

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Civil

Tesis

**Efecto de la incorporación de agregados artificiales de arcilla  
cristalizada reforzado con óxido de calcio en las propiedades físicas  
y mecánicas de mezclas asfálticas en caliente Huancayo, 2024**

Mael Gino Dionicio Yaringaño  
Mael Roy Dionicio Yaringaño

Para optar el Título Profesional de  
Ingeniero Civil

Huancayo, 2025

Repositorio Institucional Continental  
Tesis digital



Esta obra está bajo una Licencia "Creative Commons Atribución 4.0 Internacional" .

## INFORME DE CONFORMIDAD DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

A : Decano de la Facultad de Ingeniería  
DE : Misael Cipriano, Joaquín Vásquez  
Asesor de trabajo de investigación  
ASUNTO : Remito resultado de evaluación de originalidad de trabajo de investigación  
FECHA : 22 de Mayo de 2025

Con sumo agrado me dirijo a vuestro despacho para informar que, en mi condición de asesor del trabajo de investigación:

### Título:

"EFECTO DE LA INCORPORACIÓN DE AGREGADOS ARTIFICIALES DE ARCILLA CRISTALIZADA REFORZADO CON OXIDO DE CALCIO EN LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE HUANCAYO, 2024"

### Autores:

1. Mael Gino Dionicio Yaringaño – EAP. Ingeniería Civil
2. Mael Roy Dionicio Yaringaño – EAP. Ingeniería Civil

Se procedió con la carga del documento a la plataforma "Turnitin" y se realizó la verificación completa de las coincidencias resaltadas por el software dando por resultado 19% de similitud sin encontrarse hallazgos relacionados a plagio. Se utilizaron los siguientes filtros:

Filtro de exclusión de bibliografía	SI	<input checked="" type="checkbox"/>	NO	<input type="checkbox"/>
Filtro de exclusión de grupos de palabras menores N.º de palabras excluidas <b>(en caso de elegir "SI"):</b>	SI	<input type="checkbox"/>	NO	<input checked="" type="checkbox"/>
Exclusión de fuente por trabajo anterior del mismo estudiante	SI	<input type="checkbox"/>	NO	<input checked="" type="checkbox"/>

En consecuencia, se determina que el trabajo de investigación constituye un documento original al presentar similitud de otros autores (citas) por debajo del porcentaje establecido por la Universidad Continental.

Recae toda responsabilidad del contenido del trabajo de investigación sobre el autor y asesor, en concordancia a los principios expresados en el Reglamento del Registro Nacional de Trabajos conducentes a Grados y Títulos – RENATI y en la normativa de la Universidad Continental.

Atentamente,

**La firma del asesor obra en el archivo original**

**(No se muestra en este documento por estar expuesto a publicación)**

**ASESOR**

Mg. Misael Cipriano Joaquín Vásquez

## **AGRADECIMIENTO**

Agradecemos a Dios por guiarnos por el camino correcto, a nuestros padres por estar con nosotros y a su apoyo incondicional; fueron nuestra inspiración y fortaleza en cada momento de nuestras vidas.

Extendemos también, nuestro agradecimiento a nuestros docentes de la Facultad de Ingeniería, por compartir con nosotros sus conocimientos durante todo el proceso de la preparación de nuestra profesión y especialmente a nuestro asesor de tesis Ing. Misael Cipriano Joaquín Vásquez por habernos guiado en este proyecto en base a su experiencia y sabiduría.

## **DEDICATORIA**

El presente proyecto está dedicado a Dios y a nuestros padres. Agradeciendo a Dios por acompañarnos en cada paso del camino, a mis padres, que siempre han cuidado de nuestro bienestar y educación brindándonos su apoyo incondicional, y poniendo toda su confianza en nosotros.

Mael Gino & Mael Roy.

