEAR	22,7	2271
	TESTIGOS	26,8	2280
CAPA INTERMEDIA	NUCLEAR	21,9	2111
	NO NUCLEAR	62,7	2039
	TESTIGOS	22,4	2293

Fuente: Elaboración propia.

La figura siguiente muestra las curvas normales, en función de la media y la desviación estándar de las variables "Nuclear", "No nuclear" y "Testigos", en la carpeta asfáltica y la capa intermedia.

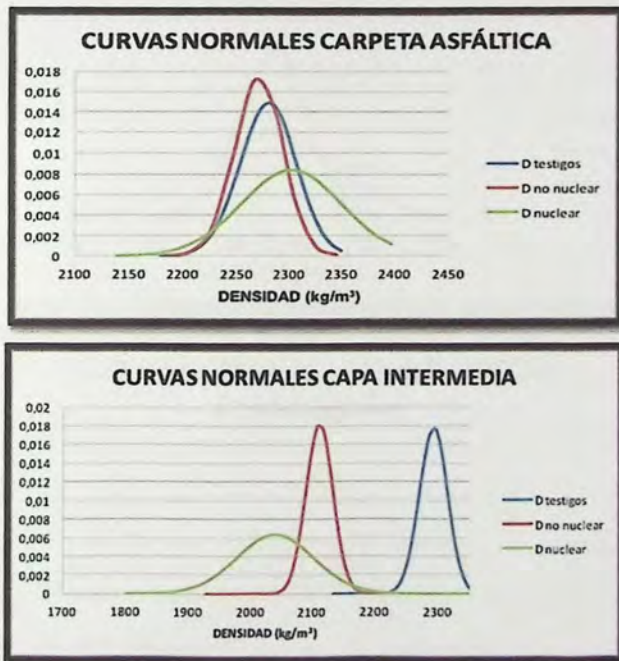


Figura 6.9- Curvas normales graficadas según los datos tomados en la carpeta asfáltica y capa intermedia.

Fuente: Elaboración propia

Las curvas normales de las variables "No nuclear" y "Testigos" son similares, ya que tienen desviaciones estándar parecidas, sin embargo, en la capa intermedia se observa un desfase entre las crestas de las tres variables, debido a la falta de un factor de corrección.

La curva de la variable "Nuclear" difiere claramente, mostrando una desviación estándar de casi el doble que las otras dos variables lo cual se manifiesta en una curva menos pronunciada.

La figura 6.10 muestra el caso hipotético en que las medias de las tres variables son iguales, se puede ver que las curvas de la variable "Testigos" y "No nuclear" son similares, esto se hace más notorio en las curvas de la capa intermedia, sin embargo en las dos capas la curva normal de la variable nuclear es menos pronunciada debido a la mayor desviación de los datos.

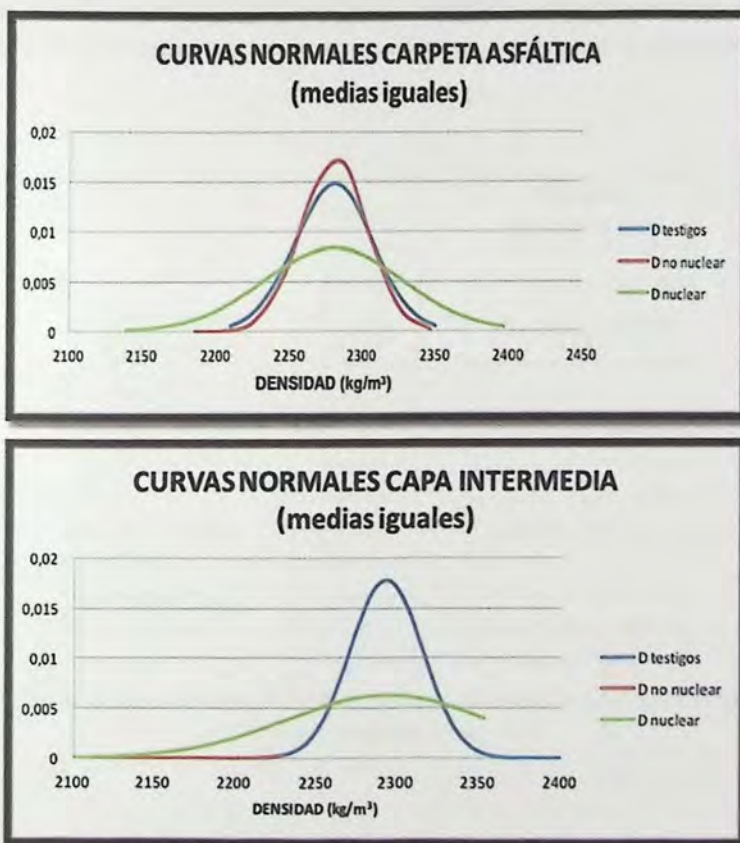


Figura 6.10- Curvas normales con medias iguales, para las variables "Testigos", "No nuclear" y "Nuclear" en la carpeta asfáltica y capa intermedia.

6.3.2.- Análisis de los datos con pruebas de hipótesis

La literatura indica que cuando se desea comparar dos poblaciones normalmente distribuidas, es necesario comparar sus centros (medias) y su variación (desviación estándar o varianza) [14]. Para estos dos parámetros existen distintas hipótesis.

El análisis de datos realizado en este trabajo, mediante prueba F para la varianza y prueba T para comparación de medias, está basado íntegramente en lo establecido en el Manual de Carreteras volumen 8 numeral 8.003.11³

Se formaron 4 grupos enfrentando las densidades obtenidas con los métodos de autocontrol y las densidades determinadas a los testigos extraídos en el control receptivo (Fig. 6.11)

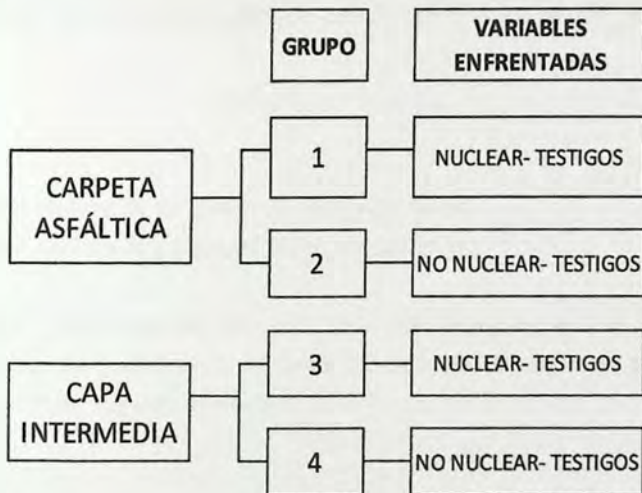


Figura 6.11- Grupos de datos formados para análisis mediante estadística descriptiva y pruebas de hipótesis.

Fuente: Elaboración propia

³ Manual de carreteras Volumen 8, numeral 8.003.11 "Método de comparación de ensayos de control de calidad y criterios de aceptación y rechazo"

6.3.2.1.- Prueba F para la varianza

El propósito de esta prueba es determinar a un nivel de significación (α) si la diferencia en la variabilidad de los datos tomados con los equipos de autocontrol y control receptivo es mayor que la que se podría esperar que ocurriera por azar si ellas provienen de la misma población [14]. En este caso no importa cual varianza es mayor, al finalizar la prueba se puede llegar a uno de los siguientes resultados.

- Los dos conjuntos de datos tienen diferentes varianzas debido a que la diferencia entre los dos conjuntos de resultados es mayor que la que probablemente ocurra por azar si sus varianzas son realmente iguales.
- No hay razón para pensar que las varianzas son diferentes ya que la diferencia no es tan grande como la que es probable que ocurra por azar si las varianzas son realmente iguales.

Primero, se calcularon las varianzas (desviación estándar al cuadrado) de los datos tomados con los dos métodos enfrentados, de acuerdo al procedimiento, luego se calculó el valor estadístico F (Ec. 3), teniendo en consideración que la varianza mayor se debe poner numerador.

$$F = \frac{s_1^2}{s_2^2} \quad (\text{Ec.3})$$

Dónde.

S_1^2 : Mayor varianza de los grupos de datos a contrastar

S_2^2 : Menor varianza de los grupos de datos a contrastar

Se eligió el grado de significación ($\alpha=0,05$), lo que nos indica que el resultado obtenido al aplicar esta prueba, tiene un nivel de confianza del 95%. Se calcularon los grados de libertad asociados a S_1 como (n_1-1) y a S_2 como (n_2-1)

Donde:

n_1 : Numero de datos asociados al grupo con varianza S_1^2

n_2 : Numero de datos asociados al grupo con varianza S_2^2

Se enfrentaron las densidades determinadas con los métodos de autocontrol y las densidades determinadas a los testigos extraídos durante el control receptivo. Se comprobó si existe diferencia significativa entre las varianzas de éstos aplicando la prueba F .

Se calculó el valor estadístico F y se determinó de la tabla A3.1 del anexo 3, el valor de F_{crit} usando los grados de libertad asociados a cada conjunto de datos para un valor de significación $\alpha=0,05$.

Se concluyó la prueba de comparación de varianzas de acuerdo al siguiente criterio.

