

---

Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga  
Facultad de Ingeniería de Minas, Geología y Civil  
Escuela Profesional de Ingeniería Civil

---



Ecuación de corrección del porcentaje de cemento  
asfáltico a partir de la variación del porcentaje de  
agregados

Tesis para optar el Título de Ingeniero Civil

Presentado por:

Rualth Gustavo Bravo Anaya

Asesor:

Mg. Sc. Ing. Hemerson Lizarbe Alarcón

Ayacucho – Perú

2018

## **Dedicatoria**

Con profundo cariño a mis padres Ruth y Alfredo, mis hermanas Vrydma y Ruth por ser la razón de mi superación constante.

## **Agradecimientos**

A la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga forjadora de hombres de ciencia y prestigio.

A la Escuela Profesional de Ingeniería Civil y su plana Docente, por legarnos conocimientos, compartir experiencias y habernos transmitido su espíritu universitario.

Un especial agradecimiento y reconocimiento al asesor, Mg. Sc. Ing. Hemerson Lizarbe Alarcón, por sus aportes y sugerencias durante el desarrollo de esta investigación.

A la empresa ICCGSA y al personal de la planta del Proyecto Integración Vial Tacna – La Paz por permitirme utilizar sus instalaciones para el desarrollo del presente estudio.

A todas las personas que han contribuido a la cristalización de esta investigación.

# ECUACIÓN DE CORRECCIÓN DEL PORCENTAJE DE CEMENTO ASFÁLTICO A PARTIR DE LA VARIACIÓN DEL PORCENTAJE DE AGREGADOS

Rualth Gustavo Bravo Anaya  
Bachiller en Ciencias de la Ingeniería Civil – Tesista  
Escuela Profesional de Ingeniería Civil – FIMGC – UNSCH  
rualth.bravo@gmail.com

Junio de 2018

## Resumen

Con los antecedentes de Castro (2002) y Uribe (2016), se planteó como problema si será posible determinar una ecuación que corrija el porcentaje de cemento asfáltico. Por lo que el objetivo de la investigación fue determinar una ecuación de corrección del porcentaje de cemento asfáltico. El diseño metodológico fue aplicado, de enfoque cuantitativo, nivel relacional y diseño longitudinal, sobre una muestra de 47 ensayos de lavado asfáltico distribuidos en tres grupos: 7 y 28 ensayos con la cantera CY-1 (Ancomarca, Palca, Tacna) y 12 ensayos con la segunda cantera (Km. 47+500, Palca, Palca, Tacna). Los resultados para los 7 primeros ensayos dieron un porcentaje de cemento asfáltico que iba desde 4.20% a 11.35%; con estos mismos 7 ensayos se determinó la ecuación:

$$\% CA_{real} = \frac{(PAL - (PDL + (FDL - FAL)))(100\% - (\% AG_1 - \% AG_2))}{PAL}$$

Una vez aplicada la ecuación a los ensayos restantes de ambas canteras y aplicada la prueba T de Wilcoxon, con una significancia de 0.05, se acepta la hipótesis alterna y se rechaza la hipótesis nula. Conclusión, la ecuación de corrección del porcentaje de cemento asfáltico corrige el porcentaje de cemento asfáltico aparente, por lo tanto, se validan las hipótesis propuestas.

## Palabras claves

Ecuación, porcentaje de cemento asfáltico.

# EQUATION OF CORRECTION OF THE PERCENTAGE OF ASPHALT CEMENT FROM THE VARIATION OF PERCENTAGE OF AGGREGATES

## Abstract

With the antecedents of Castro (2002) and Uribe (2016), it propounds as problem if will it possible to determinate an equation for correcting the percentage of asphalt cement. So the objective of the investigation was determinate an equation for correcting the percentage of asphalt cement. The methodological design was applied, quantitative approach, relational level and longitudinal design, on a sample of 47 asphalt washing test distributed in three groups: 7 and 28 tests with the quarry CY-1 (Ancomarca, Palca, Tacna) and 12 tests with the second quarry (Km. 47+500, Palca, Palca, Tacna). The results for the 7 first tests gave a percentage of asphalt cement that gone from 4.20% to 11.35%, with this same 7 tests it was determined the equation:

$$\% CA_{real} = \frac{(PAL - (PDL + (FDL - FAL)))(100\% - (\% AG_1 - \% AG_2))}{PAL}$$

And when the equation was applied to the last tests of both quarry and T test of Wilcoxon applied too, whit a signification of 0.05, it accepts the alternate hypothesis and refuses the null hypothesis. Conclusion, the equation for correcting the percentage of asphalt cement corrects the percentage of apparent asphalt cement, therefore, the proposed hypothesis are validated.

## Key words

Equation, percentage of asphalt cement.

# ÍNDICE GENERAL

---

Índice de figuras .....	viii
Índice de tablas.....	ix
Lista de abreviaturas y símbolos .....	x
1 Introducción .....	1
1.1 Planteamiento del problema .....	1
1.2 Formulación del problema.....	2
1.3 Justificación.....	3
1.4 Importancia.....	3
1.5 Objetivos .....	4
1.6 Hipótesis.....	5
2 Estado del arte .....	6
2.1 Antecedentes .....	6
2.2 Base teórica .....	7
3 Materiales y métodos .....	44
3.1 Población y muestra .....	44
3.2 Equipos y materiales .....	45
3.3 Procedimiento.....	47
3.4 Resultados .....	51
4 Resultados y discusión .....	52
4.1 Indicadores de las variables en la ecuación.....	52
4.2 Estudio del fenómeno y la ecuación.....	53
4.3 Determinación de la ecuación .....	58
4.4 Contrastación de hipótesis.....	62
Conclusiones .....	66
Futuras líneas de investigación .....	67

Recomendaciones.....	68
Referencias.....	69
Anexos .....	71

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1 Agregado grueso.....	11
Figura 2 Agregado fino.....	11
Figura 3 Máquina de Desgaste de Los Ángeles.....	15
Figura 4 Asfalto natural.....	18
Figura 5 Ilustración del VMA en una prueba de mezcla compactada.....	23
Figura 6 Prensa para el ensayo de Marshall.....	30
Figura 7 Planta de asfalto.....	34
Figura 8 Planta de producción continua.....	35
Figura 9 Forma de una ecuación algebraica.....	43
Figura 10 Ubicación de las canteras.....	45
Figura 11 Agregados para elaboración de la mezcla.....	47
Figura 12 Carguío del volquete.....	47
Figura 13 Colocación de la mezcla y el solvente.....	48
Figura 14 Cerrado de la centrífuga.....	48
Figura 15 Encendido de la centrífuga.....	49
Figura 16 Mezcla separada después del uso de la centrífuga.....	49
Figura 17 Agregado separado de la mezcla asfáltica.....	50
Figura 18 Tamizado de los agregados separados de la mezcla.....	50
Figura 19 Pesado del agregado separado de la mezcla.....	51
Figura 20 Porcentaje de cemento asfáltico aparente de los ensayos del grupo 1.....	53
Figura 21 Comparación del porcentaje de cemento asfáltico aparente y real.....	54
Figura 22 Diferencia de las relaciones del contenido de grava en el ensayo de lavado asfáltico y en la faja transportadora.....	55
Figura 23 %CA aparente, %CA real y G2-G1 vs % de grava.....	56
Figura 24 %CA aparente, %CA real, diferencia de G2-G1 y (%CA real)x(G2-G1) vs % de grava.....	57
Figura 25 %CA aparente, %CA real, (%CA aparente)x(G2-G1) y el resultado de la ecuación vs % de grava.....	58
Figura 26 Esquema del peso del filtro.....	59
Figura 27 Esquema del peso de la muestra.....	59



## ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 1 Clasificación de agregados.....	10
Tabla 2 Granulometría para la MAC-2 .....	14
Tabla 3 Requisitos de vacíos en el agregado mineral .....	24
Tabla 4 Causas y efectos de la inestabilidad en el pavimento .....	25
Tabla 5 Causas y efectos de una poca durabilidad.....	25
Tabla 6 Causas y efectos de la permeabilidad .....	26
Tabla 7 Causas y efectos de problemas en la trabajabilidad.....	26
Tabla 8 Causas y efectos de una mala resistencia a la fatiga.....	27
Tabla 9 Causas y efectos de poca resistencia al deslizamiento.....	27
Tabla 10 Criterios de evaluación del método de Marshall.....	30
Tabla 11 Dimensiones del porcentaje de cemento asfáltico y porcentaje de grava... 45	
Tabla 12 Resultados del porcentaje de cemento asfáltico real de la cantera CY-1 (grupo 2) .....	63
Tabla 13 Resultados del porcentaje de cemento asfáltico real de la cantera Km. 47+500 (grupo 3).....	65

## LISTA DE ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

---

ASTM D1559	Normativa para el diseño de mezcla por el método Marshall
ASTM D2172	Extracción cuantitativa de asfalto en mezcla de pavimentación (Ensayo de lavado asfáltico)
MAC	Mezcla asfáltico en caliente
MAC-2	Mezcla asfáltica en caliente tipo 2
TPH	Toneladas por hora
%CA	Porcentaje de cemento asfáltico
VMA	Vacíos de agregado mineral
PEN 120-150	Asfalto con prueba de penetración de 120-150 (0.1mm)

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

---

### 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La calidad de una carretera depende del diseño estructural, de los procesos constructivos y de los materiales que son empleados para su construcción. En cuanto a la calidad de la carpeta asfáltica, esta es una función directa de la calidad de la mezcla asfáltica en caliente tanto en su diseño como en los controles de su producción.

El diseño de una mezcla asfáltica en caliente, previamente aprobada, autoriza la producción de la mezcla asfáltica. Durante el proceso de producción en la planta, se aplican una serie de ensayos de control de calidad, entre ellas el de mayor importancia el lavado asfáltico, en torno al cual muchas veces no hay un acuerdo entre el personal de supervisión y contratista, debido a la falta de una norma específica en torno a este problema.

Se tiene conocimiento que en el lavado asfáltico, en ocasiones el porcentaje del cemento asfáltico es mayor o menor, respecto al porcentaje del cemento asfáltico de diseño, dicha diferencia resulta como consecuencia de un muestreo incorrecto en el volquete, es decir la proporción de grava/fino no es la misma que resultó en la calibración de la faja o diseño; en consecuencia este problema puede ser corregido

mediante una ecuación dependiendo de la variación del porcentaje de agregados (grava/fino) en la toma del carguío del volquete y en la faja transportadora.

## **1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

En el proceso del diseño de la mezcla asfáltica en caliente (MAC), se obtienen un conjunto de parámetros que determinarán la calidad del producto, entre ellas el porcentaje de cemento asfáltico (%CA), que corresponde a una cierta relación porcentual de agregados (grava/fino); sin embargo, en el momento del proceso productivo de la mezcla asfáltica, el que se colocará en la pista, previo al ensayo del lavado asfáltico, es tomada la muestra del carguío del primer volquete, y por razones de manipuleo las relaciones porcentuales de agregados (grava/fino) no necesariamente son los valores contemplados en el diseño, por lo que el %C.A. obtenido en este ensayo (lavado asfáltico) es aparente; según el caso, se llega a obtener valores porcentuales del cemento asfáltico altos o bajos respecto al %C.A. de diseño.

Esto genera en ciertos casos un problema, debido al desacuerdo que se genera entre la supervisión y contratista a falta de una implementación de un correctivo a este tema en los manuales o normas.

### **1.2.1 Problema principal**

Se planteó como problema principal:

¿Será posible determinar una ecuación que permita corregir el porcentaje de cemento asfáltico a partir de la variación del porcentaje de agregados en la toma del carguío del volquete y en la faja transportadora?

### **1.2.2 Problemas secundarios**

- ¿Cuál es la variación del porcentaje de cemento asfáltico a partir de la variación del porcentaje de agregados en la toma del carguío del volquete y en la faja transportadora?
- ¿Cómo establecer una ecuación que corrija el porcentaje de cemento asfáltico a partir de la variación del porcentaje de agregados en la toma del carguío del volquete y en la faja transportadora?

- ¿En qué medida será posible validar la ecuación de corrección del porcentaje de cemento asfáltico?

### **1.3 JUSTIFICACIÓN**

Uno de los ensayos importantes, en la producción de asfalto, es la determinación del %CA en el MAC, ya que el contenido porcentual, como indica el diseño, es conducente a una calidad de la mezcla que permitirá tener una duración y serviciabilidad como indica el proyecto.

Como se explicó, en el planteamiento del problema, existen dos momentos del proceso de producción en los que se toman muestras de los agregados, y al ser un proceso manual se generan variaciones de los porcentajes grava/fino entre las dos tomas.

La toma de muestra en el carguío es utilizado para el ensayo del lavado asfáltico, un ensayo de suma importancia por constituir una prueba que determine el contenido del %CA del MAC, en dicho ensayo, aún el más experimentado personal técnico, no tomará siempre una muestra de la mezcla asfáltica en la misma proporción de grava/fino, como resulta en la granulometría de la calibración de la faja. Por tanto amerita, calcular el valor correcto del %C.A el cual es correspondiente a los porcentajes grava/fino de la toma en la calibración de la faja.

Es por ello, necesario determinar una ecuación de corrección del porcentaje de cemento asfáltico para encontrar el cemento asfáltico real y así evitar el desacuerdo entre supervisión y contratista en la obra.

### **1.4 IMPORTANCIA**

Si no se pudiera determinar el porcentaje de cemento asfáltico real, no tendríamos la certeza del exceso o deficiencia del cemento asfáltico, este resultado estaría afectando en primer término a la calidad de la mezcla asfáltica y por ende a la calidad y serviciabilidad del proyecto, y por otra parte según las condiciones, atentaría el aspecto económico de la empresa.

La determinación de una ecuación que corrija el porcentaje de cemento asfáltico, para posteriormente conocer la cantidad de cemento asfáltico real, solucionaría en alguna medida dichos problemas y eliminaría posibles controversias entre supervisión y contratista.

Además sería conveniente, plasmar conocimientos de este tema para normas en los manuales del Ministerio de Transportes y Comunicaciones, entidad encargada del control del transporte en el Perú.

## **1.5 OBJETIVOS**

### **1.5.1 Objetivo general**

Debido, a la necesidad de conocer cuál es el porcentaje real del cemento asfáltico, en un momento dado de la producción de la Mezcla Asfáltica, y discriminar los resultados relativos del porcentaje del cemento asfáltico, se planteó como objetivo principal:

Determinar una ecuación de corrección del porcentaje de cemento asfáltico a partir de la variación del porcentaje de agregados en la toma del carguío del volquete y en la faja transportadora.

### **1.5.2 Objetivos específicos**

- Identificar la variación del porcentaje de cemento asfáltico a partir de la variación del porcentaje de agregados en la toma del carguío del volquete y en la faja transportadora.
- Establecer la ecuación de corrección del porcentaje de cemento asfáltico real a partir de la variación del porcentaje de agregados en la toma del carguío del volquete y en la faja transportadora.
- Validar la ecuación de corrección del porcentaje de cemento asfáltico.

## **1.6 HIPÓTESIS**

### **1.6.1 Hipótesis global**

La determinación de una ecuación corrige el porcentaje de cemento asfáltico a partir de la variación del porcentaje de agregados en la toma del carguío del volquete y en la faja de transportadora.

### **1.6.2 Subhipótesis**

- Existe variación del porcentaje de cemento asfáltico a partir de la variación del porcentaje de agregados en la toma del carguío del volquete y en la faja transportadora.
- Es factible establecer una ecuación de corrección del porcentaje de cemento asfáltico a partir de la variación del porcentaje de agregados en la toma del carguío del volquete y en la faja de transportadora.
- Es factible la validación de la ecuación de corrección del porcentaje de cemento asfáltico.

## **CAPÍTULO II**

### **ESTADO DEL ARTE**

---

#### **2.1 ANTECEDENTES**

Castro (2002), realizó la investigación: “Evaluación estadística de métodos para determinar el contenido de asfalto y la granulometría de mezclas asfálticas”, el propósito de dicho estudio fue: valorar la exactitud y la precisión de diversas técnicas de laboratorio empleadas para la determinación del contenido de asfalto y granulometría en mezclas de concreto asfáltico. Se fundamenta en la necesidad de establecer elementos de comparación para las diversas técnicas disponibles actualmente (con diferencias de tiempo de ensayo, costo y proceso), lo cual es particularmente relevante cuando se cuenta con varias fuentes de información de laboratorio que procuran describir la misma población de interés (un lote de producción de mezcla asfáltica sujeto a aceptación y pago), caso por ejemplo del contraste de resultados de control (contratista) y verificación de calidad (contratante). El estudio se basa en la evaluación de tres fuentes de agregado de distinta mineralogía y representativas de la materia prima aplicada en la producción de mezcla asfáltica en Costa Rica, dos curvas granulométricas (de acuerdo con las especificaciones costarricenses) y tres contenidos de asfalto.



Esta investigación llega a la conclusión que el efecto particular de la fuente de agregado es uno de los parámetros más significativos en cuanto a la determinación del contenido de asfalto; las propiedades del agregado y su mineralogía son de alta significancia en la estimación del contenido de asfalto por métodos directos e indirectos. Dentro de este contexto, es de particular consideración la aplicación de coeficientes de corrección, para cualquier método de ensayo, sea por extracción de solventes, por incineración o por irradiación con neutrones. Igualmente, los cambios en las propiedades de los materiales deben ser detectados oportunamente, para poder determinar el cambio en los factores de corrección correspondientes.

Uribe (2016), menciona que al resultado del porcentaje de cemento asfáltico mediante el método del Horno de ignición, se le debe restar un factor de corrección del agregado. Este factor de corrección es calculado experimentalmente, realizando una calcinación de una mezcla asfáltica con un porcentaje conocido e igualmente una calcinación de una mezcla de agregados.

## **2.2 BASE TEÓRICA**

### **2.2.1 Ensayos para la producción de una mezcla asfáltica**

El Asphalt Institute (1992) menciona que:

*El uso moderno del asfalto para carreteras y construcción de calles comenzó a finales del siglo XIX, y creció rápidamente con el surgimiento de la industria automotriz. Desde entonces la tecnología del asfalto ha dado grandes pasos. Hoy en día, los equipos y los procedimientos usados para construir estructuras de pavimentos asfálticos son bastante sofisticados.*

*Una regla que no ha cambiado a través del tiempo de la larga historia del asfalto en la construcción, es la siguiente: Un pavimento es tan bueno como los materiales y calidad del proceso constructivo. Ningún equipo sofisticado puede compensar el uso de materiales y técnicas constructivas deficientes (pág. 9).*

Queda claro que el asfalto es uno de los materiales de mayor incidencia en la construcción de carreteras, incluido el Perú, por lo que es necesario tener un especial cuidado durante su proceso de extracción, producción y mantenimiento.

Para tener un buen control en el asfalto y en los demás materiales para la producción de la mezcla asfáltica, es necesario realizar los ensayos necesarios de manera adecuada. Para esto existe diversidad de ensayos para distintas fases de la producción. Tenemos por ejemplo los siguientes ensayos para el asfalto antes de la producción: viscosidad (ASTM D2170), penetración a 25°C (ASTM D5), punto de inflamación (ASTM D92), Ductilidad a 25°C (ASTM D113), Solubilidad en tricloroetileno (ASTM D2042), etc. Tenemos también los siguientes ensayos para el asfalto después de la producción: lavado asfáltico (ASTM D2172), rice (ASTM D2041), etc. Y no olvidemos el ensayo de Marshall (ASTM D1559).