## ÍNDICE DEL CONTENIDO

ASESOR .....	iv
AGRADECIMIENTO .....	v
DEDICATORIA.....	vi
ÍNDICE DEL CONTENIDO .....	vii
ÍNDICE DE TABLAS .....	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
RESUMEN .....	xiv
ABSTRACT.....	xv
INTRODUCCIÓN .....	xvi
CAPÍTULO I PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO .....	18
1.1. Planteamiento del Problema .....	18
1.2. Formulación del Problema .....	19
1.2.1. Problema General.....	19
1.2.2. Problemas Específicos .....	19
1.3. Objetivos .....	20
1.3.1. Objetivo general .....	20
1.3.2. Objetivos específicos .....	20
1.4. Justificación e importancia .....	20
1.4.1. Justificación práctica.....	20
1.4.2. Justificación teórica.....	20
1.4.3. Justificación metodológica.....	21
1.5. Delimitación de la investigación.....	21
1.5.1. Delimitación espacial .....	21
1.5.2. Delimitación temporal.....	21
1.5.3. Delimitación conceptual.....	21
1.6. Hipótesis y Variables.....	21
1.6.1. Hipótesis General .....	21
1.6.2. Hipótesis Específicas .....	22
1.6.3. Variables.....	22
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO .....	24
2.1. Antecedentes del Problema.....	24
2.1.1. Antecedentes Nacionales .....	24
2.1.2. Antecedentes Internacionales.....	27
2.2. Bases Teóricas.....	30
2.2.1. Pavimento flexible .....	30

2.2.2.	Mezcla Asfáltica en caliente.....	30
2.2.3.	Ligante asfáltico .....	33
2.2.4.	Mezcla de agregados .....	38
2.2.5.	Propiedades Volumétricas .....	40
2.2.6.	Pruebas mecánicas de Ensayos de estabilidad y fluencia.....	48
2.2.7.	Ensayo de inmersión – compresión.....	48
2.2.8.	Determinación de óptimo Contenido de Asfalto .....	49
2.2.9.	Oxido de Calcio.....	50
2.3.	Definición de Términos Básicos .....	52
2.3.1.	Mezcla asfáltica.....	52
2.3.2.	Propiedades de la mezcla asfáltica .....	52
2.3.3.	Propiedades mecánicas.....	52
2.3.4.	Oxido de Calcio.....	52
CAPÍTULO III METODOLOGÍA .....		53
3.1.	Métodos y alcance de la investigación.....	53
3.1.1.	Método de la investigación .....	53
3.1.2.	Tipo de investigación .....	53
3.1.3.	Nivel de investigación.....	53
3.1.4.	Diseño de investigación .....	54
3.2.	Población y muestra .....	54
3.2.1.	Población.....	54
3.2.2.	Muestra.....	54
3.2.3.	Muestreo.....	55
3.3.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	55
3.3.1.	Técnica .....	55
3.3.2.	Instrumento de recolección de datos .....	55
3.4.	Procedimiento de recolección de datos .....	56
3.5.	Aspectos éticos.....	56
CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....		57
4.1.	Caracterización de agregados artificiales de arcilla cristalizada .....	57
4.1.1.	Ensayo de abrasión Los Ángeles.....	58
4.1.2.	Ensayo de absorción.....	58
4.1.3.	Ensayo de durabilidad .....	59
4.2.	Diseño Marshall – Caracterización granulométrica materiales .....	62
4.2.1.	Granulometría de agregado grueso artificial cristalizado – Tamaño ½” .....	62
4.2.2.	Granulometría de agregado fino natural – Tamaño N°4 .....	64
4.2.3.	Granulometría de agregado fino triturado – Tamaño N°4.....	65

4.2.4.	Granulometría del filler Cal hidratada – Tamaño N°200 .....	67
4.3.	Diseño Marshall – Combinación de agregados MAC/02 .....	68
4.4.	Diseño Marshall – Propiedades óptimo contenido asfáltico .....	72
4.5.	OE1 – Óxido de calcio en densidad y volumetría.....	76
4.6.	OE2 – Óxido de calcio en estabilidad y flujo .....	81
4.7.	OE3 – Óxido de calcio en resistencia retenida.....	85
4.8.	OG – Óxido de calcio en propiedades físicas y mecánicas.....	86
4.9.	Discusión de resultados.....	95
4.10.	Análisis estadístico.....	96
4.10.1.	Vacíos de aire al adicionar óxido de calcio .....	97
4.10.2.	Peso unitario al Añadir óxido calcio .....	100
4.10.3.	Estabilidad al incorporar óxido de calcio al AG .....	102
4.10.4.	Flujo al incorporar óxido de calcio al AG .....	105
4.10.5.	Resistencia retenida al añadir óxido de calcio al AG .....	108
4.10.6.	Estabilidad al variar el cemento asfáltico.....	110
4.10.7.	Flujo al variar el cemento asfáltico .....	114
4.10.8.	Vacíos de aire al variar el cemento asfáltico .....	118
	CONCLUSIONES .....	123
	RECOMENDACIONES.....	125
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	126
	ANEXOS .....	130
	Anexo 1. Matriz de consistencia .....	130
	Anexo 2. Matriz de Operacionalización de variables .....	132
	Anexo 3. Certificados de ensayo .....	133
	Anexo 4. Panel fotográfico .....	162