- Si $F > F_{crit}$ entonces los dos conjuntos de datos tienen una variabilidad significativamente diferente
- Si $F < F_{crit}$ entonces no hay razón para pensar que las variabilidades son significativamente diferentes

La tabla 6.6 y muestra los parámetros de la capa intermedia y la carpeta asfáltica, necesarios para aplicar las pruebas de hipótesis F de comparación de varianzas, y la prueba T de comparación de medias utilizada más adelante.

Tabla 6.6- Parámetros determinados a las densidades obtenidas por los métodos de control de densidad en la carpeta asfáltica y la capa intermedia, necesarios para la aplicación de pruebas de hipótesis.

	MÉTODO	varianza S^2	media (kg/m ³) \bar{x}	Nº de datos n
CARPETA ASFÁLTICA	NUCLEAR	2267,66	2302	224
	NO NUCLEAR	610,18	2271	223
	TESTIGOS	715,98	2280	16
CAPA INTERMEDIA	NUCLEAR	3927,98	2039	255
	NO NUCLEAR	481,07	2112	255
	TESTIGOS	502,53	2293	16

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos tomados en terreno

La tabla 6.7 muestra los resultados de la aplicación de la prueba F a los 4 grupos de datos enfrentados, tomados en la carpeta asfáltica y la capa intermedia, para un valor de significación $\alpha=0,05$

Tabla 6.7- Resultados prueba de hipótesis "F" de comparación de varianzas.

GRUPO	CAPA	VARIABLES ENFRENTADAS	F^*	F_{crit}	DIFERENCIA SIGNIFICATIVA ENTRE LOS GRUPOS DE DATOS COMPARADOS
1	Carpeta Asfáltica	NUCLEAR - TESTIGOS	3,17	2,46	SÍ
2		NO NUCLEAR - TESTIGOS	1,17	1,85	NO
3	Capa intermedia	NUCLEAR - TESTIGOS	7,81	2,46	SÍ
4		NO NUCLEAR - TESTIGOS	1,04	1,83	NO

*valor estadístico calculado con la ecuación 3

Fuente: Elaboración propia.

La aplicación de la prueba de hipótesis para la varianza arrojó datos concluyentes.

- Sí existe diferencia significativa entre las varianzas de las densidades determinadas a los TESTIGOS extraídos en el control receptivo de la obra, y las densidades determinadas con el MÉTODO NUCLEAR, tanto en la carpeta asfáltica como en la capa intermedia (grupos 1 y 3).
- No existe diferencia significativa entre las varianzas de las densidades determinadas a los TESTIGOS extraídos en el control receptivo de la obra, y las densidades determinadas con el MÉTODO NO NUCLEAR, tanto en la carpeta asfáltica como en la capa intermedia (Grupos 2 y 4).

6.3.2.2.- Prueba T para la media

El objetivo de esta prueba es determinar si es razonable suponer que las densidades determinadas con los equipos de autocontrol, provienen de la misma población que las densidades determinadas a los testigos.

El método de análisis consiste básicamente en comparar el valor estadístico t determinado con las ecuaciones 5 o 6 (según corresponda al caso a o b), y comparar éste, con un valor t_{crit} , tabulado en la tabla A3.2 del anexo 3, de acuerdo a los grados de libertad de los datos, y al nivel de significación utilizado para la prueba ($\alpha=0,05$).

El problema se aborda de 2 formas diferentes, dependiendo de si las varianzas de los grupos a contrastar son iguales o no (determinado en el punto anterior con la prueba F).

Caso A) Si las varianzas son iguales, entonces la prueba-T se realiza usando una varianza combinada y también un grupo combinado de grados de libertad.

Estimación ponderada de la varianza

$$S_p^2 = \frac{S_1^2(n_1-1) + S_2^2(n_2-1)}{n_1+n_2-2} \quad (\text{Ec. 4})$$

Valor estadístico "t" (caso A)

$$t = \frac{|\bar{X}_1 - \bar{X}_2|}{\sqrt{S_p^2 \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)}} \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde

\bar{X}_1 : Media de las densidades tomadas con el equipo de autocontrol (kg/m^3)

\bar{X}_2 : Media de las densidades determinadas a los testigos (kg/m^3)

S_1^2 : Varianza de las densidades tomadas con el equipo de autocontrol.

S_2^2 : Varianza de las densidades determinadas a los testigos.

n_1 : Numero de densidades tomadas con el equipo de autocontrol.

n_2 : Numero de densidades determinadas a los testigos.

S_p^2 : Estimación ponderada de la varianza.

Se calcula el valor estadístico t , de acuerdo a la ecuación 5, y se determina el valor de t_{crit} de acuerdo a los grados de libertad de combinados ($n_1 + n_2 - 2$), y el nivel de significación elegido ($\alpha=0,05$) según la tabla A3.1 del anexo 3. Una vez determinados t y t_{crit} se concluye de acuerdo al siguiente criterio.

- si $t \geq t_{crit}$, entonces los dos conjuntos de densidades tienen medias significativamente diferentes.

- si $t < t_{crit.}$, no existe razón para pensar que las dos medias sean significativamente diferentes.

Caso B) Si las muestras tienen distinta varianza, entonces la prueba-T se realiza usando varianzas individuales, tamaños de muestras individuales y un grado de libertad efectivo f' (estimado a partir de las varianzas y el tamaño de las muestras). Esta variante se presenta como caso 2

Valor estadístico " t " (caso B)

$$t = \frac{|\bar{X}_1 - \bar{X}_2|}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}} \quad (\text{Ec. 6})$$

Grados de libertad efectivos " f' "

$$f' = \frac{\left(\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2} \right)}{\left(\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2} \right) \left(\frac{1}{n_1 + 1} + \frac{1}{n_2 + 1} \right)} - 2 \quad (\text{Ec. 7})$$

Donde

\bar{X}_1 : Media de las densidades determinadas con el equipo de autocontrol (kg/m^3).

\bar{X}_2 : Media de las densidades determinadas a los testigos (kg/m^3).

S_1^2 : varianza de las densidades tomadas con el equipo de autocontrol.

S_2^2 : Varianza de las densidades determinadas a los testigos.

n_1 : Numero de densidades tomadas con el equipo de autocontrol.

n_2 : Numero de densidades determinadas a los testigos.

La figura siguiente muestra de forma esquemática la información de los grupos de datos enfrentados; la capa de la cual éstos provienen, los resultados de la prueba de comparación de varianzas aplicado a cada grupo y el tipo de caso utilizado para la aplicación de la prueba T según el resultado de la prueba F .

PRUEBA DE HIPÓTESIS T DE COMPARACIÓN DE MEDIAS



Figura 6.12- Tipo de caso prueba T según resultado de prueba F, para contraste de método de autocontrol-testigos en carpeta asfáltica y capa intermedia.

Fuente: Elaboración propia

Se calculó el valor estadístico t de acuerdo a la ecuación 5 o 6, según caso A) o B). Para la elaboración de la siguiente tabla, se utilizaron los datos de la tabla 6.6 para el cálculo de los parámetros indicados en las tablas 6.8 y 6.9, se determinó el valor de t_{crit} según la tabla A3.2 del anexo 3, de acuerdo numero efectivo de grados de libertad (f) y al nivel de significación elegido para la prueba ($\alpha=0,05$).

Una vez determinado t_{crit} se concluyó de acuerdo al siguiente criterio.

- si $t \geq t_{crit}$, entonces los dos conjuntos de densidades tienen medias significativamente diferentes.
- si $t < t_{crit}$, no existe razón para pensar que las dos medias sean significativamente diferentes.

La tabla siguiente muestra los resultados de la prueba de hipótesis T de comparación de medias, realizado a los grupos 2 y 4, en la cual se contrastan las variables "No nuclear" y "Testigos" en la carpeta asfáltica, y la capa intermedia.

Tabla 6.8- Determinación de parámetros t y t_{crit} para varianzas iguales (Caso a).

GRUPO	CAPA	CASO	MÉTODOS ENFRENTADOS	α	S_p	n_1+n_2-2	t	t_{crit}	DIFERENCIA DE MEDIAS
2	CARPETA ASFÁLTICA	A	NO NUCLEAR-TESTIGOS	0,05	616,6	241	1,40	1,97	NO
4	CAPA INTERMEDIA	A	NO NUCLEAR-TESTIGOS	0,05	482,2	269	31,98	1,97	SÍ

Fuente: Elaboración propia.

De la tabla precedente se puede concluir a un nivel de confianza del 95%, que las variables "No nuclear" y "Testigos" presentan medias significativamente diferentes, en la capa intermedia, esto se debe a que no se aplicó el factor de corrección, sin embargo en la carpeta asfáltica no son diferentes.

Tabla 6.9- Determinación de parámetros t y t_{crit} para varianzas distintas (Caso b).

GRUPO	CAPA	CASO	MÉTODOS ENFRENTADOS	α	f'	t	t_{crit}	DIFERENCIA DE MEDIAS
1	CARPETA ASFÁLTICA	B	NUCLEAR-TESTIGOS	0,05	23,54	2,97	2,06	SÍ
3	CAPA INTERMEDIA	B	NUCLEAR-TESTIGOS	0,05	35,15	36,97	2,03	SÍ

Fuente: Elaboración propia.