Enfocándonos en el caso del ensayo de lavado asfáltico utilizado en el Perú, norma ASTM D2172 o MTC E 502, donde el método más utilizado es la centrifuga (ítem 10 del MTC E 502), la norma indica cómo calcular el contenido de asfalto de la muestra. El inconveniente en este ensayo, es que no se toma en cuenta la ligera diferencia en la granulometría de la muestra utilizada en este ensayo y la muestra tomada al inicio de la producción (en la faja transportadora), siendo esta última la que se encuentra en producción en la planta.

### **2.2.2 Agregados para la mezcla asfáltica**

“En el diseño de una mezcla asfáltica en caliente intervienen dos materiales indispensables que son los agregados pétreos y el asfalto” (Cortez, Guzmán, & Reyes, 2007).

Definimos como agregado pétreo a aquel material granular natural o procesado, ya sea en forma de arena, grava, piedra triturada o escoria. Es el agregado el que proporciona la capacidad portante a la mezcla.

En forma general, los agregados se clasifican en: sedimentarios, ígneos y metamórficas; por su parte el agregado sedimentario se subdivide en silíceo y calcáreo, el agregado ígneo se subdivide en intrusiva y extrusiva, y el agregado metamórfico se subdivide en foliados y no foliados (Asphalt Institute, 1992).

Con el propósito de usar los agregados en una mezcla asfáltica, este se puede clasificar en gravas (con un tamaño mayor o igual a 6.35mm ó 1/4"), el cual aporta resistencia, y las arenas o finos (con un tamaño menor a 6.35mm y mayor o igual a 0.075mm), que aporta trabajabilidad; adicionalmente se puede hablar del filler mineral, que influye en la cantidad de vacíos de la mezcla asfáltica y otras características (Asphalt Institute, 1992).

El Asphalt Institute (1992) menciona que:

*El relleno mineral y el polvo mineral están presentes en los agregados naturales y también son producidos, como subproductos, en la trituración de muchos tipos de rocas. Ellos son esenciales para la producción de una mezcla densa, cohesiva, durable, y resistente a la penetración del agua. Sin embargo, un pequeño porcentaje de más, o de menos, de relleno o polvo mineral puede causar que la mezcla parezca excesivamente seca o excesivamente rica (o sea, la mezcla de pavimentación aparecerá como si tuviera muy poco asfalto o demasiado asfalto) (pág. 44).*

Cortez, Guzmán & Reyes (2007) mencionan que:

*Los agregados son de una gran importancia ya que en una mezcla asfáltica constituyen entre el 90 y el 95 por ciento en peso, y entre el 75 y 85 por ciento en volumen; es de mencionar que la calidad de la mezcla asfáltica depende de la calidad de los materiales constituyentes y la capacidad de carga de la carpeta es proporcionada esencialmente por los agregados, de esto se deriva la importancia de una adecuada selección y manejo de los materiales pétreos que serán utilizados para elaborar una mezcla asfáltica (pág. 9).*

*Tabla 1 Clasificación de agregados*

<b>Clase</b>	<b>Tipo</b>	<b>Familia</b>
Sedimentaria	Calcareas	Caliza
		Dolomita
	Siliceas	Arcilla esquistosa
		Arenisca
		Horsteno
		Conglomeraado
Metamórfica	Foliadas	Breccia
		Gneis
		Esquisto
		Anfibolita
	No foliadas	Pizarra
		Cuarcita
		Mármol
Ígneas	Intrusivas (de grano grueso)	Serpentina
		Granito
		Sienita
		Diorita
		Gabbro
		Periodotita
		Piroxenita
	Hornablendita	
	Extrusivas (de grano fino)	Obsidiana
		Pómez
		Tufa
		Riolita
		Traquita
		Andesita
Basalto		
Diabasa		

*Fuente: Asphalt Institute. (1992). Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente*

### **2.2.2.1 Agregados gruesos**

Los agregados gruesos son aquellos que quedan retenidos hasta la malla número 4 o tamiz de 4.75 mm, pues es el tamiz más cercano al tamaño de 6.35mm; los cuales pueden derivar de distintos procesos de formación geológica.

*Figura 1 Agregado grueso*



*Fuente: elaboración propia (cantera CY-1, Ancomarca, Palca, Tacna)*

#### **2.2.2.2 Agregados finos**

Los agregados finos son aquellos que pasan la malla número 4 o tamiz de 4.75 mm y quedan retenidos en la malla número 200 o tamiz de 75  $\mu\text{m}$  .

*Figura 2 Agregado fino*



*Fuente: elaboración propia (cantera Km. 47+500, Palca, Palca, Tacna)*

### **2.2.3 Canteras y chancadora**

En el documental de Discovery Chanel (s.f.) se menciona que:

*La cantera es el lugar de producción de agregados, donde los operarios utilizan maquinaria pesada para recoger las rocas que caen tras volar las paredes de roca.*

*Los camiones transportan las rocas a la fábrica o planta de pavimentos ubicada cercana a la propia cantera, depositando su carga en la trituradora, una máquina cuyas mandíbulas de acero transforman las rocas en fragmentos de unos 20cm.*

*La trituradora principal descarga los fragmentos, a través de una cinta transportadora, hacia una zona de almacenamiento; posteriormente los fragmentos de roca viajan hacia un edificio de criba en donde es clasificada por tamaños; las piedras más grandes se envían a un segundo proceso de trituración para ser molidas y que sus tamaños no sobrepasen los 10cm, después se envían a otros procesos de trituración hasta que finalmente se obtengan fragmentos de 2cm o menos.*

*Una vez culminado el proceso de trituración los agregados son almacenados según su tamaño.*

### **2.2.4 Acopio de agregados**

Es necesario cuidar bien el almacenamiento de los materiales para la producción de la mezcla asfáltica. En el caso de los agregados, su acopio debe realizarse mediante métodos que garanticen que no exista contaminación ni segregación.

La segregación en el acopio de los agregados, consiste en la separación por tamaños, por ello los agregados más gruesos tienden a bajar a la base y los finos se quedarían en la superficie, por lo que se tendría gran variación en la gradación de agregado en distintos lugares de acopio (Asphalt Institute, 1992).

Para esto existen algunas técnicas o métodos para acopiar adecuadamente el agregado, según el Asphalt Institute (1992) tenemos las siguientes:

**Acopio por separación.** Consiste en separar por tamaños para ser mezclados en el momento de la producción y así, cumplir la gradación específica de la mezcla asfáltica.

**Acopio por capas.** Consiste en almacenar el agregado por montones o capas para minimizar la segregación.

A estos agregados acopiados se les debe practicar un ensayo granulométrico para tener la garantía de cumplir con las especificaciones del proyecto; la forma de elegir las muestras para realizar este ensayo es denominado: Método Normal para muestreo aleatorio (ASTM D3665), el cual depende de la cantidad y tamaño de los agregados (Asphalt Institute, 1992).

## **2.2.5 Selección de agregados**

### **2.2.5.1 Propiedades de los agregados**

Las propiedades de los agregados para el uso en una mezcla asfáltica en caliente son:

1. Gradación y tamaño máximo
2. Limpieza
3. Dureza
4. Forma de la partícula
5. Textura
6. Capacidad de absorción
7. Afinidad con el asfalto
8. Peso específico

### **2.2.5.2 Gradación y tamaño máximo**

Existen diversas recomendaciones de curvas granulométricas características para el uso de agregados en una mezcla asfáltica en caliente.

Es así que el agregado debe cumplir con ciertas especificaciones para que sea considerado aceptable en la producción del asfalto.

En la tabla 2 tenemos las especificaciones de la granulometría de los agregados para la producción de la mezcla asfáltica en caliente tipo 2 (MAC-2).

*Tabla 2 Granulometría para la MAC-2*

<b>Tamiz</b>		<b>Intervalo admisible</b>
<b>(pulg)</b>	<b>(mm)</b>	
3	76.2	
2	50.8	
1 1/2	38.1	
1	25.4	
3/4	19	100-100
1/2	12.5	80-100
3/8	9.5	70-88
# 4	4.75	51-68
# 8	2.36	
# 10	2	38-52
# 16	1.19	
# 20	0.84	
# 30	0.6	
# 40	0.425	17-28
# 50	0.3	
# 80	0.177	8-17
# 100	0.15	
# 200	0.075	4-8
<#200	0	

*Fuente: Expediente técnico del Proyecto Integración Vial Tacna – La Paz*

El tamaño de las partículas más grandes en la muestra debe ser determinado, debido a que las especificaciones hablan de un tamaño máximo de partículas para cada agregado usado. Según el Asphalt Institute (1992) existen dos formas de designar el tamaño máximo de partículas.

- Tamaño máximo nominal de partícula, designado como un tamiz más grande que el primer tamiz que retiene más del 10% de las partículas de agregado, en una serie normal de tamices.
- Tamaño máximo de partículas. Designado como un tamiz más grande que el tamaño máximo nominal de partícula. Típicamente, este tamiz es más pequeño por el cual pasa el 100% de las partículas de agregado.



### 2.2.5.3 Limpieza

El Asphalt Institute (1992) menciona que:

*Las especificaciones de la obra generalmente penen un límite a los tipos y cantidades de materiales indeseables (vegetación, arcilla esquistosa, partículas blandas, terrones de arcilla, etc.) en el agregado. Las cantidades excesivas de estos materiales pueden afectar desfavorablemente el comportamiento del pavimento (pág. 51).*

Un ensayo habitual para esta propiedad es el equivalente de arena (AASHTO T176), que es un método para determinar la proporción indeseable de polvo fino y arcilla.

### 2.2.5.4 Dureza

“Los agregados deben ser capaces de resistir la abrasión (desgaste irreversible) y degradación durante la producción, colocación, y compactación de la mezcla de pavimentación, y durante la vida de servicio de pavimento”. (Asphalt Institute, 1992, pág. 51)

El ensayo para medir esta propiedad es el ensayo de Desgaste de los Ángeles (AASHTO T96), que mide la resistencia de un agregado al desgaste y la abrasión como el porcentaje del peso perdido de la muestra (tras haber realizado el ensayo) respecto al peso antes del ensayo.

*Figura 3 Máquina de Desgaste de Los Ángeles*



*Fuente: [www.aconstructoras.com](http://www.aconstructoras.com)*

#### **2.2.5.5 Forma de la partícula**

El Asphalt Institute (1992) indica lo siguiente:

*La forma de la partícula afecta a la trabajabilidad de la mezcla de pavimentación durante su colocación, así como a la cantidad de fuerza necesaria para compactar la mezcla a la densidad requerida. La forma de la partícula también afecta la resistencia de la estructura del pavimento durante su vida (pág. 52).*

#### **2.2.5.6 Textura superficial**

El Asphalt Institute (1992) menciona que:

*La textura superficial de las partículas de agregado es otro factor que determina no solo la trabajabilidad y resistencia final de la mezcla de pavimentación, sino también las características de resistencia al deslizamiento en la superficie del pavimento. Algunos consideran que la textura superficial es más importante que la forma de la partícula. Una textura áspera, como la del papel de lija, aumenta la resistencia en el pavimento debido a que evita que las partículas se muevan unas respecto a otras, y a la vez provee un coeficiente alto de fricción superficial que hace que el movimiento del tránsito sea más seguro (pág. 53).*

#### **2.2.5.7 Capacidad de absorción**

El Asphalt Institute (1992) define a la capacidad de absorción como:

*La capacidad de un agregado de absorber agua (o asfalto) es un elemento importante de información. Si un agregado es altamente absorbente, entonces continuara absorbiendo asfalto después del mezclado inicial en planta, dejando así menos asfalto en la superficie para ligar las demás partículas de agregado (pág. 53).*

“Los agregados altamente porosos y absorbentes no son normalmente usados, a menos de que posean otras características que la hagan deseable, a pesar de su alta capacidad de absorción” (Asphalt Institute, 1992, pág. 54).

#### **2.2.5.8 Afinidad con el asfalto**

El Asphalt Institute (1992) menciona que:

*La afinidad d un agregado con el asfalto es la tendencia del agregado a aceptar y retener una capa de asfalto. Las calizas, las dolomitas, y las rocas trapeanas tienen alta afinidad con el asfalto y son conocidas como hidrofóbicas (repelen el agua) porque resisten los esfuerzos del agua por separar el asfalto de sus superficies (pág. 54).*

*Los agregados hidrofílicos (atraen agua) tienen poca afinidad con el asfalto. Por consiguiente, tienden a separarse de las películas de asfalto cuando son expuestos al agua (pág. 54).*

#### **2.2.5.9 Peso específico**

El Asphalt Institute (1992) lo define de la siguiente manera:

*El peso específico de agregado es la proporción entre el peso de un volumen dado de agregado y el peso de un volumen igual de agua. El peso específico es una forma de expresar las características de peso y volumen de los materiales. Estas características son especialmente importantes en la producción de mezclas de pavimentación debido a que el agregado y el asfalto son proporcionados, en la mezcla, de acuerdo al peso (pág. 48).*

#### **2.2.6 Asfalto**

En el documental de Discovery Chanel (s.f.) se menciona que:

*El asfalto es una sustancia líquida de color negro derivada de la destilación del petróleo crudo; es un material bituminoso resultado de la mezcla de distintos hidrocarburos parafínicos, aromáticos y compuestos heterocíclicos que contienen azufre, nitrógeno y oxígeno. La mayoría de los hidrocarburos livianos se eliminan durante el proceso de refinación, quedando los más pesados y de moléculas complejas.*

*Figura 4 Asfalto natural*



*Fuente: carmelourso.wordpress.com*

En la página web civilgeeks (2017), el autor señala:

*El asfalto es un material aglomerante, resistente, muy adhesivo, altamente impermeable y duradero; capaz de resistir altos esfuerzos instantáneos y fluir bajo acción de calor o cargas permanentes. Componente natural de la mayor parte de los petróleos, en los que existe en disolución y que se obtiene como residuo de la destilación al vacío del crudo pesado. Es una sustancia plástica que da flexibilidad controlable a las mezclas de áridos con las que se le combina usualmente. Su color varía entre el café oscuro y el negro; de consistencia sólida, semisólida o líquida, dependiendo de la temperatura a la que se exponga o por la acción de disolventes de volatilidad variable o por emulsificación.*

*El asfalto consta de tres componentes mayoritarios. El primero se describe como una mezcla de asfáltenos que son moléculas complejas de alto peso molecular, insoluble en hidrocarburos parafínicos y soluble en compuestos aromáticos como el benceno. El segundo componente descrito es una mezcla de resinas y el tercero aceite mineral. Estos tres constituyen un sistema coloidal.*

Según el Asphalt Institute (1992), el asfalto puede ser clasificado en forma general en los siguientes 3 tipos:

1. Cemento asfáltico
2. Asfalto diluido
3. Asfalto emulsificado

Es precisamente el cemento asfáltico el utilizado en una mezcla asfáltica en caliente, tema de investigación de esta tesis.

Mediante un criterio técnico el asfalto se clasifica según:

1. Su viscosidad a 60°C.
2. Su viscosidad después del envejecimiento.
3. Su resistencia a la penetración.

#### **2.2.6.1 Calcificación según su viscosidad a 60°C**

Regida según el AASHTO M226. En la cual se tienen los tipos AC-2.5, AC-5, AC-10, AC-20, AC-30 y AC-40, cuyos números indican la viscosidad a 60°C en centenas de poises (centímetro-gramo-segundo) con una tolerancia de la quinta parte de su viscosidad; es decir el AC-20 tiene una viscosidad de 2000 poises con una tolerancia de  $2000/5 = 400$  poises.

Además es importante detallar que un asfalto con mayor viscosidad es denominado asfalto “duro”, y uno con menor viscosidad se llama asfalto “blando”. Según esta clasificación el asfalto más blando sería el AC-2.5, y el más duro es el AC-40.

#### **2.2.6.2 Calcificación según su viscosidad después del envejecimiento**

Regida según el AASHTO M226, es mayormente usado en el oeste de los Estados Unidos, y cuya idea es identificar cuáles son las características de la viscosidad después colocar el asfalto en el pavimento. En esta clasificación se tienen los tipos AR-10, AR-20, AR-40, AR-80 y AR-160, cuyos números indican la viscosidad después del envejecimiento en centenas de poises con una tolerancia de la cuarta parte de su viscosidad; es decir el AR-80 tiene una viscosidad después del envejecimiento de 8000 poises con una tolerancia de  $8000/4 = 2000$  poises.

Según esta clasificación el asfalto más blando sería el AR-10, y el más duro es el AR-160.

### **2.2.6.3 Calcificación según su resistencia a la penetración**

Regida según el AASHTO M20. Sistema ampliamente usado en el Perú. El ensayo se efectúa con una aguja que penetra dentro de la muestra de asfalto bajo una carga que por lo general es de 100Kg durante 5 segundos. La distancia que la aguja penetra en la muestra es medida en décimas de milímetro (0.1mm). En esta clasificación se tienen los tipos PEN 40-50, PEN 60-70, AR-40, PEN 85-100, PEN 120-150 y PEN 200-300, cuyos números indican la variación de la penetración media según dicho ensayo.

Según esta clasificación el asfalto más blando sería el PEN 200-300, y el más duro es el PEN 40-50.

### **2.2.7 Propiedades físicas del asfalto**

Para el Asphalt Institute (1992), las propiedades físicas de asfalto son:

1. Durabilidad
2. Adhesión y cohesión
3. Susceptibilidad a la temperatura
4. Envejecimiento y endurecimiento

#### **2.2.7.1 Durabilidad**

Esta propiedad es entendida como la medida de que tanto puede retener un asfalto, sus características originales cuando es expuesto a procesos normales de degradación y envejecimiento. Es una propiedad juzgada principalmente a través del comportamiento del pavimento (Asphalt Institute, 1992).

Para evaluar esta propiedad del asfalto se utiliza el ensayo de Prueba de Película Delgada en Horno (TFO) o la Prueba de Película Delgada en Horno Giratorio (RTFO).

#### **2.2.7.2 Adhesión y cohesión**

Adhesión, “es la capacidad del asfalto para adherirse al agregado en la mezcla de pavimentación. Cohesión es la capacidad del asfalto de mantener firmemente, en su puesto las partículas del agregado en el pavimento terminado” (Asphalt Institute, 1992, pág. 18).

### **2.2.7.3 Susceptibilidad a la temperatura**

El Asphalt Institute (1992) menciona que:

*Todos los agregados son termoplásticos; esto es, se vuelven más duros (más viscosos) a medida que su temperatura disminuye, y más blandos (menos viscoso) a medida que su temperatura aumenta. Esta característica se conoce como susceptibilidad a la temperatura, y es una de las propiedades más valiosas en un asfalto. La susceptibilidad a la temperatura varía entre asfaltos de petróleos de diferente origen, aún si los asfaltos tienen el mismo grado de consistencia (pág. 18).*

### **2.2.7.4 Endurecimiento y envejecimiento**

El Asphalt Institute (1992) menciona que:

*Los asfaltos tienden a endurecerse en la mezcla asfáltica durante la construcción, y también en el pavimento terminado. Este endurecimiento es causado principalmente por el proceso de oxidación (el asfalto combinándose con el oxígeno), el cual ocurre más fácilmente a altas temperaturas (como las temperaturas de construcción) y en películas delgadas de asfalto (como la película que cubre las partículas de agregado) (pág. 20).*

### **2.2.8 Mezcla asfáltica**

En la página web civilgeeks (2017), se define lo siguiente:

*Con tal nombre se definen las mezclas de material pétreo y productos asfálticos, elaborados, ya sea en el lugar que se van a utilizar, empleando conformadoras o mezcladoras ambulantes, o en planta fija. Desde luego, las mezclas de mejor calidad son las que se elaboran en planta fija, porque el producto asfáltico se reparte con mayor uniformidad en los agregados.*

*Las mezclas asfálticas tienen la propiedad de formar una carpeta compacta con el mínimo de vacíos, ya que se usan materiales graduados, lo cual hace que sea uniforme, resistente a las deformaciones producidas por las cargas, y prácticamente impermeable.*

*El concreto asfáltico en caliente, es aquel formado por cemento de asfalto y agregados graduados a altas temperaturas. También podemos tener asfalto colocado en frío, para el cual se emplea asfalto líquido frío y agregados fríos.*

Sobre el particular, en la página web civilgeeks (2017), se explica que, los pavimentos de asfalto se colocan por dos métodos generales:

1. Vaciando una mezcla caliente o fría de asfalto con agregados finos y gruesos, ya sea preparada en planta o mezclada en el sitio sobre una base preparada previamente.
2. Colocando bloques y losetas de asfalto sobre una losa de concreto armado y recibéndolos sobre asfalto fresco.