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Operacionalización de las variables .....	23
Tabla 2: Requerimientos de ensayos para agregado grueso.....	35
Tabla 3: Requisitos de pruebas de ensayo para agregado fino.....	36
Tabla 4: Exigencia mínima de granulometría .....	36
Tabla 5: Elección del cemento asfáltico según sus características.....	37
Tabla 6: Gradación para mezcla asfáltica en caliente (MAC).....	38
Tabla 7: Requisitos técnicos para Mezclas de Concreto Bituminoso.....	39
Tabla 8: Vacíos mínimos en el agregado mineral (VMA).....	39
Tabla 10: Pruebas de Abrasión los Ángeles– agregado artificial de arcilla cristalizada. ....	58
Tabla 11: Ensayo de absorción – agregado grueso artificial de arcilla cristalizada.....	59
Tabla 12: Ensayo de durabilidad – agregado grueso artificial de arcilla cristalizada .....	60
Tabla 13: Caracterización resumen – agregado grueso artificial de arcilla cristalizada .....	61
Tabla 14: Ensayo granulométrico – Agregado grueso artificial de arcilla cristalizada ½” .....	62
Tabla 15: Ensayo granulométrico – Agregado fino natural N°4.....	64
Tabla 16: Ensayo granulométrico – Agregado fino triturado N°4 .....	66
Tabla 17: Ensayo granulométrico – Filler Cal hidratada N°200.....	67
Tabla 18: Mezcla de agregados teórico – Combinación granular.....	69
Tabla 19: Mezcla de agregados teórico – Porcentajes resultantes en mezcla.....	70
Tabla 20: Propiedades de mezcla – Óptimo contenido asfáltico.....	75
Tabla 21: Porcentaje de vacíos (Va)– Con variación en óxido de calcio.....	76
Tabla 22: Porcentaje de %VMA – Con variación en óxido de calcio.....	78
Tabla 23: Porcentaje de VLLA – Con variación en óxido de calcio.....	79
Tabla 24: Peso unitario – Con variación en óxido de calcio.....	80
Tabla 25: Estabilidad – Con variación en óxido de calcio.....	82
Tabla 26: Flujo – Con variación en óxido de calcio.....	84
Tabla 27: Resistencia retenida – Con variación en óxido de calcio.....	85
Tabla 28: Estabilidad – Contenidos de cemento asfáltico (Tráfico medio).....	87
Tabla 29: Estabilidad – Contenidos de cemento asfáltico (Tráfico bajo).....	89
Tabla 30: Flujo – Contenidos de cemento asfáltico (Tráfico medio).....	90
Tabla 31: Flujo – Contenidos de cemento asfáltico (Tráfico bajo).....	91
Tabla 32: Porcentaje de vacíos (Va) – Contenidos de cemento asfáltico (Tráfico medio).....	93
Tabla 33: Porcentaje de vacíos – Contenidos de cemento asfáltico (Tráfico bajo).....	94
Tabla 34: Prueba de normalidad de vacíos de aire ante la variación de óxido de calcio.....	97
Tabla 35: Prueba ANOVA de vacíos de aire ante variación de óxido de calcio.....	98