De la tabla precedente se puede concluir a un nivel de confianza de 95%, que las variables "Nuclear" y "Testigos", presentan una media significativamente diferente en la capa intermedia, lo que también sucede entre las variables "No nuclear" y "Testigos"

Se muestran los resultados de la prueba F y T (fig. 6.12) para los 4 grupos estudiados

RESULTADOS PRUEBAS T Y F

	GRUPO	VARIABLES ENFRENTADAS	DIFERENCIA DE VARIANZAS	DIFERENCIA DE MEDIAS
CARPETA ASFÁLTICA	1	NUCLEAR- TESTIGOS	SÍ	SÍ
	2	NO NUCLEAR- TESTIGOS	NO	NO
CAPA INTERMEDIA	3	NUCLEAR- TESTIGOS	SÍ	SÍ
	4	NO NUCLEAR- TESTIGOS	NO	SÍ

Figura 6.13- Resultados pruebas de hipótesis.

Fuente: Elaboración propia

7.- Conclusiones

Objetivo específico 1

Al término de la visación, se pudo concluir que las dos mezclas y sus agregados pétreos, cumplieron a cabalidad con las especificaciones exigidas por el Manual de Carreteras.

La granulometría de la mezcla de áridos, en la carpeta asfáltica como en la capa intermedia, resultó íntegramente dentro de los límites establecidos por la banda de trabajo establecida para cada mezcla.

Los agregados pétreos utilizados en las dos mezclas (carpeta asfáltica y capa intermedia), cumplieron con las exigencias y tolerancias de los ensayos realizados (densidad real seca, desgaste de los Ángeles, cubicidad de las partículas).

Los parámetros Marshall de las dos mezclas también cumplieron con las exigencias de acuerdo a los resultados entregados en la memoria de cálculo. La densidad Marshall de la carpeta asfáltica y de la capa intermedia, se mantuvieron dentro de la tolerancia de $\pm 20 \text{ kg/m}^3$.

Objetivo específico 2

Del análisis de datos en condiciones de repetibilidad, se pudo concluir:

Las densidades determinadas con el "Método Nuclear", no son confiables en lo absoluto, debido a que éste presentó altos valores en los parámetros de dispersión, lo que se puede apreciar en la tabla 6.1 y en las figuras 6.2 y 6.3.

A pesar de que este método se utiliza habitualmente en Chile para determinar la densidad de capas asfálticas compactadas, se pudo comprobar que el equipo "Densímetro Nuclear" registra variaciones de hasta 161 kg/m^3 , siendo el promedio de variación por punto de $106,5 \text{ kg/m}^3$, lo que representa un error aleatorio promedio de 4,6% con respecto a la densidad Marshall. Esto es inaceptable ya que la densidad de la carpeta no varía de un momento a otro.

Por otro lado las densidades determinadas con el "Método no nuclear" (PQI-380), no presentaron mayor variación, lo que se puede apreciar en la tabla 6.1 y en las figuras 6.2 y 6.3. Se pudo comprobar que el equipo "PQI-380" solo registra variaciones de 2 kg/m^3 como máximo, siendo el promedio de $1,2 \text{ kg/m}^3$, lo que representa un error aleatorio promedio de 0,05% con respecto a la densidad Marshall.

El método "No nuclear" resultó ser más confiable que el "Método nuclear" al determinar densidades en condiciones de repetibilidad.

Objetivo específico 3

Del análisis estadístico desarrollado en los puntos 6.2 y 6.3, se puede concluir lo siguiente.

Prueba de normalidad

- Las densidades determinadas con los métodos de autocontrol (Método nuclear y Método no nuclear) y las densidades determinadas a los testigos, siguen una distribución normal con un nivel de confianza del 95%, esto se puede apreciar en la tablas 6.4 y gráficamente en la figura 6.8.

Prueba F de comparación de varianzas, con un nivel de confianza del 95% ($\alpha=0,05$)

- Con una confianza del 95%, la varianza de las densidades determinadas con el "Método no nuclear", no son diferentes de la varianza de las densidades determinadas a los testigos extraídos del control receptivo (tabla 6.7), esto en la carpeta asfáltica y en la capa intermedia.
- Con una confianza del 95%, se concluyó que la varianza de las densidades determinadas con el "Método nuclear", es diferente a la varianza de las densidades determinadas a los testigos extraídos del control receptivo (tabla 6.7), esto analizando los datos recopilados en la carpeta asfáltica y la capa intermedia.

Prueba T de comparación de medias, con nivel de confianza del 95% ($\alpha=0,05$)

- La media de las densidades determinadas con el "Método no nuclear" en la carpeta asfáltica, no presenta diferencia significativa frente a la media de las densidades obtenidas de los "Testigos" extraídos de dicha capa, esto se puede apreciar en la tabla 6.8.
- La media de las densidades determinadas con el "Método nuclear", sí presenta diferencias con la media de las densidades determinadas a los "Testigos" extraídos de dicha capa, esto se puede apreciar en la tabla 6.9.
- La media de las densidades determinadas con el "Método nuclear" y "Método no nuclear" en la capa intermedia, son diferentes a la media de las densidades determinadas a los

“Testigos” extraídos de dicha capa (tabla 6.8 y 6.9), debido a que no se estableció el factor de corrección.

El resultado de la prueba T de comparación de medias, depende de la precisión del factor de corrección, por lo que el resultado va a variar en función de la precisión de éste factor. En la capa intermedia éste no pudo ser aplicado, por lo que el resultado de esta prueba puede verse afectado. Se puede apreciar en la figura 6.10 que las curvas normales de las variables testigos y No nuclear, son muy similares en ambas capas (caso hipotético de medias iguales), quedando casi acopladas, sin embargo la curva normal de la variable Nuclear, difiere notoriamente de las otras dos curvas siendo ésta menos pronunciada debido a la gran dispersión de los datos por lo que queda en evidencia que los datos de esta variable no tienen relación con la variable testigo.

Objetivo específico 4

Se compararon en terreno los dos métodos de autocontrol llegando a la conclusión de que el equipo PQI presenta notables ventajas frente al densímetro nuclear, principalmente en lo que se refiere a seguridad.

El equipo no solo es más liviano, cómodo de transportar y de manipular, sino que también es más seguro, no representa un riesgo para la salud del operador, no se requiere medir la exposición a la radiación, no requiere de planes de emergencia ni de requisitos para su almacenamiento en obra, no requiere de las licencias ni permisos especiales para su manipulación, almacenamiento ni traslado, además el proceso de medición de densidad es más rápido que el del densímetro nuclear lo que permite ahorrar tiempo y así trabajar la mezcla dentro de la temperatura de compactación.

7.1.- Consideraciones finales.

En base a los resultados obtenidos en este trabajo, se puede concluir que el equipo PQI puede perfectamente ser utilizado en mezclas asfálticas en caliente en reemplazo del densímetro nuclear con la finalidad de determinar la densidad y el grado de compactación de la mezcla, ya que las densidades determinadas con este último muestran una dispersión significativamente mayor a la de las densidades obtenidas con testigos. Se debe tener en cuenta que el factor de corrección es determinante en este equipo, por lo que se recomienda determinar éste, con al menos siete testigos y sus correspondientes densidades con PQI. Se recomienda hacer una tabla similar a la tabla 6.2, graficar los datos y eliminar los puntos que no sigan una tendencia clara.

8.- Bibliografía

- [1].- Ensayos sobre el rol de la infraestructura vial en el crecimiento económico del Perú, edición 2009 Perú.
- [2].- Compactación de asfaltos en estacionamientos, edición 58 revista BIT, pagina 109.
- [3].- Manual de carreteras volumen 8, numeral 8.302.47 Asfalto "método de diseño Marshall", Edición 2012 Santiago Chile.
- [4].- Manual de carreteras volumen 8, numeral 8.003.9 Control de calidad " Visación de dosificaciones" Edición 2012 Santiago Chile.
- [5].- Manual de carreteras volumen 5, Numeral 5.408.2 Mezclas asfálticas en caliente "Materiales" Edición 2012 Santiago Chile.
- [6].- Manual de carreteras volumen 8, Numeral 8.202.6 Agregados pétreos "Método para determinar la cubicidad de las partículas".
- [7].- Manual del usuario modelo 3430. Densímetro para medición de humedad.-densidad edición 2.1 marzo 2003.
- [8].- Antecedentes para solicitar permiso ambiental sectorial 81 del RSEIA, Región metropolitana, Chile 2009.
- [9].- Orden N° 539, Ministerio de Obras Públicas, "Método no nuclear para determinar in situ la densidad de capas asfálticas", Agosto de 2012
- [10].- "Fundamentos de electrotecnia" M. Kuznetsov., Editorial MIR 2° edición, Moscú 1967.
- [11].- Manual de carreteras volumen 5, Numeral 5.408.3 "Procedimiento de trabajo", Edición 2012 Santiago Chile.
- [12].- Vocabulario internacional de metrología, 3° Edición 2012
- [13].- Universidad Católica de la Santísima Concepción, "Estadística y probabilidades", Chile 2012
- [14].- Manual de Carreteras volumen 8, Numeral 8.003.11 "Método de comparación de ensayos de control de calidad y criterios de aceptación o rechazo" Edición 2012 Santiago Chile.