### **2.2.9 Diseño de mezcla asfáltica**

El Asphalt Institute (1992) menciona que:

*En una mezcla asfáltica en caliente de pavimentación, el asfalto y el agregado son combinados en proporciones exactas. Las proporciones relativas de estos materiales determinan las propiedades físicas de la mezcla y, eventualmente, el desempeño de la misma como pavimento terminado (pág. 57).*

#### **2.2.9.1 Características en el comportamiento de la mezcla**

El análisis está enfocado en cuatro características de la mezcla asfáltica. Estas son:

1. Densidad de la mezcla
2. Vacíos de aire
3. Vacíos de agregado mineral (VMA)
4. Contenido de asfalto

Según el Asphalt Institute (1992), la densidad de la mezcla asfáltica está definida por su peso unitario, siendo esta, calculada como la gravedad específica total de la mezcla por la densidad del agua (1000 kg/m<sup>3</sup>).

Además el Asphalt Institute (1992) menciona que:

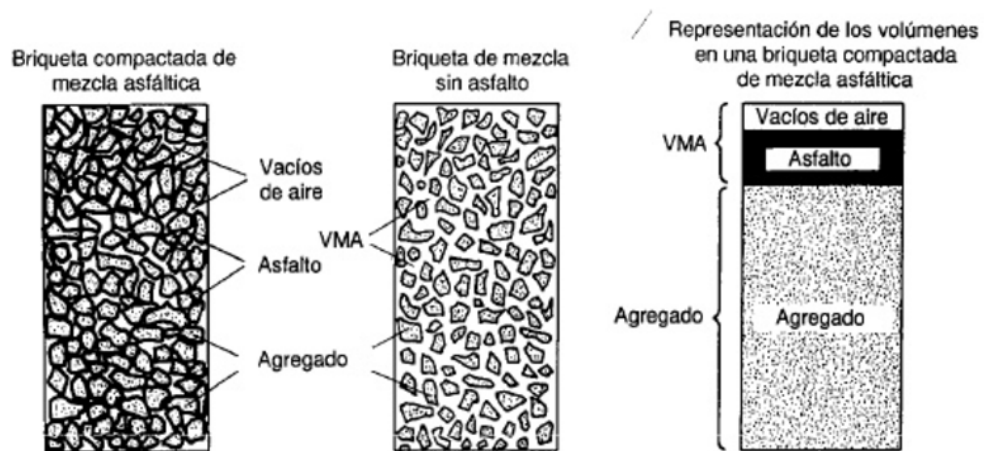


Los vacíos de aire son los espacios pequeños de aire (bolsas de aire), que están presentes entre los agregados revestidos en la mezcla final compactada. Es necesario que todas las mezclas densamente graduadas contengan cierto grado de vacíos para permitir alguna compactación adicional bajo el tráfico, y proporcionar espacios a donde pueda fluir el asfalto durante esta compactación adicional. El porcentaje permitido de vacíos (en muestras de laboratorio) para capas de base y capas superficiales está entre 3 y 5 por ciento, dependiendo del diseño específico (pág. 58).

Los vacíos en el agregado mineral (VMA) son los espacios de aire que existen entre las partículas de agregados en una mezcla compactada de pavimentación, incluyendo los espacios que están llenos de asfalto (pág. 58).

El contenido óptimo de asfalto de una mezcla depende, en gran parte, de las características del agregado, tales como la granulometría y la capacidad de absorción. La granulometría del agregado está directamente relacionado con el contenido óptimo de asfalto. Entre más finos contenga la graduación de la mezcla, mayor será el área superficial total, y mayor será la cantidad de asfalto requerido para cubrir, uniformemente, todas las partículas. Por otro lado, las mezclas más gruesas (agregados más grandes) exigen menos asfalto debido a que poseen menos área superficial total (pág. 60).

Figura 5 Ilustración del VMA en una prueba de mezcla compactada



Fuente: Asphalt Institute. (1992). Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente

*Tabla 3 Requisitos de vacíos en el agregado mineral*

Máximo tamaño de partícula nominal		Porcentaje mínimo VMA		
		Porcentaje diseño vacíos de aire		
mm	in	3.0	4.0	5.0
1.18	No.16	21.5	22.5	23.5
2.36	No.8	19.0	20.0	21.0
4.75	No.6	16.0	17.0	18.0
9.5	3/8.	14.0	15.0	16.0
12.5	1/2.	13.0	14.0	15.0
19	3/4.	12.0	13.0	14.0
25	1.0	11.0	12.0	13.0
37.5	1.5	10.0	11.0	12.0

*Fuente: Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2000). Extracción cuantitativa del asfalto en mezclas para pavimentos*

### **2.2.9.2 Propiedades en el diseño de mezcla**

Según el Asphalt Institute (1992), las propiedades que influyen en una mezcla asfáltica en caliente son:

1. Estabilidad
2. Durabilidad
3. Impermeabilidad
4. Trabajabilidad
5. Flexibilidad
6. Resistencia a la fatiga
7. Resistencia al deslizamiento

La estabilidad es la propiedad que mide la resistencia al desplazamiento y deformación bajo cargas de tránsito. La estabilidad depende de la fricción y la cohesión interna. Si esta propiedad no es la adecuada en la mezcla asfáltica, se generarán problemas de ahuellamientos, hundimientos, etc. (Asphalt Institute, 1992).

*Tabla 4 Causas y efectos de la inestabilidad en el pavimento*

**ESTABILIDAD BAJA**

Causas	Efectos
Exceso de asfalto en la mezcla	Ondulaciones, ahuellamiento, y afloramiento o exudación
Exceso de arena de tamaño medio en la mezcla	Baja resistencia durante la compactación
Agregado redondeado sin, o sin pocas, superficies trituradas	Ahuellamiento y canalización

*Fuente: Asphalt Institute. (1992). Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente*

La durabilidad, es la propiedad que mide la resistencia a la desintegración del agregado, cambios en las propiedades del asfalto y separación de partículas (Asphalt Institute, 1992).

*Tabla 5 Causas y efectos de una poca durabilidad*

**POCA DURABILIDAD**

Causas	Efectos
Bajo contenido de asfalto	Endurecimiento rápido del asfalto y desintegración por pérdida de agregado
Alto contenido de vacíos debido al diseño o a la falta de compactación	Endurecimiento temprano del asfalto seguido por agrietamiento o desintegración
Agregados susceptibles al agua (hidrofílicos)	Películas de asfalto se desprenden del agregado dejando un pavimento desgastado, o desintegrado

*Fuente: Asphalt Institute. (1992). Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente*

La impermeabilidad, es la propiedad que mida la resistencia de la mezcla asfáltica, al paso de aire y agua hacia su interior o a través de él (Asphalt Institute, 1992).

*Tabla 6 Causas y efectos de la permeabilidad*

MEZCLA DEMASIADO PERMEABLE

Causas	Efectos
Bajo contenido de asfalto	Las películas delgadas de asfalto causaran, tempranamente, un envejecimiento y una desintegración de la mezcla
Alto contenido de vacíos en la mezcla	El agua y el aire pueden entrar fácilmente en el pavimento, causando oxidación y desintegración de la mezcla
Compactación inadecuada	Resultará en vacíos altos en el pavimento, lo cual conducirá a infiltración de agua y baja estabilidad

*Fuente: Asphalt Institute. (1992). Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente*

La trabajabilidad, se entiende como la propiedad de una mezcla asfáltica, que mide la facilidad para la colocación y compactación (Asphalt Institute, 1992).

*Tabla 7 Causas y efectos de problemas en la trabajabilidad*

MALA TRABAJABILIDAD

Causas	Efectos
Tamaño máximo de partículas: grande	Superficie áspera, difícil de colocar
Demasiado agregado grueso	Puede ser difícil de compactar
Temperatura muy baja de mezcla	Agregado sin revestir, mezcla poco durable; superficie áspera, difícil de compactar
Demasiada arena de tamaño medio	La mezcla se desplaza bajo la compactadora y permanece tierna o blanda
Bajo contenido de relleno mineral	Mezcla tierna, altamente permeable
Alto contenido de relleno mineral	Mezcla muy viscosa, difícil de manejar; poco durable

*Fuente: Asphalt Institute. (1992). Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente*

La flexibilidad de una mezcla asfáltica, viene a ser la capacidad para acomodarse sin agrietarse a movimientos y asentamientos graduales de la sub rasante. Mejorar esta propiedad conlleva a disminuir la propiedad de estabilidad (Asphalt Institute, 1992).

La resistencia a la fatiga se considera como la propiedad de resistir a la flexión repetida bajo las cargas de tránsito. Una mezcla con menor cantidad de vacíos conlleva a una alta resistencia a la fatiga (Asphalt Institute, 1992).

*Tabla 8 Causas y efectos de una mala resistencia a la fatiga*

MALA RESISTENCIA A LA FATIGA	
Causas	Efectos
Bajo contenido de asfalto	Agrietamiento por fatiga
Vacíos altos de diseño	Envejecimiento temprano del asfalto, seguido por agrietamiento por fatiga
Falta de compactación	Envejecimiento temprano del asfalto, seguido por agrietamiento por fatiga
Espesor inadecuado de pavimento	Demasiada flexión seguida por agrietamiento por fatiga

*Fuente: Asphalt Institute. (1992). Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente*

La resistencia al deslizamiento, es la propiedad de minimizar el deslizamiento o resbalamiento de las ruedas de un vehículo, sobre todo cuando la superficie esta mojada (Asphalt Institute, 1992).

*Tabla 9 Causas y efectos de poca resistencia al deslizamiento*

POCA RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO	
Causas	Efectos
Exceso de asfalto	Exudación, poca resistencia al deslizamiento
Agregado mal graduado o con mala textura	Pavimento liso, posibilidad de hidropilado
Agregado pulido en la mezcla	Poca resistencia al deslizamiento

*Fuente: Asphalt Institute. (1992). Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente*

#### **2.2.10 Método de Marshall**

Según el Asphalt Institute (1992), el objetivo general del procedimiento de diseño consiste en determinar una combinación y gradación económica de agregados (dentro

de los límites de las especificaciones del proyecto) y asfalto que produzcan una mezcla con:

1. Suficiente asfalto para garantizar un pavimento durable.
2. Adecuada estabilidad para que satisfaga las demandas de tránsito sin producir deformaciones o desplazamientos.
3. Un contenido de vacíos lo suficiente alto para permitir una ligera cantidad de compactación adicional bajo las cargas de tránsito sin que se produzca exudación o pérdida de estabilidad, y todavía lo suficiente bajo para no dejar penetrar los efectos dañinos del aire y agua.
4. Suficiente trabajabilidad para permitir una colocación eficiente sin segregación.

El ensayo Marshall surgió de una investigación iniciada por el cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos en 1943. Varios métodos para el diseño y control de mezclas asfálticas fueron comparados y evaluados para desarrollar un método simple (Cáceres, 2007).

Posteriormente se dieron modificaciones para pasar a ser normalizado como ASTM D1559.

El propósito del método de Marshall es “determinar el contenido óptimo de asfalto para una combinación específica de agregados”. (Asphalt Institute, 1992, pág. 70) Debido a ello es importante que el contenido de asfalto esté relacionado con la cantidad de agregados de producción.

En el estudio de Garnica & otros (2004) se menciona:

*El método original de Marshall, sólo es aplicable a mezclas asfálticas en caliente para pavimentación que contengan agregados con un tamaño máximo de 25 mm (1”) o menor. El método modificado se desarrolló para tamaños máximo arriba de 38 mm (1.5”). Está pensado para diseño en laboratorio y control de campo de mezclas asfálticas en caliente con graduación densa. Debido a que la prueba de estabilidad es de naturaleza empírica, la importancia de los resultados en términos de estimar el comportamiento en*

*campo se pierde cuando se realizan modificaciones a los procedimientos estándar (pág. 3).*

*El método Marshall utiliza especímenes de prueba estándar de una altura de 64 mm (2 1/2") y 102 mm (4") de diámetro. Se preparan mediante un procedimiento específico para calentar, mezclar y compactar mezclas de asfalto-agregado. (ASTM D1559). Los dos aspectos principales del método de diseño son, la densidad-análisis de vacíos y la prueba de estabilidad y flujo de los especímenes compactados (pág. 3).*

*La estabilidad del espécimen de prueba es la máxima resistencia en N (lb) que un espécimen estándar desarrollará a 60 ° C cuando es ensayado. El valor de flujo es el movimiento total o deformación, en unidades de 0.25 mm (1/100") que ocurre en el espécimen entre estar sin carga y el punto máximo de carga durante la prueba de estabilidad (pág. 3).*

*La selección del contenido óptimo de asfalto depende de muchos criterios que se discutirán en este capítulo. Un punto inicial para el diseño es escoger el porcentaje de asfalto para el promedio de los límites de vacíos de aire, el cual es 4%. Todas las propiedades medidas y calculadas bajo este contenido de asfalto deberán ser evaluadas comparándolas con los criterios para el diseño de mezclas. Si todos los criterios se cumplen, entonces se tendrá el diseño preliminar de la mezcla asfáltica, en caso de que un criterio no se cumpla, se necesitará hacer ajustes, o rediseñar la mezcla (pág. 5).*

Figura 6 Prensa para el ensayo de Marshall



Fuente: proetisa.com

Tabla 10 Criterios de evaluación del método de Marshall

Método Marshall	Tráfico ligero		Tráfico medio		Tráfico pesado	
	Carpeta y base		carpeta y base		carpeta y base	
Criterio de mezcla	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx
Compactación, número de golpes en cada uno de los especímenes	35		50		75	
Estabilidad, (N) (lb)	3336		5338		8006	
	750	----	1200	----	1800	----
Flujo, (0.25 mm) (0.01 in)	8	18	8	16	8	14
Porcentaje de vacíos	3	5	3	5	3	5
Porcentaje de vacíos en los agregados minerales	Ver Tabla 2.2					
Porcentaje de vacíos rellenos de asfalto	70	80	65	78	65	75

Fuente: Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2000). Extracción cuantitativa del asfalto en mezclas para pavimentos Propiedades en el diseño de mezcla



Según el American Society of Testing of Materials (1998), los equipos necesarios para esta prueba son:

1. Prensa hidráulica
2. Comparadores o medidores de deformación
3. Estufa
4. Balanza
5. Termómetro
6. Moldes
7. Mordazas
8. Collarines
9. Masa de compactación
10. Base de compactación
11. Baño de agua (baño maría)
12. Bandejas, espátulas, filtros, cronómetro, etc.

Los pasos previos al ensayo (preparación) son los siguientes:

1. Determinar las cualidades (estabilidad, durabilidad, trabajabilidad, resistencia al deslizamiento, resistencia a la fatiga, etc.) que debe poseer la muestra.
2. Seleccionar las muestras de material.
3. Secar el agregado a 110°C., determinar su peso específico y granulometría.
4. Preparar las muestras con distintos porcentajes de cemento asfáltico los cuales por lo general varían cada 0.5%.

Carrasco (2004) menciona lo siguiente:

*Las probetas de ensayo de las posibles mezclas de pavimentación son preparadas haciendo que cada una contenga una ligera cantidad diferente de asfalto. El margen de contenidos de asfalto usado en las briquetas de ensayo está determinado con base en experiencia previa con los agregados de la mezcla. Este margen le da al laboratorio un punto de partida para determinar el contenido exacto de asfalto en la mezcla final. La proporción de agregado en las mezclas está formulada por los resultados del análisis granulométrico (pág. 8).*

El ensayo de Marshall se realiza en las siguientes fases: diseño, control (durante el proceso de producción) y post construcción (verificación en campo).

#### **2.2.10.1 Ensayo de Marshall en laboratorio**

En el ensayo de Marshall en laboratorio, Carrasco (2004) explica que las muestras son preparadas de la siguiente manera:

1. El asfalto y el agregado se calientan completamente hasta que todas las partículas del agregado estén revestidas. Esto simula los procesos de calentamiento y mezclado que ocurren en la planta.
2. Las mezclas asfálticas calientes se colocan en los moldes pre-calentados como preparación para la compactación, en donde se usa el martillo de compactación, el cual también es calentado para que no enfríe la superficie de la mezcla al golpearla.
3. Las briquetas son compactadas mediante golpes del martillo de compactación. El número de golpes del martillo (35, 50 o 75) depende de la cantidad de tránsito para la cual está siendo diseñada. Ambas caras de cada briqueta reciben el mismo número de golpes. Así, una probeta Marshall de 35 golpes recibe, realmente un total de 70 golpes. Una probeta de 50 golpes recibe 100 impactos. Después de completar la compactación las probetas son enfriadas y extraídas de los moldes.

Según el Asphalt Institute (1992), el procedimiento del método de Marshall consiste en:

1. Determinar el peso específico de cada probeta compactada, tan pronto como estas se hayan enfriado.
2. Calentar las probetas en un baño maría a 60°C. Esta temperatura representa normalmente, la temperatura más caliente que un pavimento en servicio va a experimentar.
3. Remover la probeta del baño y secarla, para colocar rápidamente en la prensa de Marshall. El equipo consiste de un dispositivo que aplica una carga sobre la probeta, y unos medidores de carga de deformación (fluencia).

4. La carga de ensayo se aplica a la probeta a una velocidad de 2 pulgadas por minuto hasta que la muestra falle.
5. La carga de falla se registra como el valor de estabilidad y la lectura del medidor de fluencia se registra como la fluencia medida en centésimas de pulgada.
6. Una vez que se completan los ensayos de estabilidad y fluencia, se procede a efectuar un análisis de densidad de vacíos para cada serie de probetas de prueba. Mediante este análisis se determinan los vacíos, peso unitario, vacíos de agregado mineral (VMA), y vacíos llenos de asfalto (VFA).

#### **2.2.10.2 Ensayo de Marshall en campo**

Según Ulloa (2011), el propósito de la verificación de la mezcla asfáltica en planta es controlar el contenido óptimo de asfalto para una combinación específica de agregados, de acuerdo al diseño de la mezcla y la fórmula de trabajo establecido para cada proyecto.

La muestra tomada del carguío del volquete de la planta de asfalto es utilizada para distintos ensayos, entre ellos el ensayo de Marshall.