Tabla 36: Prueba post hoc Duncan de vacíos de aire ante distintas proporciones de óxido de calcio.....	99
Tabla 37: Prueba de normalidad de peso unitario ante variación de óxido de calcio. ....	100
Tabla 38: Prueba ANOVA de peso unitario ante variación de óxido de calcio.....	101
Tabla 39: Prueba post hoc Duncan de peso unitario ante variación de óxido de calcio.....	101
Tabla 40: Prueba de normalidad de estabilidad ante variación de óxido de calcio. ....	103
Tabla 41: Prueba ANOVA de estabilidad ante variación de óxido de calcio. ....	103
Tabla 42: Prueba post hoc Duncan de estabilidad ante variación de óxido de calcio. ....	104
Tabla 43: Prueba de normalidad de flujo ante variación de óxido de calcio.....	106
Tabla 44: Prueba ANOVA de flujo ante variación de óxido de calcio. ....	106
Tabla 45: Prueba post hoc Duncan de flujo ante variación de óxido de calcio.....	107
Tabla 46: Prueba de normalidad de resistencia retenida según la variación de óxido de calcio .....	108
Tabla 47: Prueba ANOVA de resistencia retenida ante variación de óxido de calcio .....	109
Tabla 48: Prueba post hoc Duncan de resistencia retenida ante variación de óxido de calcio .....	109
Tabla 49: Prueba de normalidad de estabilidad ante variación de cemento asfáltico .....	111
Tabla 50: Prueba ANOVA de estabilidad ante variación de cemento asfáltico.....	112
Tabla 51: Prueba post hoc Duncan de estabilidad ante variación de cemento asfáltico para tráfico medio .....	112
Tabla 52: Prueba post hoc Duncan de estabilidad ante variación de cemento asfáltico para tráfico bajo .....	113
Tabla 53: Prueba de normalidad de flujo ante variación de cemento asfáltico.....	115
Tabla 54: Prueba ANOVA de flujo ante variación de cemento asfáltico.....	115
Tabla 55: Prueba post hoc Duncan de flujo ante variación de cemento asfáltico para tráfico medio. ....	116
Tabla 56: Prueba post hoc Duncan de flujo ante variación de cemento asfáltico para tráfico bajo .....	117
Tabla 57: Prueba de normalidad de vacíos de aire ante variación de cemento asfáltico.....	119
Tabla 58: Prueba ANOVA de vacíos de aire ante variación de cemento asfáltico .....	119
Tabla 59: Prueba post hoc Duncan de vacíos de aire ante variación de cemento asfáltico para tráfico medio .....	120
Tabla 60: Prueba post hoc Duncan de vacíos de aire ante variación de cemento asfáltico para tráfico bajo .....	121

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Esquema del método de dosificación Marshall. ....	32
Figura 2: Gravedad específica Teórica Máxima. ....	43
Figura 3: Esquema de una Muestra HMA Compactada. ....	47
Figura 4: Ensayo de inmersión compresión – Probeta después del ensayo .....	49
Tabla 9: Tamaño de muestra .....	54
Figura 5: Arcilla triturada cristalizada TMZ 12.7mm – agregado grueso artificial. ....	57
Figura 6: Curva granulométrica – Agregado grueso artificial de arcilla cristalizada ½” .....	63
Figura 7: Curva granulométrica – Agregado fino natural N°4 .....	65
Figura 8: Curva granulométrica – Agregado fino árido triturado N°4. ....	67
Figura 9: Curva granulométrica – Filler Cal hidratada N°200. ....	68
Figura 10: Curva combinación granulométrica – MAC/02. ....	71
Figura 11: Estabilidad diseño mezcla patrón – Óptimo contenido asfáltico. ....	72
Figura 12: Flujo diseño mezcla patrón – Óptimo contenido asfáltico. ....	73
Figura 13: Vacíos diseño mezcla patrón – Óptimo contenido asfáltico. ....	73
Figura 14: VMA diseño mezcla patrón – Óptimo contenido asfáltico (OCA). ....	74
Figura 15: VLLA diseño mezcla patrón – Óptimo contenido asfáltico. ....	74
Figura 16: Peso Unitario diseño mezcla patrón – Óptimo contenido asfáltico. ....	75
Figura 17: Vacíos en mezcla Experimental – Contenidos en óxido de calcio. ....	77
Figura 18: VMA en mezcla Experimental – Contenidos en óxido de calcio. ....	78
Figura 19: VLLA en mezcla Experimental – Contenidos en óxido de calcio. ....	80
Figura 20: Peso unitario en mezcla Experimental – Contenidos en óxido de calcio. ....	81
Figura 21: Estabilidad Experimental – Contenidos en óxido de calcio. ....	83
Figura 22: Flujo Experimental – Contenidos en óxido de calcio. ....	84
Figura 23: Resistencia retenida Experimental – Contenidos en óxido de calcio. ....	86
Figura 24: Estabilidad – Contenidos de cemento asfáltico (Tráfico medio). ....	88
Figura 25: Estabilidad– Contenidos de cemento asfáltico (Tráfico bajo). ....	89
Figura 26: Flujo – Contenidos de cemento asfáltico (Tráfico medio). ....	91
Figura 27: Flujo – Contenidos de cemento asfáltico (Tráfico bajo). ....	92
Figura 28: Vacíos – Contenidos de cemento asfáltico (Tráfico medio). ....	93
Figura 29: Vacíos – Contenidos de cemento asfáltico (Tráfico bajo). ....	95
Figura 30: Gráfico de dispersión de vacíos de aire ante variación de óxido de calcio. ....	99
Figura 31: Gráfico de dispersión de peso unitario ante variación de óxido de calcio. ....	102
Figura 32: Gráfico de dispersión de estabilidad ante variación de óxido de calcio. ....	105
Figura 33: Gráfico de dispersión de flujo ante variación de óxido de calcio. ....	107
Figura 34: Gráfico de dispersión de resistencia retenida ante variación de óxido de calcio. ..	110