ANEXO 1.- Densidades determinadas en las mezclas

Tabla A1.1- Densidades determinadas con "Método nuclear" y "Método no nuclear" en condiciones de repetibilidad de valores en la carpeta asfáltica

	PUNTO 1		PUNTO 2		PUNTO 3		PUNTO 4		PUNTO 5	
	NUCLEAR kg/m ³	NO NUCLEAR kg/m ³	NUCLEAR kg/m ³	NO NUCLEAR kg/m ³	NUCLEAR kg/m ³	NO NUCLEAR kg/m ³	NUCLEAR kg/m ³	NO NUCLEAR kg/m ³	NUCLEAR kg/m ³	NO NUCLEAR kg/m ³
1	2206	2156	2228	2161	2206	2171	2187	2157	2247	2163
2	2224	2155	2264	2161	2187	2171	2176	2157	2268	2163
3	2221	2157	2165	2162	2234	2171	2213	2157	2212	2163
4	2214	2157	2231	2163	2191	2171	2179	2157	2101	2163
5	2227	2157	2163	2162	2148	2171	2203	2157	2218	2163
6	2208	2156	2166	2162	2207	2171	2190	2157	2251	2163
7	2215	2157	2189	2162	2189	2171	2187	2157	2215	2163
8	2219	2157	2140	2161	2193	2171	2117	2157	2215	2164
9	2227	2157	2151	2161	2236	2171	2205	2157	2100	2165
10	2210	2157	2227	2161	2278	2172	2181	2157	2171	2164
desvest.	7,7	0,7	42,0	0,7	35,4	0,3	26,4	0,0	58,7	0,7
rango	21,0	2,0	124,0	2,0	130,0	1,0	96,0	0,0	168,0	2,0
	PUNTO 6		PUNTO 7		PUNTO 8		PUNTO 9		PUNTO 10	
	NUCLEAR kg/m ³	NO NUCLEAR kg/m ³	NUCLEAR kg/m ³	NO NUCLEAR kg/m ³	NUCLEAR kg/m ³	NO NUCLEAR kg/m ³	NUCLEAR kg/m ³	NO NUCLEAR kg/m ³	NUCLEAR kg/m ³	NO NUCLEAR kg/m ³
1	2181	2171	2219	2183	2183	2171	2235	2175	2230	2175
2	2188	2171	2188	2183	2199	2171	2191	2174	2194	2174
3	2231	2171	2232	2184	2234	2171	2187	2175	2188	2175
4	2174	2171	2193	2184	2208	2171	2201	2175	2201	2175
5	2116	2171	2151	2183	2145	2171	2143	2174	2130	2174
6	2181	2171	2218	2183	2181	2171	2237	2175	2221	2175
7	2177	2171	2189	2184	2156	2171	2287	2174	2286	2174
8	2185	2171	2153	2183	2235	2171	2203	2174	2291	2174
9	2119	2171	2152	2183	2195	2171	2148	2174	2167	2174
10	2237	2171	2143	2183	2186	2171	2191	2174	2208	2174
desvest.	39,1	0,0	32,6	0,5	29,2	0,0	42,7	0,5	49,3	0,5
rango	121,0	0,0	89,0	1,0	90,0	0,0	144,0	1,0	161,0	1,0

Fuente: Elaboración propia.

Tabla. A1.2- Densidades determinadas con el método nuclear en la carpeta asfáltica y capa intermedia

MÉTODO NUCLEAR EN CARPETA ASFÁLTICA														
DENSIDAD kg/m ³														
2139	2192	2218	2231	2240	2246	2252	2260	2265	2271	2279	2287	2300	2318	2352
2152	2194	2218	2232	2240	2246	2252	2260	2265	2272	2280	2288	2303	2319	2365
2165	2195	2219	2233	2241	2247	2252	2262	2266	2272	2280	2288	2303	2320	2367
2166	2196	2220	2233	2241	2247	2253	2262	2266	2272	2281	2290	2304	2321	2369
2169	2197	2225	2233	2242	2247	2254	2263	2266	2273	2282	2290	2306	2322	2372
2177	2204	2225	2234	2242	2248	2254	2263	2267	2273	2282	2291	2307	2324	2387
2181	2204	2226	2235	2243	2249	2254	2263	2267	2275	2283	2291	2307	2329	2387
2185	2207	2226	2236	2244	2250	2255	2263	2267	2275	2284	2292	2310	2329	2391
2186	2209	2226	2237	2244	2250	2256	2263	2267	2275	2284	2293	2310	2329	2391
2187	2209	2226	2238	2244	2250	2257	2263	2267	2275	2284	2293	2311	2331	2392
2187	2211	2228	2238	2244	2251	2257	2264	2268	2276	2284	2294	2312	2333	2397
2188	2214	2230	2238	2245	2251	2257	2264	2268	2278	2284	2296	2314	2344	2397
2189	2214	2230	2239	2245	2251	2259	2264	2269	2278	2286	2297	2315	2345	
2190	2216	2231	2239	2246	2251	2259	2265	2270	2278	2286	2298	2317	2347	
2190	2218	2231	2240	2246	2252	2259	2265	2271	2279	2287	2300	2318	2349	

MÉTODO NUCLEAR EN CAPA INTERMEDIA														
DENSIDAD kg/m ³														
1923	1971	1987	1996	2003	2014	2022	2030	2037	2044	2052	2064	2082	2120	2275
1941	1972	1987	1997	2004	2014	2023	2031	2038	2044	2052	2065	2083	2120	2331
1946	1974	1987	1998	2004	2014	2023	2031	2038	2045	2053	2065	2085	2125	2349
1954	1975	1988	1998	2006	2015	2023	2033	2038	2045	2054	2066	2086	2127	
1955	1976	1989	1998	2007	2015	2024	2033	2038	2045	2055	2067	2086	2128	
1961	1976	1991	1998	2007	2015	2024	2033	2039	2045	2056	2067	2089	2133	
1963	1977	1991	1998	2007	2015	2025	2033	2039	2046	2056	2067	2089	2137	
1964	1979	1991	1999	2007	2015	2025	2034	2040	2046	2058	2068	2090	2139	
1965	1980	1991	1999	2008	2016	2027	2034	2040	2046	2059	2071	2090	2162	
1965	1980	1991	1999	2009	2017	2027	2035	2040	2046	2059	2071	2097	2180	
1965	1981	1993	2000	2011	2017	2027	2036	2041	2047	2060	2071	2099	2190	
1967	1981	1994	2000	2012	2017	2027	2036	2041	2047	2060	2072	2100	2192	
1968	1981	1994	2001	2012	2018	2028	2036	2042	2048	2061	2073	2100	2223	
1969	1983	1994	2002	2012	2018	2029	2037	2042	2050	2061	2074	2101	2226	
1969	1983	1995	2002	2012	2019	2029	2037	2042	2050	2061	2074	2101	2233	
1969	1985	1995	2002	2013	2020	2029	2037	2043	2051	2063	2075	2105	2247	
1969	1985	1996	2002	2013	2021	2029	2037	2043	2051	2063	2075	2117	2263	
1970	1986	1996	2003	2013	2021	2030	2037	2043	2052	2064	2081	2118	2268	

Fuente: Elaboración propia

Tabla. A1.3- Densidades determinadas con el método no nuclear en la carpeta asfáltica y capa intermedia

MÉTODO NO NUCLEAR CARPETA															
DENSIDAD kg/m ³															
2071	2108	2118	2125	2132	2137	2142	2146	2149	2153	2155	2160	2163	2166	2175	2232
2082	2110	2118	2125	2133	2137	2142	2146	2149	2153	2155	2160	2163	2167	2175	2232
2083	2110	2118	2126	2133	2138	2142	2146	2150	2153	2155	2160	2163	2167	2176	
2085	2110	2120	2126	2134	2138	2142	2147	2150	2153	2156	2160	2163	2167	2177	
2096	2112	2120	2126	2134	2138	2142	2147	2150	2153	2156	2160	2164	2167	2177	
2098	2115	2120	2127	2134	2139	2142	2147	2150	2154	2156	2161	2164	2167	2178	
2098	2115	2121	2127	2135	2140	2143	2147	2150	2154	2157	2161	2164	2168	2179	
2098	2115	2122	2127	2135	2140	2143	2147	2150	2154	2157	2161	2164	2168	2181	
2099	2115	2122	2127	2135	2140	2144	2147	2151	2154	2159	2162	2164	2168	2182	
2102	2116	2122	2127	2135	2140	2144	2148	2152	2154	2159	2162	2164	2169	2182	
2106	2116	2122	2128	2136	2140	2144	2149	2152	2154	2159	2162	2165	2170	2185	
2106	2117	2123	2129	2136	2141	2145	2149	2152	2155	2159	2162	2165	2171	2196	
2106	2118	2123	2130	2136	2141	2145	2149	2152	2155	2160	2163	2165	2173	2200	
2106	2118	2124	2131	2136	2141	2145	2149	2153	2155	2160	2163	2165	2174	2230	
2107	2118	2125	2131	2136	2141	2145	2149	2153	2155	2160	2163	2166	2175	2231	