El procedimiento para preparar las muestras es el siguiente:

1. La mezcla asfáltica caliente se colocan en los moldes pre-calentados como preparación para la compactación, en donde se usa el martillo de compactación, el cual también es calentado para que no enfríe la superficie de la mezcla al golpearla.
2. Las briquetas son compactadas mediante golpes del martillo de compactación. El número de golpes del martillo (35, 50 o 75) depende de la cantidad de tránsito para la cual está siendo diseñada. Ambas caras de cada briqueta reciben el mismo número de golpes. Así, una probeta Marshall de 35 golpes recibe, realmente un total de 70 golpes. Una probeta de 50 golpes recibe 100 impactos. Después de completar la compactación las probetas son enfriadas y extraídas de los moldes.

Luego de tener las muestras preparadas se realiza en el ensayo de Marshall con el mismo procedimiento explicado en la sección anterior.

Además Ulloa (2011) menciona que la verificación de la mezcla asfáltica antes de ser colocada para su compactación es un control paralelo o equivalente de las mismas propiedades volumétricas del diseño y fórmula de trabajo determinadas para un proyecto dado evaluadas en planta. Por lo tanto se realizan los mismos ensayos mencionados anteriormente.

### **2.2.11 Planta de asfalto**

Bobadilla (2000) define a la planta de asfalto como:

*Es el conjunto de elementos mecánicos dispuestos de manera que produzcan concreto asfáltico con todas las especificaciones requeridas, es decir, que contengan los sistemas que permitan calibrar la dosificación de agregados, cemento asfáltico y la temperatura necesaria para su mezclado. Por la diversidad de la capacidad de producción pueden ser chicas 45 toneladas por hora (TPH), hasta 500 toneladas por hora (TPH), además, otra característica que define a una planta, es la facilidad para transportarse e instalarse y pueden ser: plantas portátiles o estacionarias. Sin embargo la variante más importante para su clasificación es el sistema de producción, y se define como planta de producción continua y planta de producción discontinua (o de dosificación) (pág. 11).*

*Figura 7 Planta de asfalto*



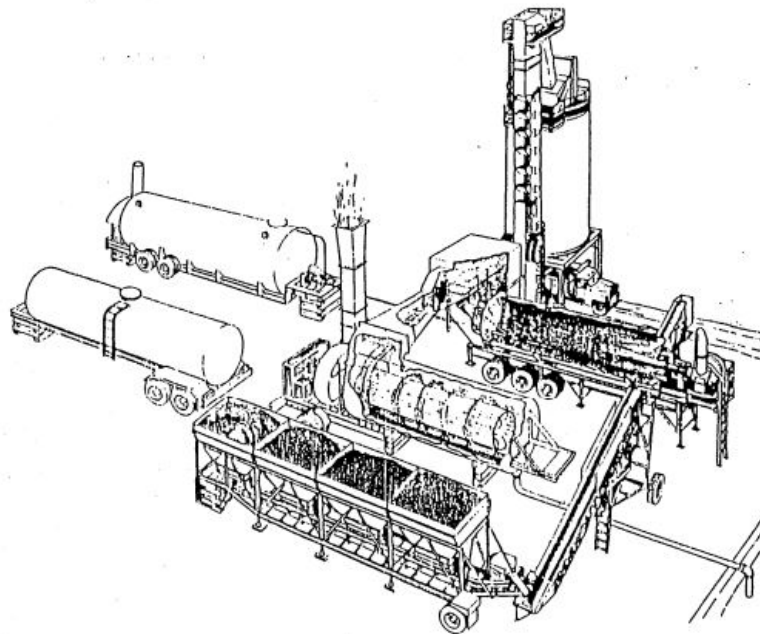
*Fuente: [www.directindustry.es](http://www.directindustry.es)*

### 2.2.11.1 Planta de producción continua

Según Bobadilla (2000), el proceso de elaboración de la mezcla asfáltica en este sistema consta de los siguientes pasos:

1. Dosificación de los agregados.
2. Homogenización y secado de los agregados.
3. Inyección de asfalto.
4. Mezclado y almacenamiento.
5. Carga de la mezcla final al camión.

*Figura 8 Planta de producción continua*



*Fuente: Asphalt Institute. (1992). Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente*

Para Bobadilla (2000), la dosificación de agregados y asfalto en este sistema es por flujo y no por peso.

### 2.2.11.2 Planta de producción discontinua o de dosificación

Según Bobadilla (2000), es la planta en la cual los agregados son proporcionados, mezclados y calentados con el cemento asfáltico para producir una mezcla asfáltica en caliente. Estas plantas pueden ser de baja a alta producción, además pueden ser portátiles o estacionarios.

El proceso general de este tipo de producción es el siguiente:

1. Almacenamiento y dosificación en frío del agregado.
2. Secado y calentamiento del agregado.
3. Cribado y almacenamiento del agregado caliente.
4. Almacenamiento y calentamiento del cemento asfáltico.
5. Calibrado y mezclado del agregado y cemento asfáltico.
6. Carga de la mezcla final en caliente.

Agrega Bobadilla (2000) que: los agregados son alimentados y pesados en cantidades controladas, al ser combinados con el asfalto.

Para la presente investigación, es importante detallar que en el proceso de dosificación del agregado, se verificó que esté ingresando una cantidad de agregados adecuados de acuerdo al estudiado en laboratorio (al momento de realizar el diseño de mezcla). Para verificar esta dosificación se realizó un análisis granulométrico con una muestra extraída de la faja transportadora (esta muestra es tomada de 1m de faja). Esta granulometría es la que se tomó como referencia para corregir el porcentaje de cemento asfáltico, calculado en el ensayo de lavado asfáltico, pues es esta la granulometría de producción.

#### **2.2.12 Ensayo de lavado asfáltico**

El objetivo de este ensayo es determinar el porcentaje de cemento asfáltico presente en una mezcla.

Los resultados de los ensayos de extracción por centrifugado en la máquina de lavado asfáltico indicaran el contenido de bitumen o cemento asfáltico de la mezcla asfáltica (Asphalt Institute, 1992).

“El ligante del pavimento es extraído con tricloroetileno, 1,1,1-tricloroetano, cloruro de metileno, o benceno, empleando el equipo de extracción aplicable al método particular”. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2000)

“El contenido de asfalto se calcula por diferencia del peso del agregado extraído, del contenido de humedad y del material mineral en el extracto. El contenido de asfalto

se expresa como porcentaje en peso de las mezclas libres de humedad”. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2000)

Según el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2000), los aparatos a ser utilizados en esta prueba son:

- Estufa, que pueda mantener la temperatura a  $100 \pm 5^\circ C$ .
- Recipiente, de tamaño apropiado, para calentar los especímenes.
- Balanzas o básculas y pesas con aproximación mínima de 0.01%.
- Plancha de calentamiento eléctrica de 700W u otra graduable.
- Probetas de boca pequeña de 1000 o 2000 ml de capacidad, y opcionalmente, de 100 ml de capacidad.
- Cápsulas de porcelana de 125ml de capacidad (para ignición).
- Desecador.

También para el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2000), los reactivos a ser utilizados en esta prueba son:

- Solución saturada de carbonato de amonio  $(NH_4)_2 CO_3$ , químicamente puro
- Cloruro de metileno, químicamente puro.
- Tricloroetileno químicamente puro
- Benceno químicamente puro.

Adicionalmente, si se sigue el método “A” del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2000), se requieren los siguientes aparatos:

- **Máquina centrífuga.** Es un aparato que aplica una fuerza centrífuga sostenida, es decir una fuerza producida por rotación, para impeler la materia hacia afuera del centro de rotación. Este principio se utiliza para separar partículas en un medio líquido por sedimentación.
- **Anillos filtrantes o filtro de papel.** Es un dispositivo que elimina o selecciona ciertas partículas de acuerdo al tamaño. Utilizado para impedir que partículas pequeñas y la gasolina queden impregnadas en la tapa.

Adicionalmente a lo indicado en la norma, se requieren algunos instrumentos para el manipuleo durante el ensayo, estos son:

- Bandeja de muestreo, utilizado para contener la muestra.
- Espátula y brocha, empleadas para separar la muestra del papel filtro.
- Tina, utilizada para verter la gasolina hacia la maquina centrifuga para lavado asfáltico.
- Tamices, utilizados para obtener la granulometría de la muestra.
- Cucharón de aluminio.

El procedimiento general es:

1. Se extrae una muestra asfáltica de los volquetes de carguío el cual se desintegra por medio del chancado, luego se procede a mezclar para tener una muestra homogénea.
2. Cuarteamos la mezcla para obtener la homogeneidad en ella.
3. Agregamos la muestra y también el tricloroetileno a la centrifuga, luego procedemos a echar el combustible (gasolina) con el embudo, con la espátula removemos suavemente.
4. Tapar con el filtro y luego empernar la tapa de la centrifuga.
5. Luego de encerrar la tapa procedemos a encender la maquina centrifuga.
6. Girando suavemente vamos aumentando y luego disminuyendo el número de revoluciones hasta cero para luego apagar la maquina centrifuga
7. Golpear suavemente la otra tapa del embudo, y con una brocha limpiar la arena pegada en esta zona del embudo.
8. Con la espátula limpiar la arena pegada en los bordes laterales.
9. Dejar secar a temperatura ambiente, para lograr así la evaporación completa del disolvente.
10. Vaciar el agregado seco en un recipiente previamente tarado y hacer el proceso de Tamizado de la muestra de agregado seco.

Al extraer la muestra del volquete de carguío y luego ser verificado, se tiene que los porcentajes de agregados en esta toma no son necesariamente iguales a los porcentajes de los agregados dosificados en la faja transportadora. Tal y como se



describe en la siguiente sección, en la actualidad no se toma ninguna corrección en el cálculo para mitigar y/o corregir esta variación de gradación de los agregados.

### **2.2.12.1 Cálculos en el ensayo de lavado asfáltico**

Según el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2000), American Society of Testing Materials (2017) y American Association of State Highway and Transportation Officials (2014), los cálculos a los que se procede en el ensayo de lavado asfáltico, para poder obtener el porcentaje de cemento asfáltico, son:

1. Calcular el peso del agua (W2), en la porción del ensayo de extracción, multiplicando el porcentaje en peso del agua, por el peso de la porción del ensayo de extracción (W1).
2. Colocar la porción del ensayo de extracción en la taza de la centrifuga y cubrir con tricloroetileno, dejando el tiempo suficiente para que el disolvente lo desintegre (nomás de 1 hora); luego se podrá iniciar el centrifugado a una velocidad máxima de 3600RPM, hasta que deje de fluir solvente por el desagüe; detener la máquina y añadir 200 ml de solvente y repetir el procedimiento; finalmente extraer el agregado (W3) y añadir a este el agregado contenido en el filtro (W4).
3. Finalmente, el porcentaje de cemento asfáltico contenido en la muestra se calcula como:

$$\% CA = \frac{(W1 - W2) - (W3 + W4)}{(W1 - W2)} 100\% \quad (1)$$

Donde (W1 – W2) indica el peso de la muestra descontándole el peso de agua contenida en esta, y (W3 + W4) representa el peso de los agregados contenidas en la muestra.

Posteriormente se realiza alternativamente la granulometría del agregado extraído, aunque, como se puede ver en los cálculos, esta no es tomada en cuenta, motivo que conllevó a realizar la presente investigación.

### **2.2.13 Característica geométrica de los agregados**

Las características geométricas de los agregados son la base más importante para la presente investigación. A continuación se explica cómo influye este parámetro en la

cantidad del cemento asfáltico en una muestra, mostrando así una deficiencia en los resultados finales de los cálculos en el ensayo de lavado asfáltico.

Sabemos que los agregados para la producción de mezcla asfáltica se pueden clasificar en agregados gruesos y finos. Una mezcla con mayor cantidad de agregados finos posee una mayor área superficial, mientras que una mezcla con mayor cantidad de agregados gruesos posee menor área superficial debido a poseer mayores dimensiones. El asfalto, en el proceso de producción de la mezcla, cubrirá la superficie de estos agregados, por lo que existe relación directa entre el asfalto y la superficie de los agregados.

Ahora, si se tiene un agregado grueso y este es dividido en partículas más pequeñas, ¿qué pasará con el área superficial? Tomemos como ejemplo un cubo de  $a$  cm de lado; el área superficial de este será  $6a^2$ , esta vendría a ser el área que cubre el cemento asfáltico; ahora si este cubo se parte en 8 cubos iguales de  $a/2$  cm de lado el área superficial entre los 8 nuevos cubos será  $12a^2$ , esta área es mayor por lo que se requerirá una mayor cantidad de cemento asfáltico para cubrirlo.

Entonces se puede concluir que cuanto mayor cantidad de finos o materiales más pequeños se tenga, la cantidad de cemento asfáltico en la muestra será mayor.

Afirmación confirmada por el Asphalt Institute (1992):

*El contenido óptimo de asfalto de una mezcla depende, en gran parte, de las características del agregado tales como la granulometría y la capacidad de absorción. La granulometría del agregado está directamente relacionada con el contenido óptimo del asfalto. Entre más finos contenga la graduación de la mezcla, mayor será el área superficial total, y, mayor será la cantidad de asfalto requerida para cubrir, uniformemente, todas las partículas. Por otro lado las mezclas más gruesas (agregados más grandes) exigen menos asfalto debido a que poseen menos área superficial total (pág. 60).*

Con esta cita, también podemos deducir que cuanto más agregados gruesos se tenga, se tendrá menor cantidad de asfalto.

#### **2.2.14 Errores en la medición del porcentaje del cemento asfáltico**

Como se mencionó, los cálculos en el ensayo de lavado asfáltico no toman en cuenta la variación de la cantidad de agregados gruesos y finos, por ende, esto conlleva a un error en este cálculo (este error es demostrado con los resultados presentados en el capítulo 4 de la presente investigación).

Para justificar esta afirmación se tomaran las citas expuestas líneas arriba según el Asphalt Institute (1992):

*El propósito del método de Marshall es determinar el contenido óptimo de asfalto para una combinación específica de agregados [...]. El contenido óptimo de asfalto de una mezcla depende, en gran parte, de las características del agregado tales como la granulometría y la capacidad de absorción. La granulometría del agregado está directamente relacionada con el contenido óptimo del asfalto. Entre más finos contenga la graduación de la mezcla, mayor será el área superficial total, y, mayor será la cantidad de asfalto requerida para cubrir, uniformemente, todas las partículas. Por otro lado las mezclas más gruesas (agregados más grandes) exigen menos asfalto debido a que poseen menos área superficial total (pág. 60-70).*

Debido a esto es importante que el contenido de asfalto esté relacionado con la cantidad de agregados de producción y no otra.

De esta manera queda claro que en la actualidad hace falta corregir este error en la medición del porcentaje de cemento asfáltico, motivo que conllevó a determinar la ecuación de corrección de la presente investigación, y que además se aproveche los cálculos ya realizados durante la producción en planta.

##### **2.2.14.1 Teoría de errores**

Según Ortiz & Díaz (2010):

*Los errores pueden ser producidos, por la imprecisión de los aparatos de medida, que reciben el nombre de errores sistemáticos, o causa de agentes externos o del propio operador, que reciben el nombre de errores accidentales. Mientras que los primeros se repiten en el mismo sentido, siempre que se utiliza*

*el mismo aparato de medida, los segundos varían de una experiencia a otra, tanto en valor como en signo (pág. 1).*

#### **2.2.14.2 Error absoluto**

“El error en general podemos definirlo como la diferencia que tenemos entre el valor obtenido y el verdadero”. (Ortiz & Díaz, 2010, pág. 1)

A este error se le denomina error absoluto, y si llamamos  $x$  a la medición y  $X$  al valor verdadero, el error absoluto según Ortiz & Díaz (2010) será:

$$E_a = X - x \quad ( 2 )$$

Entonces tendremos luego que:

$$X = x + E_a \quad ( 3 )$$

Es decir el valor verdadero es el valor medido más el error absoluto.

Pero si el valor medido fuese mayor al valor real tendríamos la ecuación:

$$E_a = x - X \quad ( 4 )$$

Por tanto, tendremos también la ecuación:

$$X = x - E_a \quad ( 5 )$$

#### **2.2.15 Ecuación**

Uspensky (1995) define a una ecuación como:

*Sea  $f(x)$  un polinomio con coeficientes reales o complejos y grado  $\geq 1$ . Igualándolo a cero tenemos la ecuación  $f(x) = 0$  que se llama ecuación algebraica. En esta ecuación la  $x$  representa un número desconocido que la satisface, es decir, que sustituido en  $f(x)$  da cero como resultado. Cualquier número que satisface la ecuación propuesta se llama raíz (pág. 57).*

*Figura 9 Forma de una ecuación algebraica*

$$\begin{array}{l} a_0 x + a_1 = 0 \\ a_0 x^2 + a_1 x + a_2 = 0 \\ a_0 x^3 + a_1 x^2 + a_2 x + a_3 = 0 \\ a_0 x^4 + a_1 x^3 + a_2 x^2 + a_3 x + a_4 = 0 \\ \text{etc.} \end{array}$$

*Fuente: Uspensky, J. (1995). Teoría de Ecuaciones*

Para el presente estudio, la incógnita  $x$ , de la ecuación determinada, es el porcentaje de cemento asfáltico real o corregido, el cual depende de otros valores como son: el porcentaje de cemento asfáltico calculado por el ensayo de lavado asfáltico y el porcentaje de agregados gruesos.

## **CAPÍTULO III**

### **MATERIALES Y MÉTODOS**

---

#### **3.1 POBLACIÓN Y MUESTRA**

##### **3.1.1 Población**

La población objeto de estudio, estuvo constituida por los ensayos de lavado asfáltico realizados en la obra “Proyecto Integración Vial Tacna – La Paz”, del tramo Tacna – Collpa (frontera con Bolivia), sub tramos Km 146+180 (dv. Tripartito) – Km 187+404 (frontera con Bolivia) y Km. 43+610 - Km. 94+000.

##### **3.1.2 Muestra**

La muestra estuvo constituida por 47 ensayos realizados en la obra “Proyecto Integración Vial Tacna – La Paz”, del tramo Tacna – Collpa (frontera con Bolivia), sub tramos Km 146+180 (dv. Tripartito) – Km 187+404 (frontera con Bolivia) y Km. 43+610 - Km. 94+000, considerando las canteras CY-1 y cantera Km. 47+500.

En la cantera CY-1 se realizaron 35 ensayos divididos en dos grupos de 7 y 28 ensayos; los primeros 7 ensayos se utilizaron para estudiar el fenómeno y la ecuación, mientras que los otros 28 ensayos se utilizaron para validar la ecuación. En la cantera Km. 47+500 se realizaron 12 ensayos, los cuales se utilizaron para validar la ecuación.

*Figura 10 Ubicación de las canteras*



*Fuente: Google maps*

### 3.1.3 Tipo de muestreo

El tipo de muestreo fue no probabilístico, porque se consideró al total de las muestras tomadas (47).

*Tabla 11 Dimensiones del porcentaje de cemento asfáltico y porcentaje de grava*

Dimensión	Variables	Unidad de medida
Faja transportadora	Grava	%
	Asfalto	%
Ensayo de lavado asfáltico	Grava	%
	Asfalto	%
Ecuación	Grava	%
	Asfalto	%

*Fuente: elaboración propia*

## 3.2 EQUIPOS Y MATERIALES

Se tomaron los datos del lavado asfáltico rutinario, en un promedio de cuatro lavados asfálticos diarios.

### **3.2.1 Equipos**

Se dispuso de una planta portátil que consta de las siguientes partes:

#### **Planta portátil (TEREX).**

- Silos dosificadores
- Secador contraflujo
- Quemador
- Mezclador
- Sistema de filtrado
- Equipo de inyección de cemento asfáltico
- Elevador

#### **Equipos y herramientas para el lavado asfáltico.**

Los equipos y reactivos que se utilizaron para el lavado asfáltico son los siguientes:

- Bandeja de muestreo
- Cucharón de aluminio
- Espátula, brocha
- Centrífuga
- Horno o cocina para secado
- Balanza digital
- Juego de tamices

### **3.2.2 Materiales**

- Se utilizaron agregados, tanto finos como gruesos (gravas), acopiados en las canchas de almacenamiento, previamente seleccionados para poder ser usados en el mezclado de la producción del asfalto.
- Se utilizó cemento asfáltico de PEN 120-150, para la producción de la mezcla asfáltica.
- Para el ensayo de lavado asfáltico se utilizó papel filtro y tricloroetileno como solvente.



### 3.3 PROCEDIMIENTO

El experimento inició en un trabajo rutinario de la obra, comenzando con el carguío del agregado.

*Figura 11 Agregados para elaboración de la mezcla*



*Fuente: elaboración propia*

Luego se procedió a elaborar la mezcla y extraerla del carguío del volquete para posteriormente pesarla.

*Figura 12 Carguío del volquete*



*Fuente: elaboración propia*

Una vez que se contaba con la muestra, se procedió a realizar el ensayo de lavado asfáltico.

*Figura 13 Colocación de la mezcla y el solvente*



*Fuente: elaboración propia*

Luego se procedió a cerrar la tapa de la centrífuga.

*Figura 14 Cerrado de la centrífuga*



*Fuente: elaboración propia*

Se encendió la centrífuga para comenzar con la extracción del asfalto.

*Figura 15 Encendido de la centrífuga*



*Fuente: elaboración propia*

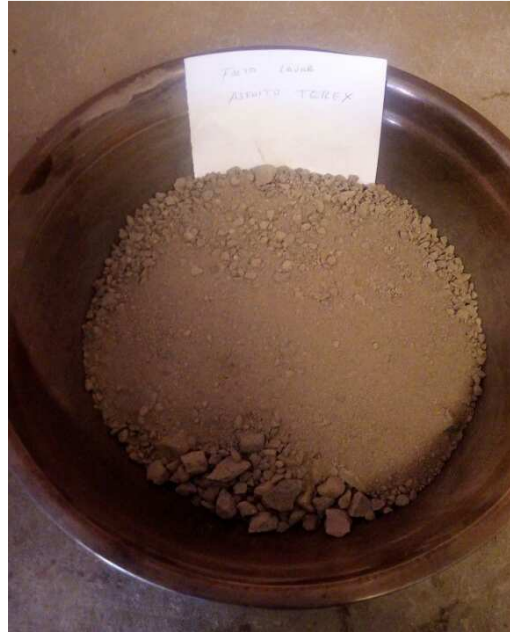
Una vez finalizado el uso de la centrífuga (4 series), se retiró la mezcla separada y se esperó a que el solvente se volatilice.

*Figura 16 Mezcla separada después del uso de la centrífuga*



*Fuente: elaboración propia*

*Figura 17 Agregado separado de la mezcla asfáltica*



*Fuente: elaboración propia*

Finalmente se procedió a hacer el tamizado y pesado del agregado separado de la mezcla.

*Figura 18 Tamizado de los agregados separados de la mezcla*



*Fuente: elaboración propia*

*Figura 19 Pesado del agregado separado de la mezcla*



*Fuente: elaboración propia*

### **3.4 RESULTADOS**

La ecuación de corrección del porcentaje de cemento asfáltico corrige este a partir de la variación del porcentaje de agregados en la toma del carguío del volquete y en la faja transportadora.

En vista que la altitud y clima no influyen en la ecuación, esta puede ser aplicada siempre que el método usado para la extracción del asfalto sea el lavado asfáltico con centrífuga.

## **CAPÍTULO IV**

### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

---

#### **4.1 INDICADORES DE LAS VARIABLES EN LA ECUACIÓN**

Los indicadores de las variables que se utilizó para establecer la ecuación de la presente investigación fueron:

1. El porcentaje de cemento asfáltico real.
2. El porcentaje de cemento asfáltico aparente.
3. El porcentaje de grava en la faja transportadora.
4. El porcentaje de grava en la mezcla tomada del carguío del volquete (mezcla usada en el ensayo de lavado asfáltico).

Haber tomado como referencia el porcentaje de grava o el porcentaje de finos es indistinto, ya que ambos son complementarios (su suma es 100%).

No se tomaron en cuenta otros indicadores pues al tratarse del mismo agregado, durante todo el proceso, estas permanecen constantes; además que se utilizaron valores que en la actualidad se miden en plena producción, para así no adicionar otros ensayos u otras medidas que conlleva mayor tiempo, y uso de materiales.

## 4.2 ESTUDIO DEL FENÓMENO Y LA ECUACIÓN

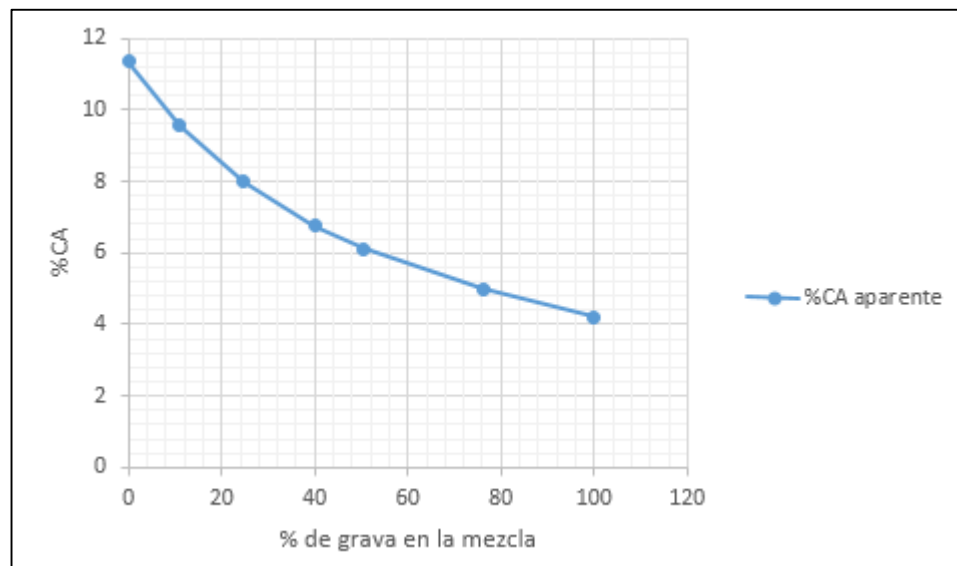
El objetivo principal, fue establecer la ecuación que parta de la forma básica siguiente:

$$X = x \pm E_a \quad (6)$$

Donde  $X$  es el porcentaje de cemento asfáltico real,  $x$  es el porcentaje de cemento asfáltico aparente y  $E_a$  es el valor que corrige al porcentaje de cemento asfáltico aparente.

Iniciando con la investigación se procedió a observar el fenómeno, para lo cual, la muestra tomada del carguío del volquete fue separada mediante distintas mallas con tal de tener 7 muestras (grupo 1) con distintos porcentajes de grava, que van desde 0% (con 100% de finos) hasta el 100% (con 0% de finos). A estas muestras se les aplicó el ensayo de lavado asfáltico reportándose distintos contenidos de cemento asfáltico. A este porcentaje de cemento asfáltico, calculado en el ensayo de lavado asfáltico, se le llamó porcentaje de cemento asfáltico aparente.

*Figura 20 Porcentaje de cemento asfáltico aparente de los ensayos del grupo 1*



*Fuente: elaboración propia*

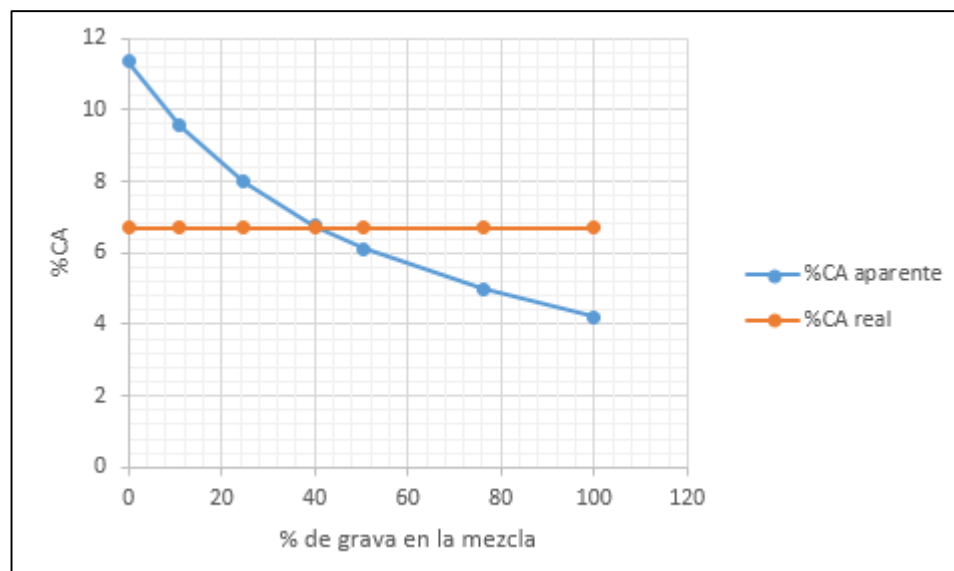
Se observó que el porcentaje de cemento asfáltico aparente variaba para distintos porcentajes de grava en la mezcla, tomando su valor máximo de 11.35% para 0% de

grava y un valor mínimo de 4.20% para 100% de grava. Cabe mencionar que el porcentaje de grava en la mezcla se refiere a la mezcla tomada del carguío del volquete, utilizada para en ensayo de lavado asfáltico. El porcentaje de grava en la faja transportadora, para dicho día de producción, fue de 41.27%, y el porcentaje de cemento asfáltico según el diseño fue de 6.7%.

Se consideró que el porcentaje de cemento asfáltico real debería ser el de diseño. Entonces, ya que el objetivo fue encontrar una ecuación que relacione: el porcentaje de cemento asfáltico real, el porcentaje de cemento asfáltico aparente y el porcentaje de grava; se pudo observar que: mientras el porcentaje de cemento asfáltico real permanece constante, la gráfica indica que el porcentaje de cemento asfáltico aparente y el porcentaje de grava son inversamente proporcionales, un dato que se usó posteriormente.

La siguiente figura muestra el porcentaje de cemento asfáltico real y el porcentaje de cemento asfáltico aparente en relación con el porcentaje de grava de la muestra del ensayo de lavado asfáltico.

*Figura 21 Comparación del porcentaje de cemento asfáltico aparente y real*



*Fuente: elaboración propia*

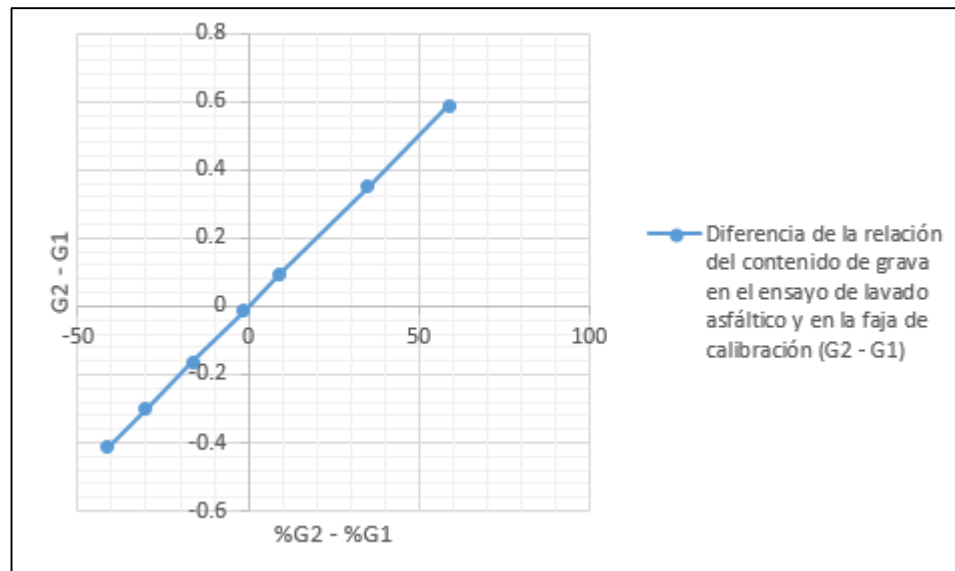
En la gráfica se observó que los porcentajes de cemento asfáltico son muy próximos cuando el porcentaje de grava es próximo al de la faja transportadora. Además se



observó que para corregir el porcentaje de cemento asfáltico aparente, se necesita disminuir este valor en cierto intervalo, y en otro intervalo aumentar este valor; siendo el límite que marca las partes de disminución y aumento, el porcentaje de grava en la faja transportadora (41.27% para dicho día).

La siguiente figura muestra, en el eje Y, la diferencia de las relaciones del contenido de grava en el ensayo de lavado asfáltico (G2) y en la faja transportadora (G1 = 0.4127), y en el eje X, esta misma medida en porcentaje (%G2 - %G1) para asemejarse a las dos gráficas anteriores.

*Figura 22 Diferencia de las relaciones del contenido de grava en el ensayo de lavado asfáltico y en la faja transportadora*



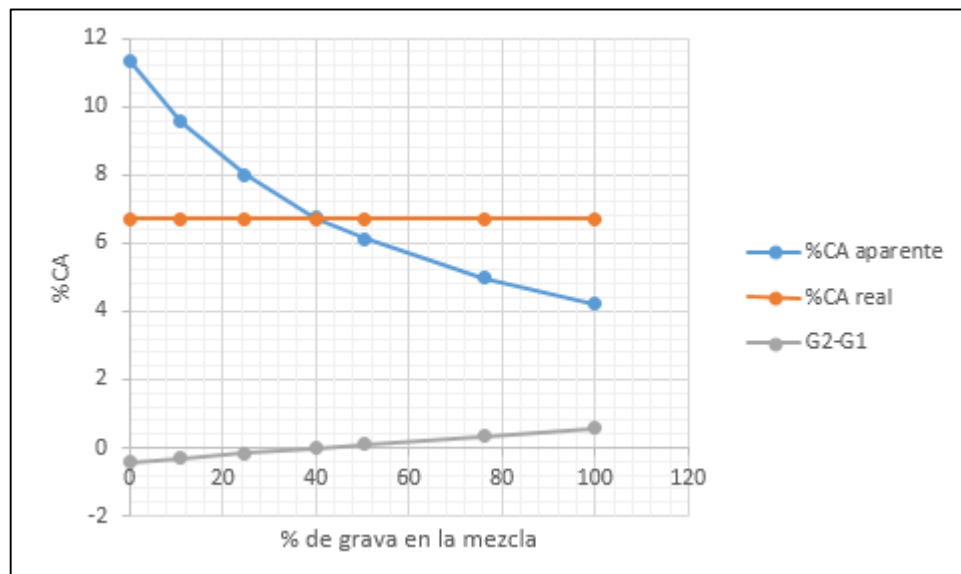
*Fuente: elaboración propia*

Entonces, se observó que este dato tiene una parte negativa y otra positiva, y cuyo límite entre estas partes tiene relación con el contenido de porcentaje de grava en la faja transportadora (%G1), ya que, el mínimo valor en el eje X es  $\%G2 - \%G1 = 0\% - 41.27\% = -\%G1$ , siendo por lo tanto la distancia horizontal entre este punto y el origen de coordenadas (punto que marca el límite de la parte negativa y positiva) igual a la distancia horizontal entre el origen de coordenadas y el límite que marca las partes de disminución y aumento del gráfico anterior (figura 27). Adicionalmente el máximo valor en este mismo eje es  $\%G2 - \%G1 = 100\% - 41.27\% = 58.73\%$ , siendo en el eje Y estos mismos números pero sin porcentajes (-0.4127 y

0.5873). Por lo tanto los valores de esta gráfica (figura 28) son los adecuados para corregir al contenido de cemento asfáltico aparente.

La siguiente figura muestra los datos conseguidos hasta ese momento, todos graficados en función al porcentaje de grava en el ensayo de lavado asfáltico.

Figura 23 %CA aparente, %CA real y G2-G1 vs % de grava



Fuente: elaboración propia

En la gráfica se observó que el límite entre la parte de disminución y aumento coincide con la parte negativa y positiva, tal y como se había concluido.

Hasta ese momento la forma que tenía la ecuación, partiendo de la forma básica  $X = x \pm E_a$ , era:

$$\%CA_{real} = \%CA_{aparente} + C(G2 - G1) \quad (7)$$

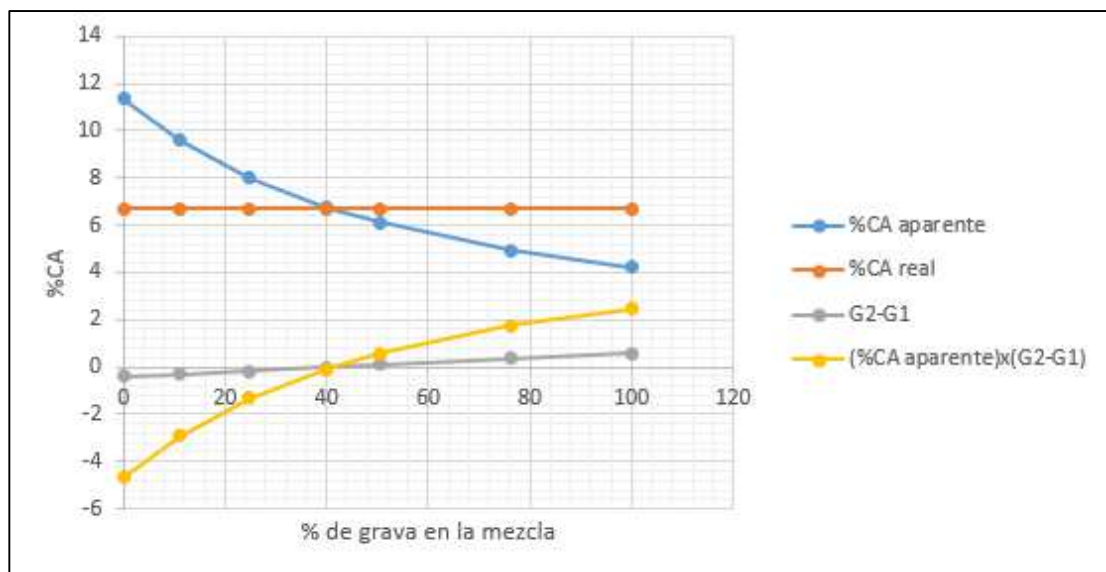
Donde  $C$  es un factor de corrección, además se debe notar que sólo se consideró la suma, debido a que  $(G2 - G1)$  ya incluye valores positivos y negativos.

Para encontrar  $C$ , recordemos que se había concluido que el porcentaje de cemento asfáltico aparente y el porcentaje de grava son inversamente proporcionales, y siendo los valores de  $G1$  y  $G2$  los valores del porcentaje de grava sin expresar en porcentaje,

también son inversamente proporcional con el porcentaje de cemento asfáltico aparente. Por lo que estos pueden multiplicarse, siendo  $C = \%CA_{aparente}$ .

En la siguiente figura se tienen los valores anteriores y además esta última multiplicación de  $\%CA_{aparente}(G2-G1)$ .