MÉTODO NO NUCLEAR CAPA INTERMEDIA														
DENSIDAD kg/m ³														
2048	2076	2088	2094	2098	2104	2107	2111	2115	2117	2121	2126	2131	2135	2144
2049	2079	2088	2094	2098	2104	2108	2111	2115	2117	2122	2126	2131	2136	2145
2050	2080	2089	2095	2098	2104	2108	2111	2115	2118	2122	2126	2131	2136	2146
2052	2080	2089	2095	2098	2104	2108	2112	2115	2118	2122	2126	2132	2137	2147
2062	2081	2090	2095	2099	2104	2108	2112	2115	2118	2122	2127	2132	2137	2147
2062	2082	2090	2095	2099	2104	2109	2112	2115	2118	2122	2127	2132	2138	2148
2066	2082	2090	2095	2100	2105	2109	2112	2116	2119	2123	2128	2132	2138	2150
2067	2083	2090	2096	2100	2105	2109	2113	2116	2119	2123	2128	2132	2139	2151
2071	2083	2091	2096	2100	2105	2109	2113	2116	2120	2123	2128	2134	2140	2152
2071	2084	2091	2096	2100	2106	2110	2113	2116	2120	2123	2128	2134	2140	2153
2073	2085	2091	2097	2101	2106	2110	2114	2116	2120	2123	2129	2134	2140	2154
2073	2086	2092	2097	2101	2106	2110	2114	2116	2120	2123	2129	2134	2140	2154
2075	2086	2092	2097	2101	2106	2110	2114	2116	2120	2124	2130	2135	2141	2155
2075	2086	2092	2097	2102	2106	2110	2114	2116	2121	2124	2130	2135	2142	2156
2076	2087	2093	2097	2102	2106	2110	2114	2116	2121	2124	2130	2135	2142	2156
2076	2088	2094	2097	2103	2106	2111	2114	2117	2121	2124	2130	2135	2143	2156
2076	2088	2094	2098	2104	2107	2111	2114	2117	2121	2125	2130	2135	2144	2160

Fuente: Elaboración propia

Tabla A1.4- Densidades determinadas a los testigos extraídos del control receptivo

OBRA : MEJORAMIENTO RUTA F-50 SECTOR LO OROZCO - QUILPUE TRAMO DM.17578,35 - DM. 29.497,99 COMUNA DE QUILPUE PROVINCIA DE MARGA -MARGA, REGION DE VALPARAISO.								
Testigos Calzada Tramo Km. 17.630 - 19.300 Faja Der/izq.								
Testigo N°	Sector Representativo		Pk [km]	Faja	Espesor (cm)	Densidad [kg/m ³]	Densidad	Compactación [%]
	Contrato	[km]				[km]	C.A.R.	
					M.A.T.B	M.A.T.B		
1	17.630	18.130	17.880	Der.	5,6	2283	2331	98
					8,4	2329	2292	100
2	18.130	18.630	18.380	Der.	4,2	2283	2331	98
					8,7	2320	2292	100
3	18.630	19.130	18.880	Der.	5,4	2298	2331	99
					8,4	2278	2292	99
4	19.130	19.300	19.120	Der.	5,2	2306	2331	99
					8,9	2296	2292	100
5	17.630	18.130	17.880	Izq.	5,4	2316	2331	98
					8,6	2305	2292	100
6	18.130	18.630	18.380	Izq.	5,6	2285	2331	98
					9,2	2294	2292	99
7	18.630	19.130	18.880	Izq.	5,1	2289	2331	98
					6,6	2270	2292	100
8	19.130	19.300	19.120	Izq.	5,7	2295	2331	99
					9,9	2325	2292	100
Testigos Calzada Sector Km. 20800 - 22800 Faja Der/izq.								
Testigo N°	Sector Representativo		Pk [km]	Faja	Espesor (cm)	Densidad [kg/m ³]	Densidad	Compactación [%]
	Contrato	[km]				[km]	C.A.R.	
					M.A.T.B	M.A.T.B		
9	20.800	21.300	21050	Der	5,4	2310	2331	99
					10,0	2297	2292	100
10	21.300	21.800	21550	Der	5,0	2249	2331	96
					9,4	2287	2292	100
11	21.800	22.300	22050	Der	6,0	2262	2331	100
					9,5	2296	2292	97
12	22.300	22.800	22550	Der	5,4	2257	2331	97
					9,4	2280	2292	99
13	20.800	21.300	21050	Izq	5,6	2280	2331	98
					8,8	2320	2292	100
14	21.300	21.800	21550	Izq	4,6	2295	2331	98
					8,1	2259	2292	99
15	21.800	22.300	22050	Izq	5,8	2264	2331	97
					9,1	2256	2292	98
16	22.300	22.800	22550	Izq	5,6	2210	2331	95
					9,3	2283	2292	100
Nota: <ol style="list-style-type: none"> 1.- Concreto Asfáltico de Rodadura Densidad Marshall 2331Kg/ M3, CE UCC y L N°021/13 del 24/01/2013. 2.- Concreto Asfáltico Tipo Binder Densidad Marshall 2292 Kg/ M3 02/13, CE UCC y L N° 394 del 10/01/2013. 3.- Mezcla Planta Asfáltica Construcciones y Pavimentos Ltda Ruta F-50. 								

Fuente: Laboratorio Regional de vialidad V Región.

ANEXO 2- Visación de las dosificaciones

A-2.1- Granulometría MC-V8 (8.202.3)

Se determinó la granulometría utilizando una tabla Excel y siguiendo los pasos del procedimiento indicado en el Manual de Carreteras volumen 8 Numeral 8.202.4. En la siguiente figura se pueden ver imágenes de las muestras de agregados pétreos y de los tamices utilizados en este análisis.



Figura: A2.1- Áridos reducidos por cuarteo y tamizados.

Fuente: Imágenes tomadas del análisis granulométrico

Las especificaciones de ambas mezclas indican una combinación de materiales con distintas granulometrías, combinadas en proporciones (Tabla A2.1) para producir una mezcla dentro de los límites establecidos por la banda de trabajo.

Tabla A2.1- Ponderación de los áridos en las mezclas.

	Gravilla 3/4	Integral 1/2	Polvo roca	Arena Gruesa	Borra
CAPA INTERMEDIA	46%	21%	21%	12%	0%
CARPETA ASFALTICA	26%	42%	30%	0%	20%

Fuente: Memoria de diseño de las mezclas

Los resultados del análisis granulométrico hecho a los 4 materiales pétreos constituyentes de la capa intermedia, se muestra a continuación (tabla A2.2). Se determinó la mezcla de agregados ponderando cada material con su porcentaje de participación (tabla A2.1)

Tabla A2.2- Granulometría pétreos de la capa intermedia (binder) Lo Orozco ruta F-50.

MATERIAL		Gravilla 3/4"	Gravilla 1/2"	Polvo roca	Arena Gruesa	MEZCLA DE ÁRIDOS	
Tamiz		46%	21%	21%	12%	% Que pasa	Banda de trabajo empresa
Nch (mm)	ASTM (pulg)						
20	3/4"	100	-	-	-	100	100
12,5	1/2"	45	100	-	-	75	65-75
10	3/8"	10	70	100	100	52	44-54
5	N° 4	2	11	73	97	30	26-36
2,5	N° 8		5	51	75	21	18-26
0,63	N° 30			27	28	9	5-11
0,315	N° 50			19	17	6	2-8
0,16	N° 100			13	10	4	1-5
0,08	N° 200	0	0	9	6	3	0,45-7,5
		Gravilla 3/4"	Integral 1/2"	Polvo roca	Arena Gruesa		
	Grueso %	100	95	49	25		
	Fino %	0	5	51	75		

Fuente: Elaboración propia en base a los datos del ensayo de granulometría de la capa intermedia.

La figura siguiente muestra, de forma gráfica, que la mezcla de áridos utilizada en la capa intermedia queda íntegramente dentro de los límites establecidos por la banda de trabajo (tabla A2.2)

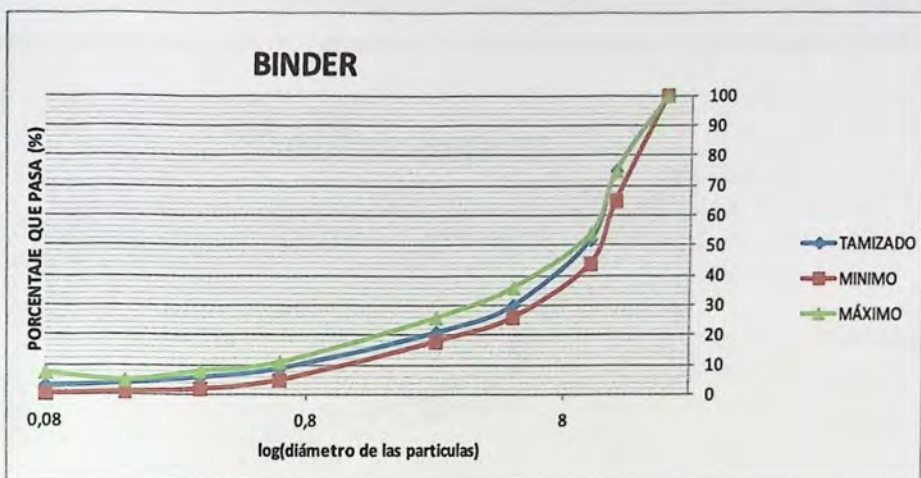


Figura A2.2- Granulometría capa intermedia.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla: A2.3- Granulometría pétreos de la Carpeta de Rodadura Lo Orozco ruta F-50.