Figura 24  $\%CA$  aparente,  $\%CA$  real, diferencia de  $G2-G1$  y  $(\%CA \text{ real}) \times (G2-G1)$  vs  $\%$  de grava



Fuente: elaboración propia

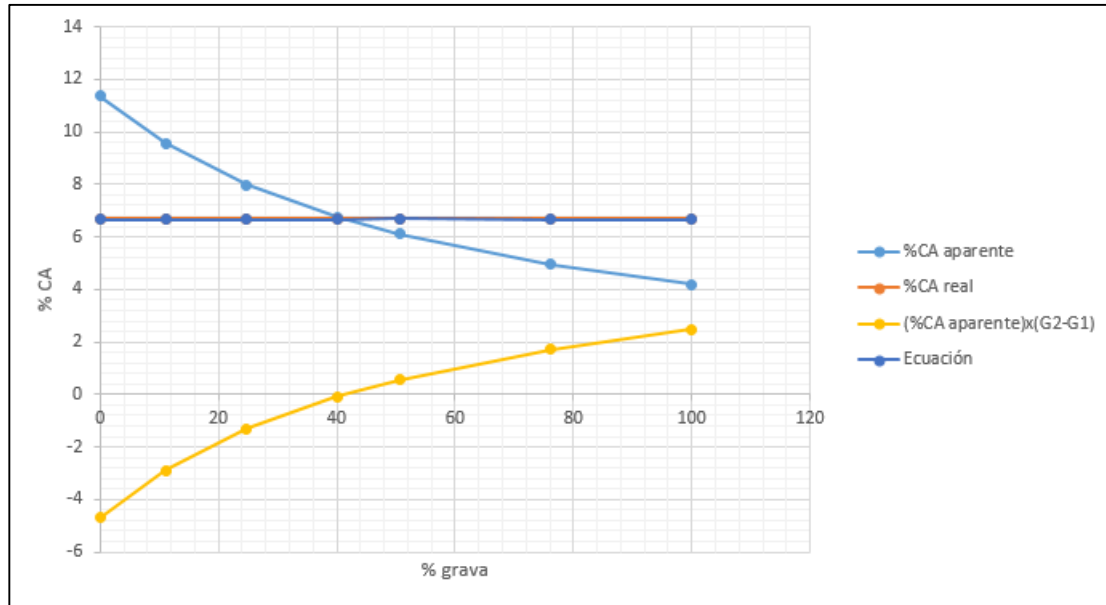
Se observó que este último valor ( $\%CA_{aparente}(G2-G1)$ ), es muy semejante al  $\%CA$  aparente pero invertido a lo largo del eje horizontal, por lo que es muy adecuado. De esta manera la ecuación quedó de la siguiente forma:

$$\%CA_{real} = \%CA_{aparente} + \%CA_{aparente}(G2-G1) \quad (8)$$

$$\%CA_{real} = \%CA_{aparente}(1+G2-G1) \quad (9)$$

Habiendo realizado las operaciones de esta última ecuación se obtuvo el gráfico de la siguiente figura.

Figura 25 %CA aparente, %CA real, (%CA aparente)x(G2-G1) y el resultado de la ecuación vs % de grava



Fuente: elaboración propia

Se observó que los valores del porcentaje de cemento asfáltico real y los obtenidos por la ecuación fueron muy parecidos. Por lo tanto la ecuación quedó de la manera planteada anteriormente.

$$\%CA_{real} = \%CA_{aparente} (1 + G2 - G1) \quad (10)$$

### 4.3 DETERMINACIÓN DE LA ECUACIÓN

Para un mejor entendimiento se volvió a expresar la ecuación del cálculo del porcentaje asfáltico realizado en el ensayo de lavado asfáltico, con expresiones más familiares a las que se utilizaron en el desarrollo de la presente investigación.

1. Antes de proceder al lavado se realizó el pesado de la muestra utilizada en el ensayo de lavado asfáltico, a este peso se designó como peso de la muestra antes del lavado y se denotó como *PAL*.
2. También fue necesario calcular el peso del filtro antes del lavado. A este peso se denotó como *FAL*.
3. Luego del lavado se procedió a pesar la muestra, a este peso se designó como peso de la muestra después del lavado y se denotó como *PDL*.

4. Seguidamente se procedió a pesar el filtro, a lo que se designó como peso del filtro después del lavado y se denotó como  $FDL$ .
5. Se procedió al cálculo del agregado fino atrapado en el filtro. Por medio del esquema de la figura 32 se estableció que el peso del agregado atrapado es la diferencia entre el peso del filtro después del lavado menos el peso del filtro antes del lavado:

$$AA = FDL - FAL \quad ( 11 )$$

Figura 26 Esquema del peso del filtro

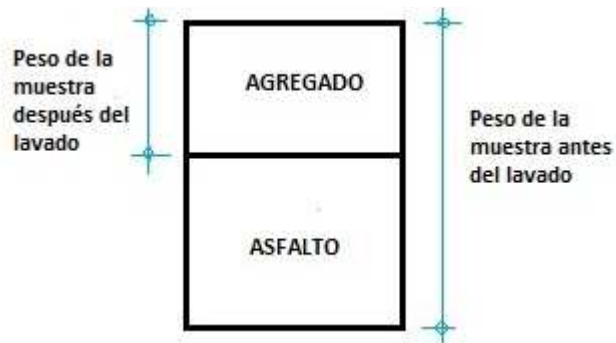


Fuente: elaboración propia

6. Luego se procedió a calcular la masa del agregado. Después del lavado, la muestra queda libre de asfalto, es decir sólo quedan agregados, entonces con el esquema de figura 33 se estableció que la masa del agregado es el peso de la muestra después del lavado.

$$A = PDL \quad ( 12 )$$

Figura 27 Esquema del peso de la muestra



Fuente: elaboración propia

7. Se realizó el cálculo de la masa total del agregado, el cual fue a ser el agregado calculado en el paso 6 más el agregado calculado en el paso 5, es decir:

$$Agregado = A + AA \quad (13)$$

8. La masa del asfalto fue la diferencia entre la masa de la muestra inicial y la masa de agregados total, es decir:

$$Asfalto = PAL - Agregado \quad (14)$$

9. El porcentaje de cemento asfáltico fue calculado en relación a la masa de la muestra utilizada en el inicio de este ensayo (Muestra antes de realizar el lavado).

$$\% CA = \frac{Asfalto}{PAL} 100\% \quad (15)$$

Finalmente en base a estas expresiones, se determinó la expresión de la ecuación encontrada anteriormente.

$$\% CA_{real} = \% CA_{aparente} (1 + G2 - G1) \quad (16)$$

Primero se expresó el porcentaje de cemento asfáltico aparente ( $\% CA_{aparente}$ ), en función a las expresiones utilizadas en el ensayo de lavado asfáltico.

$$\% CA = \frac{Asfalto}{PAL} 100\% \quad (17)$$

$$\% CA_{aparente} = \frac{Asfalto}{PAL} 100\% \quad (18)$$

$$\% CA_{aparente} = \frac{PAL - Agregado}{PAL} 100\% \quad (19)$$

$$\% CA_{aparente} = \frac{PAL - (A + AA)}{PAL} 100\% \quad (20)$$

$$\% CA_{aparente} = \frac{PAL - (PDL + FDL - FAL)}{PAL} 100\% \quad (21)$$

Reemplazando la ecuación (21) esto en la ecuación de corrección (10), se obtuvo:

$$\% CA_{real} = \% CA_{aparente} (1 + G2 - G1) \quad (22)$$

$$\% CA_{real} = \frac{PAL - (PDL + FDL - FAL)}{PAL} 100\% (1 + G2 - G1) \quad (23)$$

Donde  $G_1$  y  $G_2$  son las relaciones de grava sobre la masa en la faja transportadora y en el ensayo de lavado asfáltico respectivamente.

$$G_1 = \frac{AG_1}{M_1}, G_2 = \frac{AG_2}{M_2} \quad (24)$$

Además  $AG_1$  es la masa de grava en la muestra de la faja transportadora,  $M_1$  es la masa total de la muestra en la faja transportadora,  $AG_2$  es la masa de grava en la muestra de la toma del carguío (utilizado para el ensayo asfáltico),  $M_2$  es la masa total de la muestra de la toma del carguío.

Quedó, entonces:

$$\%CA_{real} = \frac{PAL - (PDL + FDL - FAL)}{PAL} 100\% \left( 1 + \frac{AG_2}{M_2} - \frac{AG_1}{M_1} \right) \quad (25)$$

$$\%CA_{real} = \frac{PAL - (PDL + FDL - FAL)}{PAL} \left( 100\% + \frac{AG_2}{M_2} 100\% - \frac{AG_1}{M_1} 100\% \right) \quad (26)$$

Las expresiones  $\frac{AG_1}{M_1} 100\%$  y  $\frac{AG_2}{M_2} 100\%$  expresan las relaciones de grava sobre masa en porcentajes; estos se denotaron como  $\%AG_1$  y  $\%AG_2$ , habiendo quedado la siguiente expresión.

$$\%CA_{real} = \frac{PAL - (PDL + FDL - FAL)}{PAL} (100\% + \%AG_2 - \%AG_1) \quad (27)$$

$$\%CA_{real} = \frac{PAL - (PDL + FDL - FAL)}{PAL} (100\% - (\%AG_1 - \%AG_2)) \quad (28)$$

Quedó finalmente determinada la ecuación de corrección del porcentaje de cemento asfáltico.

$$\%CA_{real} = \frac{(PAL - (PDL + (FDL - FAL)))(100\% - (\%AG_1 - \%AG_2))}{PAL} \quad (29)$$

Donde:

1.  $\%CA_{real}$  : porcentaje de cemento asfáltico real.
2.  $PAL$  : peso de la muestra antes del lavado asfáltico.

3.  $PDL$  : peso de la muestra después del lavado asfáltico.
4.  $FDL$  : peso del filtro después del lavado asfáltico.
5.  $FAL$  : peso del filtro antes del lavado asfáltico.
6.  $\%AG_1$  : porcentaje de agregado grueso en la muestra de la faja.
7.  $\%AG_2$  : porcentaje de agregado grueso en la muestra de la toma del carguío de volquete (utilizado en el ensayo de lavado asfáltico).

#### **4.4 CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS**

Para contrastar la hipótesis principal, se procedió a realizar 40 ensayos de lavado asfáltico; de los cuales 28 ensayos se realizaron para un porcentaje de cemento asfáltico de 6.8% según el diseño y otros 12 ensayos se realizaron para un porcentaje de cemento asfáltico de 6.5% según diseño.

Cabe indicar que la contratación de hipótesis se realizó separadamente para cada cantera, habiendo tenido de esta manera dos contrastaciones de hipótesis con la misma conclusión. Las tablas de los cálculos correspondientes a estas pruebas se encuentran en los anexos.

##### **4.4.1 Cantera CY-1**

A los resultados de los 28 ensayos con la cantera CY-1 se les aplicó la ecuación de corrección y se encontró el porcentaje de cemento asfáltico real, estos resultados se muestran en la tabla 6.

En la tabla 6 se observó que el máximo valor del porcentaje de cemento asfáltico es 7.19%, el cual es mayor al porcentaje de diseño en 0.39%, por lo que no sería aceptada según las especificaciones (máxima tolerancia de  $\pm 0.3\%$ ); también se pudo ver que el mínimo valor del porcentaje de cemento asfáltico es 6.51%, el cual es menor al porcentaje de diseño en 0.29%, por lo que sí sería aceptada según las especificaciones; una vez aplicada la ecuación para calcular el porcentaje de cemento asfáltico real se observaron valores casi constantes y cercanos al porcentaje de diseño, siendo el promedio del porcentaje de cemento asfáltico real igual a 6.69%.



*Tabla 12 Resultados del porcentaje de cemento asfáltico real de la cantera CY-1 (grupo 2)*

Nº	%CA aparente	%CA real	Porcentaje de grava	
			Faja	Lavado
8	6.65	6.68	41.64	42.14
9	6.92	6.70	41.64	38.58
10	6.82	6.71	41.64	40.00
11	6.77	6.69	41.64	40.59
12	6.76	6.69	39.24	38.10
13	6.99	6.68	39.24	34.82
14	6.59	6.66	39.24	40.25
15	6.75	6.68	39.24	38.20
16	6.58	6.72	40.79	42.85
17	7.02	6.69	40.79	36.09
18	6.62	6.71	40.79	42.19
19	7.19	6.68	40.79	33.72
20	6.74	6.68	40.69	39.87
21	6.90	6.71	40.69	38.04
22	6.83	6.71	40.69	38.92
23	6.58	6.69	40.69	42.34
24	6.57	6.67	41.73	43.36
25	6.83	6.68	41.73	39.64
26	6.82	6.68	41.73	39.71
27	6.87	6.70	41.73	39.14
28	6.87	6.67	41.95	39.06
29	6.83	6.68	41.95	39.73
30	7.13	6.68	41.95	35.75
31	6.74	6.69	41.95	41.16
32	6.51	6.68	41.69	44.28
33	6.62	6.67	41.69	42.40
34	6.98	6.68	41.69	37.42
35	6.87	6.69	41.69	39.04

*Fuente: elaboración propia*

A estos datos se les aplicó la prueba T de Wilcoxon, teniendo en cuenta las siguientes hipótesis:

H0: La ecuación no corrige los valores de porcentaje de cemento asfáltico.

H1: La ecuación sí corrige los valores de porcentaje de cemento asfáltico.

Se obtuvo un valor de T de Wilcoxon de 73, y para la muestra de 28 ensayos con 0.05 de significancia se obtuvo un valor crítico de T de 116, por lo que se rechazó la hipótesis nula H0 y se aceptó la hipótesis alternativa H1.

#### **4.4.2 Cantera Km 47+500**

A los resultados de los 12 ensayos con la cantera Km. 47+500 se les aplicó la ecuación y se encontró el porcentaje de cemento asfáltico real, estos resultados se muestran en la tabla 7.

En la tabla 7 se observó que el máximo valor del porcentaje de cemento asfáltico es 6.82%, el cual es mayor al porcentaje de diseño en 0.32%, por lo que no sería aceptada según las especificaciones (máxima tolerancia de  $\pm 0.3\%$ ); también se pudo ver que el mínimo valor del porcentaje de cemento asfáltico es 6.36%, el cual es menor al porcentaje de diseño en 0.14%, por lo que sí sería aceptada según las especificaciones; una vez aplicada la ecuación para calcular el porcentaje de cemento asfáltico real se observaron valores casi constantes y cercanos al porcentaje de diseño, siendo el promedio del porcentaje de cemento asfáltico real igual a 6.51%.

A estos datos se les aplicó la prueba T de Wilcoxon, teniendo en cuenta las siguientes hipótesis:

H0: La ecuación no corrige los valores de porcentaje de cemento asfáltico.

H1: La ecuación sí corrige los valores de porcentaje de cemento asfáltico.

Se obtuvo un valor de T de Wilcoxon de 12.5, y para la muestra de 12 ensayos con 0.05 de significancia se obtuvo un valor crítico de T de 13, por lo que se rechazó la hipótesis nula H0 y se aceptó la hipótesis alternativa H1.

*Tabla 13 Resultados del porcentaje de cemento asfáltico real de la cantera Km. 47+500 (grupo 3)*

Nº	%CA aparente	%CA real	Porcentaje de grava	
			Faja	Lavado
36	6.62	6.54	41.84	40.59
37	6.72	6.49	41.84	38.39
38	6.62	6.53	41.84	40.49
39	6.41	6.51	41.84	43.42
40	6.67	6.54	39.89	37.92
41	6.71	6.48	39.89	36.38
42	6.82	6.53	39.89	35.74
43	6.62	6.51	39.89	38.23
44	6.46	6.52	41.62	42.56
45	6.51	6.49	41.62	41.31
46	6.65	6.52	41.62	39.71
47	6.42	6.51	41.62	43.12

*Fuente: elaboración propia*

## CONCLUSIONES

---

1. Existe variación del porcentaje de cemento asfáltico a partir de la variación del porcentaje de agregados en la toma del carguío del volquete y en la faja transportadora; pues para los 7 primeros ensayos de la cantera CY-1 se tuvo un porcentaje de cemento asfáltico que iba desde 4.20% a 11.35%.
2. Cuando la muestra del carguío del volquete posee mayor cantidad de agregados finos, aparentemente esta tendrá mayor cantidad de cemento asfáltico; mientras que cuando posea mayor cantidad de agregados grueso, aparentemente esta tendrá menor cantidad de cemento asfáltico.
3. Una vez aplicada la ecuación para calcular el porcentaje de cemento asfáltico real a los ensayos de ambas canteras, se observó que en la planta de la cantera CY-1 el promedio del porcentaje de cemento asfáltico real fue 6.69% y el de diseño 6.70%, y en la planta de la cantera Km. 47+500 el promedio del porcentaje de cemento asfáltico real fue 6.51% y el de diseño 6.50%.
4. La ecuación de corrección del porcentaje de cemento asfáltico a partir de la variación del porcentaje de agregados en la toma del carguío del volquete y en la faja transportadora, aplicada la prueba T de Wilcoxon, corrige el porcentaje de cemento asfáltico aparente para el diseño de la cantera CY-1 y Km. 47+500, con un error de significación de 0.05, por lo que se valida la hipótesis alterna y se rechaza la hipótesis nula.

## **FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN**

---

1. La ecuación determinada en este trabajo puede ser aplicado siempre y cuando el método de extracción de asfalto usado sea el ensayo de extracción por centrífuga. Puede ser interesante compararlo con métodos de corrección para otros métodos de extracción de asfalto.
2. Resultaría importante realizar una evaluación de tiempo y costo en la aplicación de esta ecuación en plena operación en la planta de asfalto.
3. Partiendo de la base de esta investigación, realizada para una planta de producción discontinua, puede ser útil acomodar la ecuación para ser aplicada en una planta de producción continua.

## RECOMENDACIONES

---

A las empresas constructoras y supervisoras.

1. Es de vital importancia conocer las cantidades de grava y finos en la mezcla asfáltica, no solo para sus propiedades físico mecánicas, sino también para utilizar adecuadamente el porcentaje de cemento asfáltico en la mezcla.
2. Es necesario implementar esta ecuación como cálculo final en el ensayo de lavado asfáltico, debido a que en ocasiones la supervisión no acepta el tendido del asfalto por que el %CA no está cercano al diseño, cuando posiblemente sí lo esté.
3. Es importante mencionar que esta ecuación debe ser aplicada a todo ensayo de lavado asfáltico, no solo en el caso que el porcentaje de cemento asfáltico no cumpla con las especificaciones; debido a que podría ocurrir que el %CA aparente sea adecuado, pero el %CA real no sea correcto.

## REFERENCIAS

---

- [1] AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. (2014). *Standard method of test for quantitative extraction of asphalt binder from hot mix asphalt*.
- [2] AMERICAN SOCIETY OF TESTING OF MATERIALS. (2017). *Standard test methods for quantitative extraction of asphalt binder from asphalt mixtures*. West Conshohocken.
- [3] AMERICAN SOCIETY OF TESTING OF MATERIALS. (1998). *Test method for resistance of plastic flow of bituminous mixtures using Marshall apparatus*. West Conshohocken.
- [4] ASPHALT INSTITUTE. (1992). *Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente*. Lexington.
- [5] BOBADILLA, P. (2000). *Operación de planta de concreto asfáltico de operación continua* (Tesis). Universidad de Sonora. Sonora.
- [6] CÁCERES, C. (2007). *Análisis de la metodología superpave para el diseño de mezclas asfálticas en México*. Cholula: Universidad de las Américas de Puebla.
- [7] CARRASCO, D. (2004). *Estudio comparativo entre mezclas asfálticas en caliente y mezclas asfálticas con emulsiones tibias*. Piura: Universidad de Piura.
- [8] CASTRO, P. (2002). *Evaluación estadística de métodos para determinar el contenido de asfalto y la granulometría de mezclas asfálticas*. San José: Universidad Nacional de Costa Rica, Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales.
- [9] CIVILGEEKS. (2016). Material asfáltico. Obtenido de: <https://civilgeeks.com/2015/06/16/material-asfaltico/>
- [10] CORTEZ, J., GUZMÁN, H., & REYES, A. (2007). *Guía básica de diseño, control de producción y colocación de mezclas asfálticas en caliente* (Tesis). Universidad de El Salvador. El Salvador.
- [11] DISCOVERY CHANEL. (s.f.). Elaboración de mezcla asfáltica [Archivo de video]. Obtenido de: <https://www.youtube.com/watch?v=TPcJPb6TCwA>
- [12] GARNICA, P. & otros. (2004). *Aspectos del diseño volumétrico de mezclas asfálticas*. Sanfandila: Instituto mexicano del transporte.

- [13] MINISTERIO DE TRANSPORTES Y COMUNICACIONES. (2000). *Extracción cuantitativa del asfalto en mezclas para pavimentos*. Lima.
- [14] ORTIZ, D., & DÍAZ, J. (2010). *Física I*. Santander: Universidad de Cantabria.
- [15] URIBE, R. (2016). *Horno de ignición y centrífuga*. Santiago de Chile: Laboratorio Nacional de Vialidad.
- [16] ULLOA, A. (2011). *Guía de pruebas de laboratorio y muestreo en campo para la verificación de calidad en materiales de un pavimento asfáltico*. San José: Universidad de Costa Rica.
- [17] USPENSKY, J. (1995). *Teoría de ecuaciones*. Balderas: Limusa.



## **ANEXOS**

---

## ANEXO 1

### MATRIZ DE CONSISTENCIA

#### ECUACIÓN DE CORRECCIÓN DEL PORCENTAJE DE CEMENTO ASFÁLTICO A PARTIR DE LA VARIACIÓN DEL PORCENTAJE DE AGREGADOS

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIBLES	DISEÑO METODOLÓGICO
<p><b>Principal</b> ¿Será posible determinar una ecuación que permita corregir el porcentaje de cemento asfáltico a partir de la variación del porcentaje de agregados en la toma del carguío del volquete y en la faja transportadora?</p> <p><b>Secundarios</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ¿Cuál es la variación del porcentaje de cemento asfáltico a partir de la variación del porcentaje de agregados en la toma del carguío del volquete y en la faja transportadora?</li> <li>• ¿Cómo establecer una ecuación que corrija el porcentaje de cemento asfáltico, a partir de la variación del porcentaje de agregados en la toma del carguío del volquete y en la faja transportadora?</li> <li>• ¿En qué medida será posible validar la ecuación de corrección del porcentaje de cemento asfáltico?</li> </ul>	<p><b>General</b> Determinar una ecuación de corrección del porcentaje de cemento asfáltico a partir de la variación del porcentaje de agregados en la toma del carguío del volquete y en la faja transportadora.</p> <p><b>Específicos</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Identificar la variación del porcentaje de cemento asfáltico a partir de la variación del porcentaje de agregados en la toma del carguío del volquete y en la faja transportadora.</li> <li>• Establecer la ecuación de corrección del porcentaje de cemento asfáltico real a partir de la variación del porcentaje de agregados en la toma del carguío del volquete y en la faja transportadora.</li> <li>• Validar la ecuación de corrección del porcentaje de cemento asfáltico.</li> </ul>	<p><b>Principal</b> La determinación de una ecuación corrige el porcentaje de cemento asfáltico a partir de la variación del porcentaje de agregados en la toma del carguío del volquete y en la faja transportadora.</p> <p><b>Secundarios</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Existe variación del porcentaje de cemento asfáltico a partir de la variación del porcentaje de agregados en la toma del carguío del volquete y en la faja transportadora.</li> <li>• Es factible establecer una ecuación de corrección del porcentaje de cemento asfáltico a partir de la variación del porcentaje de agregados en la toma del carguío del volquete y en la faja transportadora.</li> <li>• Es factible la validación de la ecuación de corrección del porcentaje de cemento asfáltico.</li> </ul>	<p><b>Variable independiente</b> Variación del porcentaje de agregados en la toma del carguío del volquete y en la faja transportadora</p> <p><b>Variable dependiente</b> Porcentaje de cemento asfáltico.</p>	<p><b>Tipo de investigación</b> Aplicada</p> <p><b>Enfoque de investigación</b> Cuantitativo</p> <p><b>Nivel de investigación</b> Relacional</p> <p><b>Diseño de investigación</b> Longitudinal</p> <p><b>Muestra</b> Ensayos en la planta de asfalto en plena producción.</p> <p><b>Método e instrumentos de recolección de datos</b> Se toman los datos del lavado asfáltico rutinario, en un promedio de cuatro lavados asfálticos diarios.</p> <p><b>Materiales</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Se utilizarán agregados, tanto finos como gruesos (gravas), acopiados en las canchas de almacenamiento, previamente seleccionados para poder ser usados en el mezclado de la producción del asfalto.</li> <li>• Se utilizará cemento asfáltico de PEN 120-150, para la producción de la mezcla asfáltica.</li> <li>• Para el ensayo de lavado asfáltico se utilizó papel filtro y tricoloroetileno como solvente.</li> </ul>

## ANEXO 2

### ENSAYOS DEL GRUPO 1 (7 ENSAYOS DE LA CANTERA CY-1)

Ensayo N° 1	Medida	Unidad
Peso del material antes del lavado (PAL)	1052	g
Peso del material después del lavado (PDL)	1007.8	g
Peso del filtro antes del lavado (FAL)	9.8	g
Peso del filtro después del lavado (PDL)	9.8	g
Peso de los agregados (A + AA)	1007.8	g
Peso de agregados gruesos	1007.8	g
Peso del asfalto	44.2	g
% CA (aparente)	4.20	%

Ensayo N° 2	Medida	Unidad
Peso del material antes del lavado (PAL)	1136.2	g
Peso del material después del lavado (PDL)	1079.8	g
Peso del filtro antes del lavado (FAL)	10.1	g
Peso del filtro después del lavado (PDL)	10.3	g
Peso de los agregados (A + AA)	1080	g
Peso de agregados gruesos	822.6	g
Peso del asfalto	56.2	g
% CA (aparente)	4.95	%

Ensayo N° 3	Medida	Unidad
Peso del material antes del lavado (PAL)	1000	g
Peso del material después del lavado (PDL)	938.1	g
Peso del filtro antes del lavado (FAL)	10	g
Peso del filtro después del lavado (PDL)	10.8	g
Peso de los agregados (A + AA)	938.9	g
Peso de agregados gruesos	475.1	g
Peso del asfalto	61.1	g
% CA (aparente)	6.11	%

<b>Ensayo N° 4</b>	<b>Medida</b>	<b>Unidad</b>
<b>Peso del material antes del lavado (PAL)</b>	1116.2	g
<b>Peso del material después del lavado (PDL)</b>	1039.9	g
<b>Peso del filtro antes del lavado (FAL)</b>	10.5	g
<b>Peso del filtro después del lavado (PDL)</b>	11.5	g
<b>Peso de los agregados (A + AA)</b>	1040.9	g
<b>Peso de agregados gruesos</b>	416.5	g
<b>Peso del asfalto</b>	75.3	g
<b>% CA (aparente)</b>	6.75	%

<b>Ensayo N° 5</b>	<b>Medida</b>	<b>Unidad</b>
<b>Peso del material antes del lavado (PAL)</b>	879.9	g
<b>Peso del material después del lavado (PDL)</b>	808.4	g
<b>Peso del filtro antes del lavado (FAL)</b>	10	g
<b>Peso del filtro después del lavado (PDL)</b>	11.2	g
<b>Peso de los agregados (A + AA)</b>	809.6	g
<b>Peso de agregados gruesos</b>	200.9	g
<b>Peso del asfalto</b>	70.3	g
<b>% CA (aparente)</b>	7.99	%

<b>Ensayo N° 6</b>	<b>Medida</b>	<b>Unidad</b>
<b>Peso del material antes del lavado (PAL)</b>	1000	g
<b>Peso del material después del lavado (PDL)</b>	903.5	g
<b>Peso del filtro antes del lavado (FAL)</b>	10	g
<b>Peso del filtro después del lavado (PDL)</b>	10.8	g
<b>Peso de los agregados (A + AA)</b>	904.3	g
<b>Peso de agregados gruesos</b>	100	g
<b>Peso del asfalto</b>	95.7	g
<b>% CA (aparente)</b>	9.57	%

<b>Ensayo N° 7</b>	<b>Medida</b>	<b>Unidad</b>
<b>Peso del material antes del lavado (PAL)</b>	831.4	g
<b>Peso del material después del lavado (PDL)</b>	734.8	g
<b>Peso del filtro antes del lavado (FAL)</b>	10.3	g
<b>Peso del filtro después del lavado (PDL)</b>	12.5	g
<b>Peso de los agregados (A + AA)</b>	737	g
<b>Peso de agregados gruesos</b>	0	g
<b>Peso del asfalto</b>	94.4	g
<b>% CA (aparente)</b>	11.35	%

### ANEXO 3

#### ENSAYOS DEL GRUPO 2 (28 ENSAYOS DE LA CANTERA CY-1)

Ensayo N° 8	Medida	Unidad
Peso del material antes del lavado (PAL)	1248.4	g
Peso del material después del lavado (PDL)	1164.2	g
Peso del filtro antes del lavado (FAL)	9.6	g
Peso del filtro después del lavado (PDL)	10.8	g
Peso de los agregados (A + AA)	1165.4	g
Peso de agregados gruesos	491.1	g
Peso del asfalto	83	g
% CA (aparente)	6.65	%

Ensayo N° 9	Medida	Unidad
Peso del material antes del lavado (PAL)	1045.5	g
Peso del material después del lavado (PDL)	972.1	g
Peso del filtro antes del lavado (FAL)	10.2	g
Peso del filtro después del lavado (PDL)	11.3	g
Peso de los agregados (A + AA)	973.2	g
Peso de agregados gruesos	375.5	g
Peso del asfalto	72.3	g
% CA (aparente)	6.92	%

Ensayo N° 10	Medida	Unidad
Peso del material antes del lavado (PAL)	1124.2	g
Peso del material después del lavado (PDL)	1046.8	g
Peso del filtro antes del lavado (FAL)	10.3	g
Peso del filtro después del lavado (PDL)	11	g
Peso de los agregados (A + AA)	1047.5	g
Peso de agregados gruesos	419	g
Peso del asfalto	76.7	g
% CA (aparente)	6.82	%

<b>Ensayo N° 11</b>	<b>Medida</b>	<b>Unidad</b>
Peso del material antes del lavado (PAL)	1110	g
Peso del material después del lavado (PDL)	1033.9	g
Peso del filtro antes del lavado (FAL)	9.9	g
Peso del filtro después del lavado (PDL)	10.9	g
Peso de los agregados (A + AA)	1034.9	g
Peso de agregados gruesos	420.1	g
Peso del asfalto	75.1	g
% CA (aparente)	6.77	%

<b>Ensayo N° 12</b>	<b>Medida</b>	<b>Unidad</b>
Peso del material antes del lavado (PAL)	1133.9	g
Peso del material después del lavado (PDL)	1055.5	g
Peso del filtro antes del lavado (FAL)	9.4	g
Peso del filtro después del lavado (PDL)	11.1	g
Peso de los agregados (A + AA)	1057.2	g
Peso de agregados gruesos	402.8	g
Peso del asfalto	76.7	g
% CA (aparente)	6.76	%

<b>Ensayo N° 13</b>	<b>Medida</b>	<b>Unidad</b>
Peso del material antes del lavado (PAL)	1165.6	g
Peso del material después del lavado (PDL)	1082.1	g
Peso del filtro antes del lavado (FAL)	9.1	g
Peso del filtro después del lavado (PDL)	11.1	g
Peso de los agregados (A + AA)	1084.1	g
Peso de agregados gruesos	377.5	g
Peso del asfalto	81.5	g
% CA (aparente)	6.99	%

<b>Ensayo N° 14</b>	<b>Medida</b>	<b>Unidad</b>
Peso del material antes del lavado (PAL)	1230.1	g
Peso del material después del lavado (PDL)	1147.9	g
Peso del filtro antes del lavado (FAL)	9.9	g
Peso del filtro después del lavado (PDL)	11	g
Peso de los agregados (A + AA)	1149	g
Peso de agregados gruesos	462.5	g
Peso del asfalto	81.1	g
% CA (aparente)	6.59	%

<b>Ensayo N° 15</b>	<b>Medida</b>	<b>Unidad</b>
Peso del material antes del lavado (PAL)	1082.6	g
Peso del material después del lavado (PDL)	1007.9	g
Peso del filtro antes del lavado (FAL)	9.2	g
Peso del filtro después del lavado (PDL)	10.8	g
Peso de los agregados (A + AA)	1009.5	g
Peso de agregados gruesos	385.6	g
Peso del asfalto	73.1	g
% CA (aparente)	6.75	%

<b>Ensayo N° 16</b>	<b>Medida</b>	<b>Unidad</b>
Peso del material antes del lavado (PAL)	985.8	g
Peso del material después del lavado (PDL)	919.3	g
Peso del filtro antes del lavado (FAL)	10.1	g
Peso del filtro después del lavado (PDL)	11.7	g
Peso de los agregados (A + AA)	920.9	g
Peso de agregados gruesos	394.6	g
Peso del asfalto	64.9	g
% CA (aparente)	6.58	%

<b>Ensayo N° 17</b>	<b>Medida</b>	<b>Unidad</b>
Peso del material antes del lavado (PAL)	1061.4	g
Peso del material después del lavado (PDL)	985.6	g
Peso del filtro antes del lavado (FAL)	9.6	g
Peso del filtro después del lavado (PDL)	10.9	g
Peso de los agregados (A + AA)	986.9	g
Peso de agregados gruesos	356.2	g
Peso del asfalto	74.5	g
% CA (aparente)	7.02	%

<b>Ensayo N° 18</b>	<b>Medida</b>	<b>Unidad</b>
Peso del material antes del lavado (PAL)	972.5	g
Peso del material después del lavado (PDL)	907	g
Peso del filtro antes del lavado (FAL)	10.1	g
Peso del filtro después del lavado (PDL)	11.2	g
Peso de los agregados (A + AA)	908.1	g
Peso de agregados gruesos	383.1	g
Peso del asfalto	64.4	g
% CA (aparente)	6.62	%

<b>Ensayo N° 19</b>	<b>Medida</b>	<b>Unidad</b>
Peso del material antes del lavado (PAL)	1241.2	g
Peso del material después del lavado (PDL)	1150.9	g
Peso del filtro antes del lavado (FAL)	9.2	g
Peso del filtro después del lavado (PDL)	10.3	g
Peso de los agregados (A + AA)	1152	g
Peso de agregados gruesos	388.4	g
Peso del asfalto	89.2	g
% CA (aparente)	7.19	%

<b>Ensayo N° 20</b>	<b>Medida</b>	<b>Unidad</b>
Peso del material antes del lavado (PAL)	1046.7	g
Peso del material después del lavado (PDL)	975.1	g
Peso del filtro antes del lavado (FAL)	10	g
Peso del filtro después del lavado (PDL)	11.1	g
Peso de los agregados (A + AA)	976.2	g
Peso de agregados gruesos	389.2	g
Peso del asfalto	70.5	g
% CA (aparente)	6.74	%

<b>Ensayo N° 21</b>	<b>Medida</b>	<b>Unidad</b>
Peso del material antes del lavado (PAL)	1085.8	g
Peso del material después del lavado (PDL)	1010.1	g
Peso del filtro antes del lavado (FAL)	9.8	g
Peso del filtro después del lavado (PDL)	10.6	g
Peso de los agregados (A + AA)	1010.9	g
Peso de agregados gruesos	384.5	g
Peso del asfalto	74.9	g
% CA (aparente)	6.90	%

<b>Ensayo N° 22</b>	<b>Medida</b>	<b>Unidad</b>
Peso del material antes del lavado (PAL)	1245.1	g
Peso del material después del lavado (PDL)	1159.1	g
Peso del filtro antes del lavado (FAL)	10.5	g
Peso del filtro después del lavado (PDL)	11.5	g
Peso de los agregados (A + AA)	1160.1	g
Peso de agregados gruesos	451.5	g
Peso del asfalto	85	g
% CA (aparente)	6.83	%



<b>Ensayo N° 23</b>	<b>Medida</b>	<b>Unidad</b>
<b>Peso del material antes del lavado (PAL)</b>	1248.8	g
<b>Peso del material después del lavado (PDL)</b>	1165.7	g
<b>Peso del filtro antes del lavado (FAL)</b>	9.8	g
<b>Peso del filtro después del lavado (PDL)</b>	10.7	g
<b>Peso de los agregados (A + AA)</b>	1166.6	g
<b>Peso de agregados gruesos</b>	493.9	g
<b>Peso del asfalto</b>	82.2	g
<b>% CA (aparente)</b>	6.58	%

<b>Ensayo N° 24</b>	<b>Medida</b>	<b>Unidad</b>
<b>Peso del material antes del lavado (PAL)</b>	1000.6	g
<b>Peso del material después del lavado (PDL)</b>	933.5	g
<b>Peso del filtro antes del lavado (FAL)</b>	10.5	g
<b>Peso del filtro después del lavado (PDL)</b>	11.9	g
<b>Peso de los agregados (A + AA)</b>	934.9	g
<b>Peso de agregados gruesos</b>	405.4	g
<b>Peso del asfalto</b>	65.7	g
<b>% CA (aparente)</b>	6.57	%

<b>Ensayo N° 25</b>	<b>Medida</b>	<b>Unidad</b>
<b>Peso del material antes del lavado (PAL)</b>	1172.1	g
<b>Peso del material después del lavado (PDL)</b>	1091.6	g
<b>Peso del filtro antes del lavado (FAL)</b>	10	g
<b>Peso del filtro después del lavado (PDL)</b>	10.5	g
<b>Peso de los agregados (A + AA)</b>	1092.1	g
<b>Peso de agregados gruesos</b>	432.9	g
<b>Peso del asfalto</b>	80	g
<b>% CA (aparente)</b>	6.83	%

<b>Ensayo N° 26</b>	<b>Medida</b>	<b>Unidad</b>
<b>Peso del material antes del lavado (PAL)</b>	1015.4	g
<b>Peso del material después del lavado (PDL)</b>	945.3	g
<b>Peso del filtro antes del lavado (FAL)</b>	9.8	g
<b>Peso del filtro después del lavado (PDL)</b>	10.7	g
<b>Peso de los agregados (A + AA)</b>	946.2	g
<b>Peso de agregados gruesos</b>	375.7	g
<b>Peso del asfalto</b>	69.2	g
<b>% CA (aparente)</b>	6.82	%