MATERIAL		Gravilla 3/4	Integral 1/2	Polvo roca	Borra	MEZCLA DE ÁRIDOS	
Tamiz		26%	42%	30%	20%	% Que pasa	Banda de trabajo empresa
Nch (mm)	ASTM(pulg)					% Que pasa	Banda de trabajo empresa
20	3/4"	100				100	100
12,5	1/2"	43	100			85	78-88
10	3/8"	14	86	100		72	66-76
5	N° 4	7	52	73		48	42-52
2,5	N° 8		37	51	100	34	28-36
0,63	N° 30			28	99	21	16 -22
0,315	N° 50			20	99	14	9 -15
0,16	N° 100			13	94	8	5-9
0,08	N° 200	2	4	10	58	6	3-0
		Gravilla 3/4	Integral 1/2	Polvo roca	Borra		
Grueso %		93	63	49	0		
Fino %		7	37	51	100		

Fuente: Elaboración propia en base a los datos del ensayo de granulometría de la carpeta de rodadura.

La curva granulométrica de la capa intermedia (fig. A2.2) y de la carpeta asfáltica (fig. A2.3) se encuentran dentro de los límites establecidos por la banda de trabajo, los datos graficados fueron obtenidos de la tabla A2.2 en el caso de la capa intermedia y A2.3 en la carpeta de rodado.

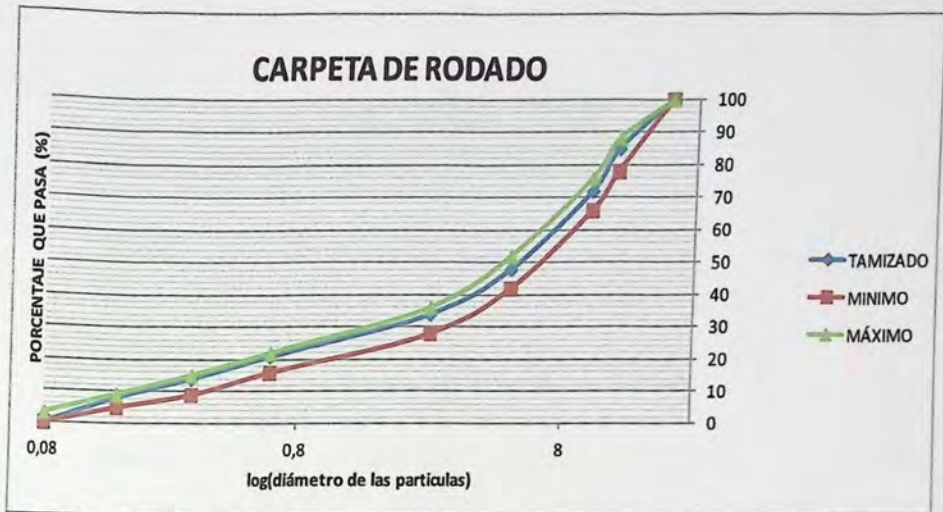


Figura A2.3- Granulometría carpeta asfáltica Lo Orozco.

Fuente: Elaboración propia.

A-1.2- Densidad real, neta y absorción

A-1.2.1- Capa intermedia

La norma indica que si el porcentaje de finos o gruesos de un agregado pétreo es superior al 15% de la muestra, ésta se debe considerar como un integral, (la muestra contiene agregados finos y gruesos) y analizar ambas fracciones por separado de acuerdo a la norma.

La tabla siguiente muestra los resultados del análisis hecho a los pétreos gruesos utilizados en la capa intermedia, utilizando las ecuaciones 8, 9 y 10.

Densidad real del pétreo seco ($\rho_{F.S}$)

$$\rho_{RS} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) = \frac{M_s}{M_{SSS} - M_{SUM}} \times 1000 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \quad (\text{Ec. 8})$$

Densidad real neta: (ρ_N)

$$\rho_N \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) = \frac{M_s}{M_s - M_{SUM}} \times 1000 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \quad (\text{Ec. 9})$$

Porcentaje de absorción de agua: (α)

$$\alpha (\%) = \frac{M_{SSS} - M_s}{M_s} \times 100 \quad (\text{Ec. 10})$$

Donde:

- M_{sum} : Masa del pétreo sumergida (g)
- M_{SSS} : Masa del pétreo saturado superficialmente seco (g)
- M_s : Masa del pétreo seco (g)

Tabla A2.4- Densidad real, neta y absorción de los pétreos gruesos utilizados en la capa intermedia.

	Gravilla 3/4"		Gravilla 1/2"		Polvo roca		Arena Guesa	
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2
MSSS (g)	4122	4617	4542	4997	4521	4973	N/A	N/A
MSUM (g)	2579	2889	2828	3111	2813	3095	N/A	N/A
MS (g)	4073	4562	4482	4931	4464	4911	N/A	N/A
$\rho_{rs} \text{ (kg/m}^3\text{)}$	2641		2614		2615		N/A	
$\rho_n \text{ (kg/m}^3\text{)}$	2727		2709		2704		N/A	
$\alpha \text{ (\%)}$	1,2		1,3		1,3		N/A	

Fuente: Elaboración Propia.

La tabla 5.4 muestra los resultados de densidad real, densidad neta y absorción de la fracción fina de los pétreos utilizados en la capa intermedia de acuerdo a las ecuaciones 11,12 y 13.

Densidad real del pétreo seco (ρ_{RS})

$$\rho_{RS} \left(\frac{kg}{m^3} \right) = \frac{M_s}{M_a + M_{SSS} - M_m} \times 1000 \left(\frac{kg}{m^3} \right) \quad (\text{Ec. 11})$$

Densidad neta: (ρ_N)

$$\rho_N \left(\frac{kg}{m^3} \right) = \frac{M_s}{M_a + M_s - M_m} \times 1000 \left(\frac{kg}{m^3} \right) \quad (\text{Ec. 12})$$

Porcentaje de absorción de agua (α)

$$\alpha (\%) = \frac{M_{SSS} - M_s}{M_s} \times 100 \quad (\text{Ec. 13})$$

Donde:

- M_s : Masa del pétreo seco (g)
- M_{SSS} : Masa del pétreo saturado superficialmente seco (g)
- M_a : Masa del matraz con agua hasta la marca de calibración (g)
- M_a : Masa del matraz con agua hasta la marca de calibración (g)
- M_a : Masa del matraz con la muestra más agua hasta la marca de calibración (g)

Tabla A2.5- Densidad real, neta y absorción de los pétreos finos utilizados en la capa intermedia.

	Gravilla 3/4"		Gravilla 1/2"		Polvo roca		Arena Gruesa	
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2
MS (g)	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	821	828	942	958
MA (g)	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	1471	1574	1361	1385
MSSS (g)	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	835	842	958	975
MM (g)	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	1993	2097	1953	1988
ρ_{rs} (kg/cm ³)	No aplica		No aplica		2584		2580	
ρ_n (kg/cm ³)	No aplica		No aplica		2748		2698	
α (%)	No aplica		No aplica		1,4		1,7	

Fuente: Elaboración Propia.

Luego de ponderar los resultados obtenidos en ambas fracciones, se obtuvo la densidad real, densidad neta y absorción de los agregados pétreos utilizados en la capa intermedia como la suma de ambas fracciones ponderadas. La tabla siguiente muestra los resultados de esta operación.

Tabla A2.6- Densidad real, neta y absorción de los pétreos utilizados en la capa intermedia.

	Gravilla 3/4"	Integral 1/2"	Polvo roca	Borra
% Finos	0%	37%	49%	100%
% Gruesos	100%	63%	51%	0%
ρ_{rs} (kg/m ³)	2641	2614	2599	2580
ρ_n (kg/m ³)	2727	2709	2726	2698
α (%)	1,2	1,3	1,3	1,7

Fuente: Elaboración Propia.

A-1.2.2- Carpeta asfáltica

Los resultados del ensayo de densidad real, densidad neta y absorción hecho a los pétreos gruesos y finos utilizados en la carpeta asfáltica de rodadura, se muestran a continuación en las tablas A2.7 y A2.8 respectivamente. Se utilizaron las ecuaciones 8, 9 y 10 para los pétreos gruesos y 11, 12 y 13 para los pétreos finos.

Tabla A2.7- Densidad real, neta y absorción de los pétreos gruesos utilizados en la carpeta asfáltica.

	Gravilla 3/4"		Integral 1/2"		Polvo roca		Borra	
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2
MSSS (g)	5065	4217	4447	4394	4340	4513	No aplica	No aplica
MSUM (g)	3172	2643	2782	2748	2710	2818	No aplica	No aplica
MS (g)	5000	4169	4400	4347	4291	4462	No aplica	No aplica
ρ_{rs} (kg/m ³)	2645		2644		2632		No aplica	
ρ_n (kg/m ³)	2734		2719		2713		No aplica	
α (%)	1,2		1,07		1,1		No aplica	

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla A2.8- Densidad real, neta y absorción de los pétreos finos utilizados en la carpeta asfáltica.

	Gravilla 3/4"		Integral 1/2"		Polvo roca		Borra	
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2
MS (g)	No aplica	No aplica	806	887	781	812	900	960
MA (g)	No aplica	No aplica	1422	1564	1428	1485	1726	1831
MSSS (g)	No aplica	No aplica	818	909	790	823	923	948
MM (g)	No aplica	No aplica	1933	2126	1924	2000	2300	2543

ρ_{rs} (kg/cm ³)	No aplica	2615	2638	2577
ρ_n (kg/cm ³)	No aplica	2721	2740	2754
α (%)	No aplica	1,5	1,2	2,5

Fuente: Elaboración Propia.

Luego de ponderar los resultados obtenidos en ambas fracciones, se obtuvo la densidad real, densidad neta y absorción de los agregados pétreos utilizados en la carpeta asfáltica como la suma de ambas fracciones ponderadas.