<b>Ensayo N° 27</b>	<b>Medida</b>	<b>Unidad</b>
<b>Peso del material antes del lavado (PAL)</b>	1140.5	g
<b>Peso del material después del lavado (PDL)</b>	1060.1	g
<b>Peso del filtro antes del lavado (FAL)</b>	9.8	g
<b>Peso del filtro después del lavado (PDL)</b>	11.8	g
<b>Peso de los agregados (A + AA)</b>	1062.1	g
<b>Peso de agregados gruesos</b>	415.7	g
<b>Peso del asfalto</b>	78.4	g
<b>% CA (aparente)</b>	6.87	%

<b>Ensayo N° 28</b>	<b>Medida</b>	<b>Unidad</b>
<b>Peso del material antes del lavado (PAL)</b>	976.8	g
<b>Peso del material después del lavado (PDL)</b>	908.5	g
<b>Peso del filtro antes del lavado (FAL)</b>	9.8	g
<b>Peso del filtro después del lavado (PDL)</b>	11	g
<b>Peso de los agregados (A + AA)</b>	909.7	g
<b>Peso de agregados gruesos</b>	355.3	g
<b>Peso del asfalto</b>	67.1	g
<b>% CA (aparente)</b>	6.87	%

<b>Ensayo N° 29</b>	<b>Medida</b>	<b>Unidad</b>
<b>Peso del material antes del lavado (PAL)</b>	986.5	g
<b>Peso del material después del lavado (PDL)</b>	918.5	g
<b>Peso del filtro antes del lavado (FAL)</b>	9.6	g
<b>Peso del filtro después del lavado (PDL)</b>	10.2	g
<b>Peso de los agregados (A + AA)</b>	919.1	g
<b>Peso de agregados gruesos</b>	365.2	g
<b>Peso del asfalto</b>	67.4	g
<b>% CA (aparente)</b>	6.83	%

<b>Ensayo N° 30</b>	<b>Medida</b>	<b>Unidad</b>
<b>Peso del material antes del lavado (PAL)</b>	952.9	g
<b>Peso del material después del lavado (PDL)</b>	884.5	g
<b>Peso del filtro antes del lavado (FAL)</b>	10.4	g
<b>Peso del filtro después del lavado (PDL)</b>	10.9	g
<b>Peso de los agregados (A + AA)</b>	885	g
<b>Peso de agregados gruesos</b>	316.4	g
<b>Peso del asfalto</b>	67.9	g
<b>% CA (aparente)</b>	7.13	%

<b>Ensayo N° 31</b>	<b>Medida</b>	<b>Unidad</b>
<b>Peso del material antes del lavado (PAL)</b>	1030.8	g
<b>Peso del material después del lavado (PDL)</b>	960.4	g
<b>Peso del filtro antes del lavado (FAL)</b>	9.8	g
<b>Peso del filtro después del lavado (PDL)</b>	10.7	g
<b>Peso de los agregados (A + AA)</b>	961.3	g
<b>Peso de agregados gruesos</b>	395.7	g
<b>Peso del asfalto</b>	69.5	g
<b>% CA (aparente)</b>	6.74	%

<b>Ensayo N° 32</b>	<b>Medida</b>	<b>Unidad</b>
<b>Peso del material antes del lavado (PAL)</b>	1165.7	g
<b>Peso del material después del lavado (PDL)</b>	1088.9	g
<b>Peso del filtro antes del lavado (FAL)</b>	10	g
<b>Peso del filtro después del lavado (PDL)</b>	10.9	g
<b>Peso de los agregados (A + AA)</b>	1089.8	g
<b>Peso de agregados gruesos</b>	482.6	g
<b>Peso del asfalto</b>	75.9	g
<b>% CA (aparente)</b>	6.51	%

<b>Ensayo N° 33</b>	<b>Medida</b>	<b>Unidad</b>
<b>Peso del material antes del lavado (PAL)</b>	1104.4	g
<b>Peso del material después del lavado (PDL)</b>	1030.6	g
<b>Peso del filtro antes del lavado (FAL)</b>	10.3	g
<b>Peso del filtro después del lavado (PDL)</b>	11	g
<b>Peso de los agregados (A + AA)</b>	1031.3	g
<b>Peso de agregados gruesos</b>	437.3	g
<b>Peso del asfalto</b>	73.1	g
<b>% CA (aparente)</b>	6.62	%

<b>Ensayo N° 34</b>	<b>Medida</b>	<b>Unidad</b>
<b>Peso del material antes del lavado (PAL)</b>	1208.7	g
<b>Peso del material después del lavado (PDL)</b>	1123.4	g
<b>Peso del filtro antes del lavado (FAL)</b>	10.2	g
<b>Peso del filtro después del lavado (PDL)</b>	11.1	g
<b>Peso de los agregados (A + AA)</b>	1124.3	g
<b>Peso de agregados gruesos</b>	420.7	g
<b>Peso del asfalto</b>	84.4	g
<b>% CA (aparente)</b>	6.98	%

<b>Ensayo N° 35</b>	<b>Medida</b>	<b>Unidad</b>
<b>Peso del material antes del lavado (PAL)</b>	1131.9	g
<b>Peso del material después del lavado (PDL)</b>	1053.2	g
<b>Peso del filtro antes del lavado (FAL)</b>	9.2	g
<b>Peso del filtro después del lavado (PDL)</b>	10.1	g
<b>Peso de los agregados (A + AA)</b>	1054.1	g
<b>Peso de agregados gruesos</b>	411.5	g
<b>Peso del asfalto</b>	77.8	g
<b>% CA (aparente)</b>	6.87	%

#### ANEXO 4

#### ENSAYOS DEL GRUPO 3 (12 ENSAYOS DE LA CANTERA KM. 47+500)

<b>Ensayo N° 36</b>	<b>Medida</b>	<b>Unidad</b>
Peso del material antes del lavado (PAL)	967	g
Peso del material después del lavado (PDL)	902.1	g
Peso del filtro antes del lavado (FAL)	9.1	g
Peso del filtro después del lavado (PDL)	10	g
Peso de los agregados (A + AA)	903	g
Peso de agregados gruesos	366.5	g
Peso del asfalto	64	g
% CA (aparente)	6.62	%

<b>Ensayo N° 37</b>	<b>Medida</b>	<b>Unidad</b>
Peso del material antes del lavado (PAL)	1069.8	g
Peso del material después del lavado (PDL)	996.4	g
Peso del filtro antes del lavado (FAL)	10.2	g
Peso del filtro después del lavado (PDL)	11.7	g
Peso de los agregados (A + AA)	997.9	g
Peso de agregados gruesos	383.1	g
Peso del asfalto	71.9	g
% CA (aparente)	6.72	%

<b>Ensayo N° 38</b>	<b>Medida</b>	<b>Unidad</b>
Peso del material antes del lavado (PAL)	999.5	g
Peso del material después del lavado (PDL)	932.4	g
Peso del filtro antes del lavado (FAL)	9.3	g
Peso del filtro después del lavado (PDL)	10.2	g
Peso de los agregados (A + AA)	933.3	g
Peso de agregados gruesos	377.9	g
Peso del asfalto	66.2	g
% CA (aparente)	6.62	%

<b>Ensayo N° 39</b>	<b>Medida</b>	<b>Unidad</b>
Peso del material antes del lavado (PAL)	1015.1	g
Peso del material después del lavado (PDL)	948.7	g
Peso del filtro antes del lavado (FAL)	9.6	g
Peso del filtro después del lavado (PDL)	10.9	g
Peso de los agregados (A + AA)	950	g
Peso de agregados gruesos	412.5	g
Peso del asfalto	65.1	g
% CA (aparente)	6.41	%

<b>Ensayo N° 40</b>	<b>Medida</b>	<b>Unidad</b>
Peso del material antes del lavado (PAL)	1045.9	g
Peso del material después del lavado (PDL)	975.4	g
Peso del filtro antes del lavado (FAL)	10.2	g
Peso del filtro después del lavado (PDL)	10.9	g
Peso de los agregados (A + AA)	976.1	g
Peso de agregados gruesos	370.1	g
Peso del asfalto	69.8	g
% CA (aparente)	6.67	%

<b>Ensayo N° 41</b>	<b>Medida</b>	<b>Unidad</b>
Peso del material antes del lavado (PAL)	1023.2	g
Peso del material después del lavado (PDL)	953.3	g
Peso del filtro antes del lavado (FAL)	9.1	g
Peso del filtro después del lavado (PDL)	10.3	g
Peso de los agregados (A + AA)	954.5	g
Peso de agregados gruesos	347.2	g
Peso del asfalto	68.7	g
% CA (aparente)	6.71	%

<b>Ensayo N° 42</b>	<b>Medida</b>	<b>Unidad</b>
Peso del material antes del lavado (PAL)	1172.1	g
Peso del material después del lavado (PDL)	1091.2	g
Peso del filtro antes del lavado (FAL)	9.8	g
Peso del filtro después del lavado (PDL)	10.8	g
Peso de los agregados (A + AA)	1092.2	g
Peso de agregados gruesos	390.3	g
Peso del asfalto	79.9	g
% CA (aparente)	6.82	%

<b>Ensayo N° 43</b>	<b>Medida</b>	<b>Unidad</b>
Peso del material antes del lavado (PAL)	1000.6	g
Peso del material después del lavado (PDL)	933.1	g
Peso del filtro antes del lavado (FAL)	9.2	g
Peso del filtro después del lavado (PDL)	10.5	g
Peso de los agregados (A + AA)	934.4	g
Peso de agregados gruesos	357.2	g
Peso del asfalto	66.2	g
% CA (aparente)	6.62	%

<b>Ensayo N° 44</b>	<b>Medida</b>	<b>Unidad</b>
Peso del material antes del lavado (PAL)	1141	g
Peso del material después del lavado (PDL)	1066.5	g
Peso del filtro antes del lavado (FAL)	9.4	g
Peso del filtro después del lavado (PDL)	10.2	g
Peso de los agregados (A + AA)	1067.3	g
Peso de agregados gruesos	454.2	g
Peso del asfalto	73.7	g
% CA (aparente)	6.46	%

<b>Ensayo N° 45</b>	<b>Medida</b>	<b>Unidad</b>
Peso del material antes del lavado (PAL)	1060.6	g
Peso del material después del lavado (PDL)	990.1	g
Peso del filtro antes del lavado (FAL)	10.2	g
Peso del filtro después del lavado (PDL)	11.7	g
Peso de los agregados (A + AA)	991.6	g
Peso de agregados gruesos	409.6	g
Peso del asfalto	69	g
% CA (aparente)	6.51	%

<b>Ensayo N° 46</b>	<b>Medida</b>	<b>Unidad</b>
Peso del material antes del lavado (PAL)	1182.8	g
Peso del material después del lavado (PDL)	1102.9	g
Peso del filtro antes del lavado (FAL)	10.1	g
Peso del filtro después del lavado (PDL)	11.4	g
Peso de los agregados (A + AA)	1104.2	g
Peso de agregados gruesos	438.5	g
Peso del asfalto	78.6	g
% CA (aparente)	6.65	%

<b>Ensayo N° 47</b>	<b>Medida</b>	<b>Unidad</b>
<b>Peso del material antes del lavado (PAL)</b>	1237.2	g
<b>Peso del material después del lavado (PDL)</b>	1156.3	g
<b>Peso del filtro antes del lavado (FAL)</b>	9.8	g
<b>Peso del filtro después del lavado (PDL)</b>	11.3	g
<b>Peso de los agregados (A + AA)</b>	1157.8	g
<b>Peso de agregados gruesos</b>	499.2	g
<b>Peso del asfalto</b>	79.4	g
<b>% CA (aparente)</b>	6.42	%



## ANEXO 5

### PORCENTAJE DE GRAVA EN LA FAJA TRANSPORTADORA PARA LOS 3 GRUPOS DE ENSAYOS

Grupo	N° de ensayo	% grava en faja
1	1	41.27
	2	41.27
	3	41.27
	4	41.27
	5	41.27
	6	41.27
	7	41.27
	8	41.64
	9	41.64
	10	41.64
	11	41.64
	12	39.24
	13	39.24
	14	39.24
	15	39.24
	16	40.79
	17	40.79
	18	40.79
	19	40.79
	20	40.69
2	21	40.69
	22	40.69
	23	40.69
	24	41.73
	25	41.73
	26	41.73
	27	41.73
	28	41.95
	29	41.95
	30	41.95
	31	41.95
	32	41.69
	33	41.69
	34	41.69
	35	41.69

<b>Grupo</b>	<b>N° de ensayo</b>	<b>% grava en faja</b>
<b>3</b>	36	41.84
	37	41.84
	38	41.84
	39	41.84
	40	39.89
	41	39.89
	42	39.89
	43	39.89
	44	41.62
	45	41.62
	46	41.62
	47	41.62

## ANEXO 6

### PRUEBA T DE WILCOXON AL GRUPO 2 (28 ENSAYOS DE LA CANTERA CY-1, PALCA, PALCA, TACNA)

#### Procesamiento de datos

N°	%CA aparente	%CA real	Dif	Abs(di)	Rd	R(+)	R(-)
8	6.65	6.68	-0.03	0.03	1.00		1.00
9	6.92	6.7	0.22	0.22	23.00	23.00	
10	6.82	6.71	0.11	0.11	11.50	11.50	
11	6.77	6.69	0.08	0.08	8.00	8.00	
12	6.76	6.69	0.07	0.07	6.00	6.00	
13	6.99	6.68	0.31	0.31	25.00	25.00	
14	6.59	6.66	-0.07	0.07	6.00		6.00
15	6.75	6.68	0.07	0.07	6.00	6.00	
16	6.58	6.72	-0.14	0.14	14.50		14.50
17	7.02	6.69	0.33	0.33	26.00	26.00	
18	6.62	6.71	-0.09	0.09	9.00		9.00
19	7.19	6.68	0.51	0.51	28.00	28.00	
20	6.74	6.68	0.06	0.06	4.00	4.00	
21	6.9	6.71	0.19	0.19	21.00	21.00	
22	6.83	6.71	0.12	0.12	13.00	13.00	
23	6.58	6.69	-0.11	0.11	11.50		11.50
24	6.57	6.67	-0.1	0.10	10.00		10.00
25	6.83	6.68	0.15	0.15	16.50	16.50	
26	6.82	6.68	0.14	0.14	14.50	14.50	
27	6.87	6.7	0.17	0.17	18.50	18.50	
28	6.87	6.67	0.2	0.20	22.00	22.00	
29	6.83	6.68	0.15	0.15	16.50	16.50	
30	7.13	6.68	0.45	0.45	27.00	27.00	
31	6.74	6.69	0.05	0.05	2.50	2.50	
32	6.51	6.68	-0.17	0.17	18.50		18.50
33	6.62	6.67	-0.05	0.05	2.50		2.50
34	6.98	6.68	0.3	0.30	24.00	24.00	
35	6.87	6.69	0.18	0.18	20	20	
<b>SUMA:</b>						333.00	73.00

### Cálculo de rangos de las diferencias

Dato	t	Rango	R
0.03	1	1 a 1	1.0
0.05	2	2 a 3	2.5
0.06	1	4 a 4	4.0
0.07	3	5 a 7	6.0
0.08	1	8 a 8	8.0
0.09	1	9 a 9	9.0
0.1	1	10 a 10	10.0
0.11	2	11 a 12	11.5
0.12	1	13 a 13	13.0
0.14	2	14 a 15	14.5
0.15	2	16 a 17	16.5
0.17	2	18 a 19	18.5
0.18	1	20 a 20	20.0
0.19	1	21 a 21	21.0
0.2	1	22 a 22	22.0
0.22	1	23 a 23	23.0
0.3	1	24 a 24	24.0
0.31	1	25 a 25	25.0
0.33	1	26 a 26	26.0
0.45	1	27 a 27	27.0
0.51	1	28 a 28	28

## ANEXO 7

### PRUEBA T DE WILCOXON AL GRUPO 3 (12 ENSAYOS DE LA CANTERA KM. 47+500, ANCOMARCA, PALCA, TACNA)

#### Procesamiento de datos

N°	%CA aparente	%CA real	Dif	Abs(di)	Rd	R(+)	R(-)
36	6.62	6.54	0.08	0.08	3.00	3.00	
37	6.72	6.49	0.23	0.23	9.00	10.50	
38	6.62	6.53	0.09	0.09	4.50	4.50	
39	6.41	6.51	-0.1	0.10	6.00		6.00
40	6.67	6.54	0.13	0.13	9.00	8.50	
41	6.71	6.48	0.23	0.23	11.00	10.50	
42	6.82	6.53	0.29	0.29	12.00	12.00	
43	6.62	6.51	0.11	0.11	7.00	7.00	
44	6.46	6.52	-0.06	0.06	2.00		2.00
45	6.51	6.49	0.02	0.02	1.00	1.00	
46	6.65	6.52	0.13	0.13	9.00	8.50	
47	6.42	6.51	-0.09	0.09	4.5		4.5
<b>SUMA:</b>						65.50	12.50

#### Cálculo de rangos de las diferencias

Dato	t	Rango	R
0.02	1	1 a 1	1.0
0.06	1	2 a 2	2.0
0.08	1	3 a 3	3.0
0.09	2	4 a 5	4.5
0.1	1	6 a 6	6.0
0.11	1	7 a 7	7.0
0.13	2	8 a 9	8.5
0.23	2	10 a 11	10.5
0.29	1	12 a 12	12

## ANEXO 8

### VALORES CRÍTICOS DE LA PRUEBA T DE WILCOXON

Signif ⇒ n ↓	Prueba bilateral		Prueba unilateral	
	0.05	0.01	0.05	0.01
5	**	**	0	**
6	0	**	2	**
7	2	**	3	0
8	3	0	5	1
9	5	1	8	3
10	8	3	10	3
11	10	5	13	7
12	13	7	17	9
13	17	9	21	12
14	21	12	25	15
15	25	15	30	19
16	29	19	35	23
17	34	23	41	27
18	40	27	47	32
19	46	32	53	37
20	52	37	60	43
21	58	42	67	49
22	65	48	75	55
23	73	54	83	62
24	81	61	91	69
25	89	68	100	76
26	98	75	110	84
27	107	83	119	92
28	116	91	130	101
29	126	100	140	110
30	137	109	151	120

## ANEXO 9

### EJEMPLO DE LA ECUACIÓN EN HOJA DE CÁLCULO

#### CORRECIÓN DEL PORCENTAJE DE CEMENTO ASFÁLTICO

*Autor: Rualth Gustavo Bravo Anaya*

*a. Porcentaje decemento asfáltico aparente*

<b>1</b>	Peso de Muestra en Faja	<b>10964</b>
<b>2</b>	Peso de Grava en Faja	<b>4354.5</b>
<b>3</b>	% Grava en Faja (%AG1)	39.72

<b>4</b>	Peso Mat. bituminosos sin lavar (PAL)	<b>1165.7</b>	<b>6</b>	Peso de filtro limpio (FAL)	<b>9.6</b>
<b>5</b>	Peso mat. lavado (PDL)	<b>1088.9</b>	<b>7</b>	Peso de filtro después del lavado (FDL)	<b>11.1</b>

<b>8</b>	<b>% de Asfalto obtenido</b>	<b>6.46</b>
----------	------------------------------	-------------

*b. Porcentaje de cemento asfáltico real*

<b>9</b>	Peso de muestra en el ensayo de Lavado	1090.40
<b>10</b>	Peso Grava en el ensayo de Lavado	<b>482.6</b>

<b>11</b>	% Grava en ensayo de Lavado (%AG2)	44.26
-----------	------------------------------------	-------

<b>12</b>	<b>% de Asfalto Corregido</b>	<b>6.75</b>
-----------	-------------------------------	-------------