La tabla A2.9 muestra los porcentajes de cada fracción y el resultado de la ponderación de finos (tabla A2.8) y gruesos (tabla A2.9).

Tabla A2.9- Densidad real, neta y absorción de los pétreos utilizados en la carpeta asfáltica.

	Gravilla 3/4"	Integral 1/2"	Polvo roca	Borra
% Finos	7	37	51	100
% Gruesos	93	63	49	0

ρ_{rs} (kg/m ³)	2645	2633	2630	2564
ρ_n (kg/m ³)	2734	2720	2726	2742
α (%)	1,2	1,2	1,1	2,5

Fuente: Elaboración Propia.

A-1.3- Desgaste de los ángeles

Se ensayaron las muestras de acuerdo al Manual de carreteras volumen 8 numeral 8.202.11. Se determinó el grado de ensaye de acuerdo a sus rangos de tamaños en mm, y se calculó el desgaste de la muestra mediante diferencias de pesadas utilizando la ecuación 14, en la tabla A2.10 y A2.11 se muestran los resultados obtenidos en este análisis.

$$\text{desgaste (\%)} = \frac{M_i - M_f}{M_i} \times 100 \quad (\text{Ec. 14})$$

donde:

- desgaste (%): Porcentaje de desgaste del material ensayado.
- M_i : Masa inicial de la muestra (g) destinada al ensaye.
- M_f : Masa final de la muestra (g) retenida en el tamiz 1,7 mm o ASTM N°12.

Las especificaciones técnicas establecen un límite de desgaste para los áridos de 25% para carpeta asfáltica y de 30% para la capa intermedia.

Tabla A2.10- Desgaste de los Ángeles de los agregados pétreos utilizados en la carpeta.

CARPETA DE RODADURA				
	gravilla 3/4	integral 1/2	Polvo roca	Borra
GRADO DE ENSAYE	5	6	6	No aplica
M_i	5230	5524	5389	No aplica
M_f	4690	4820	4512	No aplica
% DE DESGASTE	10,3%	12,7%	16,3%	No aplica

Fuente: Elaboración a partir de resultados de ensaye.

Tabla A2.11- Desgaste de los Ángeles de los agregados pétreos utilizados en capa intermedia.

CAPA INTERMEDIA				
	gravilla 3/4	Gravilla 1/2	Polvo roca	Arena Gruesa
GRADO DE ENSAYE	5	6	6	6
M_i	5147	5268	5619	5428
M_f	4720	4712	4821	4309
% DE DESGASTE	8,3%	10,6%	14,2%	21%

Fuente: Elaboración a partir de resultados de ensaye.

La imagen siguiente muestra la "Máquina de los Ángeles" utilizada para el ensaye.



Figura A2.4- Máquina de los Ángeles laboratorio de vialidad de Valparaíso.

Fuente: Laboratorio regional de vialidad de Valparaíso.

A.1.4- Cubicidad de las partículas

Se determinó la masa mínima de la muestra a ensayar de acuerdo a la normativa, se ensayó de acuerdo al procedimiento la fracción entre 5 y 20 mm de los áridos utilizados en la capa intermedia y la carpeta de rodado de acuerdo a la normativa del Manual de Carreteras numeral 8.202.6.

Se calcularon los porcentajes de las partículas chanchadas, rodadas y lajeadas de los pétreos constituyentes de la mezcla, tanto de la capa intermedia como de la carpeta de rodado, de acuerdo a las siguientes expresiones.

Chanchado(CH_i) :

$$Ch_i(\%) = \frac{B_i + D_i}{A_i} \times 100 \quad (\text{Ec. 15})$$

Rodada (R_i):

$$R_i(\%) = \frac{C_i + E_i}{A_i} \times 100 \quad (\text{Ec. 16})$$

Lajeada (L_i)

$$L_i(\%) = \frac{D_i + E_i}{A_i} \times 100 \quad (\text{Ec. 17})$$

donde:

- A_i: Masa de la fracción (g)
- B_i: Masa de chancado (g)
- C_i: Masa de la partícula rodada (g)
- D_i: Masa de laja chancada (g)
- E_i: Masa de laja rodada (g).

Los resultados de obtenidos en este análisis se muestran en las tablas A2.12 y A2.13.

Tabla A2.12- Cubicidad de las partículas de los áridos de la carpeta asfáltica Lo Orozco ruta F-50.

	Gravilla 3/4	Integral 1/2"	Polvo roca	Borra
A _i (g)	546	582	539	No aplica
B _i (g)	491	524	453	No aplica
C _i (g)	0	0	0	No aplica
D _i (g)	6,0	6	54	No aplica
E _i (g)	0	0	0	No aplica
CHANCADO (%)	91	91	94	No aplica
RODADO (%)	0	0	0	No aplica
LAJA (%)	1	1	10	No aplica

Fuente: Elaboración propia

Tabla A2.13- Cubicidad de las partículas de los áridos de la capa intermedia, "Lo Orozco ruta F-50".

	Gravilla 3/4"	Gravilla 1/2"	Polvo roca	Arena Gruesa
A _i (g)	570	585	517	No aplica
B _i (g)	450	515	460	No aplica
C _i (g)	0	0	0	No aplica
D _i (g)	6	12	41	No aplica
E _i (g)	0	0	0	No aplica
CHANCADO (%)	80	90	97	No aplica
RODADO (%)	0	0	0	No aplica
LAJA (%)	1	2	8	No aplica

Fuente: Elaboración propia



Figura A2.5- Muestra para ensaye Cubicidad de las partículas

Fuente: Elaboración propia

A-1.5- Análisis Marshall

Se preparó tres probetas para la capa intermedia y tres probetas para la carpeta de rodado con el contenido de asfalto óptimo (4,5% y 5,3% respectivamente) especificado en la dosificación presentada por el contratista, se mezcló, compactó y se ensayó de acuerdo al procedimiento, luego se determinó su densidad, absorción de agua, resistencia a la deformación plástica, fluidez y porcentaje de vacíos del agregado mineral de acuerdo a la normativa del Manual de Carreteras Volumen 8 numerales 8.302.40 y 8.302.47.

Una vez preparada la mezcla, ésta se vació en los moldes y se compactó con 75 golpes de martillo utilizando el equipo de compactación de la figura 5.6.



Figura A2.6- Máquina de compactación

Fuente: Imágenes tomadas en laboratorio.

La tabla siguiente muestra las alturas medidas a las briquetas preparadas con las mezclas correspondientes a la carpeta asfáltica y a la capa intermedia.

Tabla A2.14- Espesores y alturas de las briquetas ensayadas en el análisis Marshall.

CARPETA ASFÁLTICA					
N° BRIQUETA	ALTURA (cm)				ALTURA PROMEDIO
1	6	6	6	6,1	6
2	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2
3	6,3	6,2	6,2	6,3	6,3

CAPA INTERMEDIA					
N° BRIQUETA	ALTURA (cm)				ALTURA PROMEDIO
1	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4
2	6,3	6,3	6,4	6,3	6,3
3	6,4	6,3	6,3	6,3	6,3

Fuente: elaboración propia a partir de datos obtenidos en laboratorio

A-1.5.1- Densidad Marshall

Se determinó la masa de las probetas asfálticas compactadas por pesada al aire ambiente en condiciones seca, saturada superficialmente seca y pesada bajo agua, se determinó la densidad Marshall y la absorción de agua de la mezcla de acuerdo a las ecuaciones 18 y 19

$$G = \frac{A}{B-C} \times 100 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \quad (\text{Ec. 18})$$

$$A_{ab} = \left(\frac{B-A}{B-C} \right) \times 100 \quad (\text{Ec. 19})$$

Donde:

- G: Densidad de la probeta compactada (kg/m^3)
- A_{ab} : Porcentaje de agua absorbido por la probeta (%)
- ρ_w : Densidad del agua (gr/m^3)
- A: Masa de la probeta en aire (g)
- B: Masa de la probeta en aire con superficie seca (g)
- C: Masa de la probeta en agua (g)

La tabla siguiente muestra los resultados de estas operaciones.

Tabla A-2.15- Pesadas seca, bajo agua y saturada superficialmente seca de briquetas de ensayo Marshall

CARPETA ASFÁLTICA DE RODADURA			CAPA INTERMEDIA		
A	C	B	A	C	B
M seca (kg)	M b/a (kg)	Msss (kg)	M seca (kg)	M b/a (kg)	Msss (kg)
1135	650	1136	1140	654	1149
1123	642	1124	1137	649	1146
1136	650	1138	1138	649	1147

Fuente: Elaboración propia a partir de datos tomados en laboratorio.

Los resultados de la densidad Marshall y la absorción de agua de la carpeta asfáltica y de la capa intermedia calculados con las ecuaciones 18 y 19 se muestran en la tabla siguiente.

Tabla A-2.16- Densidad Marshall y absorción de agua de la capa intermedia y de la carpeta asfáltica.

	CARPETA ASFÁLTICA DE RODADURA		CAPA INTERMEDIA	
	A_{ab} (%)	G (kg/m^3)	A_{ab} (%)	G (kg/m^3)
PROBETA 1	0,2	2335	1,8	2303
PROBETA 2	0,2	2330	1,8	2288
PROBETA 3	0,4	2328	1,8	2285
PROMEDIO	0,3	2331	1,8	2292

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos en laboratorio.

A-1.5.2- Determinación de la resistencia a la estabilidad y fluidez de la mezcla

Se midió la resistencia a la deformación plástica de cada una de las probetas ensayadas en el laboratorio utilizando la máquina Marshall (figura A2.7). Se aplicó la carga a las probetas sobre su manto lateral a la velocidad de deformación de 50 ± 1 mm/min y se registro la carga de falla (Newton) como la estabilidad de la probeta, la deformación a la cual falló la briqueta fue registrada como la fluidez de la mezcla. Se determinó la resistencia a la deformación de la mezcla como el promedio de las cargas de falla individuales de cada probeta de acuerdo al procedimiento del Manual de carreteras volumen 8 numeral 8.302.40.

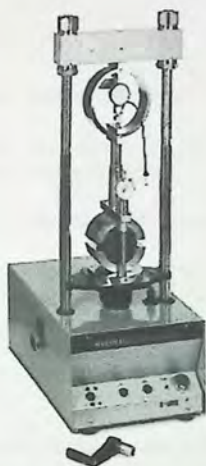


Figura A2.7- Máquina Marshall

Fuente: Google.cl

La siguiente tabla muestra un resumen de las mediciones hechas a las probetas ensayadas de la capa intermedia y de la carpeta asfáltica.

Tabla A2.17- Fluidez y Estabilidad de la mezcla.

	CARPETA ASFÁLTICA				CAPA INTERMEDIA			
Fluidez (mm)	14	13,2	13,9	MEDIA=13,7	12,9	13,5	12,9	MEDIA=13,1
Estabilidad (N)	10453	10403	10059	MEDIA =10305	8025	8048	8035	MEDIA =8036

Fuente: Datos medidos en laboratorio

A-1.5.3- Cálculo del porcentaje Vacíos en el Agregado Mineral (V.A.M)

Se calculó el porcentaje de vacíos en el agregado mineral (V.A.M) de acuerdo a la siguiente expresión extraída de la norma aplicable para este ensayo (Manual de Carreteras volumen 8 numeral 8.302.47)

$$V.A.M = 100 \cdot \left(1 - \frac{G}{\rho_{RS}} \times \frac{100}{100 + P_b}\right) \quad (\text{Ec. 20})$$

donde

G: densidad de la mezcla compactada (kg/m^3), determinada con la ecuación 18

ρ_{RS} : Densidad real seca del agregado (kg/m^3), según tabla A2.6 para la capa intermedia y A2.9 para carpeta asfáltica.

Pb: Porcentaje de asfalto referido al agregado

La tabla siguiente muestra los resultados de este ensayo para la carpeta asfáltica y para la capa intermedia.

Tabla A2.18- Cálculo de Vacíos del agregado mineral V.A.M.

	G (kg/m^3)	ρ_{RS} (kg/m^3)	Pb (%)	V.A.M (%)
CARPETA ASFÁLTICA	2331	2619	5,3	15,5 %
CAPA INTERMEDIA.	2292	2616	4,5	16,2 %

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8.003.11.B
Prueba F: Valores Críticos, F_{crit} , para un nivel de significación $\alpha = 0,05$

		GRADOS DE LIBERTAD NUMERADOR																					
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	15	20	24	30	40	50	60	100	120	
GRADOS DE LIBERTAD DENOMINADOR	1	646	799	664	900	922	937	946	957	963	969	973	977	985	993	997	1001	1006	1008	1010	1013	1014	
	2	38.5	39.0	39.2	39.2	39.3	39.3	39.4	39.4	39.4	39.4	39.4	39.4	39.4	39.4	39.4	39.5	39.5	39.5	39.5	39.5	39.5	39.5
	3	17.4	16.0	15.4	15.1	14.9	14.7	14.6	14.5	14.5	14.4	14.4	14.4	14.3	14.3	14.2	14.1	14.1	14.0	14.0	14.0	14.0	13.9
	4	12.2	10.6	10.0	9.6	9.4	9.2	9.1	9.0	8.9	8.8	8.8	8.8	8.6	8.7	8.6	8.5	8.5	8.4	8.4	8.4	8.3	8.3
	5	10.0	8.4	7.8	7.4	7.1	7.0	6.9	6.8	6.7	6.6	6.6	6.6	6.5	6.4	6.3	6.3	6.2	6.2	6.1	6.1	6.1	6.1
	6	8.8	7.3	6.6	6.2	6.0	5.8	5.7	5.6	5.5	5.5	5.4	5.4	5.3	5.2	5.1	5.1	5.0	5.0	5.0	4.9	4.9	4.9
	7	8.07	6.54	5.89	5.52	5.29	5.12	4.99	4.90	4.82	4.76	4.71	4.67	4.57	4.47	4.41	4.36	4.31	4.28	4.25	4.21	4.20	4.20
	8	7.57	6.06	5.42	5.05	4.82	4.65	4.53	4.43	4.36	4.30	4.24	4.20	4.10	4.00	3.95	3.89	3.84	3.81	3.78	3.74	3.73	3.73
	9	7.21	5.71	5.08	4.72	4.48	4.32	4.20	4.10	4.03	3.96	3.91	3.87	3.77	3.67	3.61	3.56	3.51	3.47	3.45	3.40	3.39	3.39
	10	6.94	5.46	4.83	4.47	4.24	4.07	3.95	3.85	3.78	3.72	3.66	3.62	3.52	3.42	3.37	3.31	3.26	3.22	3.20	3.15	3.14	3.14
	11	6.72	5.26	4.63	4.28	4.04	3.88	3.76	3.66	3.59	3.53	3.47	3.43	3.33	3.23	3.17	3.12	3.06	3.03	3.00	2.96	2.94	2.94
	12	6.55	5.10	4.47	4.12	3.89	3.73	3.61	3.51	3.44	3.37	3.32	3.28	3.18	3.07	3.02	2.96	2.91	2.87	2.85	2.80	2.79	2.79
	15	6.20	4.77	4.15	3.80	3.58	3.41	3.29	3.20	3.12	3.06	3.01	2.96	2.86	2.76	2.70	2.64	2.59	2.55	2.52	2.47	2.46	2.46
	20	5.67	4.46	3.86	3.51	3.29	3.13	3.01	2.91	2.84	2.77	2.72	2.68	2.57	2.46	2.41	2.35	2.29	2.25	2.22	2.17	2.16	2.16
	24	5.72	4.32	3.72	3.38	3.15	2.99	2.87	2.78	2.70	2.64	2.59	2.54	2.44	2.33	2.27	2.21	2.15	2.11	2.08	2.02	2.01	2.01
	30	5.57	4.18	3.59	3.25	3.03	2.87	2.75	2.65	2.57	2.51	2.46	2.41	2.31	2.20	2.14	2.07	2.01	1.97	1.94	1.88	1.87	1.87
	40	5.42	4.05	3.46	3.13	2.90	2.74	2.62	2.53	2.45	2.39	2.33	2.29	2.18	2.07	2.01	1.94	1.88	1.83	1.80	1.74	1.72	1.72
	60	5.29	3.93	3.34	3.01	2.79	2.63	2.51	2.41	2.33	2.27	2.22	2.17	2.06	1.94	1.88	1.82	1.74	1.70	1.67	1.60	1.58	1.58
	120	5.15	3.60	3.23	2.89	2.67	2.52	2.39	2.30	2.22	2.16	2.10	2.05	1.94	1.82	1.76	1.69	1.61	1.56	1.53	1.45	1.43	1.43
	∞	5.02	3.69	3.12	2.79	2.57	2.41	2.29	2.19	2.11	2.05	1.99	1.94	1.83	1.71	1.64	1.57	1.48	1.43	1.39	1.30	1.27	1.27

Tabla A3.2- Prueba T, Valores críticos para $\alpha=0,005$

Prueba t*, valores críticos, t_{α} , para distintos niveles de significación

Grados de Libertad	$\alpha = 0,01$	$\alpha = 0,05$	$\alpha = 0,10$
1	63.656	12.706	6.314
2	9.925	4.303	2.920
3	5.841	3.182	2.353
4	4.604	2.776	2.132
5	4.032	2.571	2.015
6	3.707	2.447	1.943
7	3.499	2.365	1.895
8	3.355	2.306	1.860
9	3.250	2.262	1.833
10	3.169	2.228	1.812
11	3.106	2.201	1.796
12	3.055	2.179	1.782
13	3.012	2.160	1.771
14	2.977	2.145	1.761
15	2.947	2.131	1.753
16	2.921	2.120	1.746
17	2.898	2.110	1.740
18	2.878	2.101	1.734
19	2.861	2.093	1.729
20	2.845	2.086	1.725
21	2.831	2.080	1.721
22	2.819	2.074	1.717
23	2.807	2.069	1.714
24	2.797	2.064	1.711
25	2.787	2.060	1.708
26	2.779	2.056	1.706
27	2.771	2.052	1.703
28	2.763	2.048	1.701
29	2.756	2.045	1.699
30	2.750	2.042	1.697
40	2.704	2.021	1.684
60	2.660	2.000	1.671
120	2.617	1.980	1.658
∞	2.576	1.960	1.645

* Válido para una prueba de dos colas con hipótesis nula y alternativa de acuerdo a:
 $H_0: \bar{X}_c = X_c$, $H_1: \bar{X}_c \neq X_c$