Figura 35: Gráfico de dispersión de estabilidad ante variación de cemento asfáltico. ....	114
Figura 36: Gráfico de dispersión de flujo ante variación de cemento asfáltico. ....	118
Figura 37: Gráfico de dispersión de vacíos de aire ante variación de cemento asfáltico.....	122

## RESUMEN

Actualmente, se están investigando y desarrollando nuevas técnicas y procedimientos para crear mezclas asfálticas de alta resistencia, capaces de resistir el deterioro provocado por el tránsito y prolongar la vida útil de los pavimentos. El propósito fundamental de este estudio es evaluar el efecto de la sustitución del agregado grueso por la arcilla cristalizada reforzado con óxido de calcio sobre el desempeño físico y mecánicos de las mezclas asfálticas en caliente. La creciente necesidad de mejorar y garantizar el cumplimiento de los estándares de las propiedades volumétricas, la estabilidad y el flujo de la mezcla compactada exigidos en EG-2013 del MTC y así garantizar una mayor duración de los pavimentos. Para llevar a cabo el desarrollo esta investigación contempló en el uso de óxido de calcio como componente importante para el agregado grueso artificial a partir de arcilla cristalizada, procesado para obtener un tamaño máximo nominal de 1/2" para la gradación de los agregados, conforme a las especificaciones de la mezcla asfáltica en caliente tipo (MAC/02), este diseño fue ajustado con fin de cumplir los parámetros y requisitos granulométricos estipuladas. En la fase inicial del proceso experimental se elaboraron 6 tipos de mezclas con la combinación de agregado grueso artificial fabricada con 0% de óxido de calcio, agregado fino y filler; con la variación de cemento asfáltico de 4%; 4.5%, 5%, 5.5% 6%, 6.5%. Para cada mezcla, se elaboraron 3 series con un porcentaje distinto de contenido de ligante de asfalto, con la finalidad de determinar el óptimo contenido de asfalto mediante el análisis de las propiedades volumétricas, flujo, la estabilidad, y la resistencia a la compresión bajo inmersión. A partir de del óptimo contenido asfáltico, se rediseñaron mezclas asfálticas sustituyendo el agregado grueso por la arcilla cristalizada reforzado con oxido de calcio en porcentajes de 0%, 6%, 12%, 18% y 24%.

Como resultado, en la primera fase se obtuvo un contenido optimo de C.A 5.45%, y posteriormente se determinó una dosificación óptima de óxido de calcio del 18% en el agregado grueso artificial, cumpliendo con los requerimientos establecidos para pavimentos destinados al nivel de tráfico bajo y medio, ofreciendo una solución viable y mejorada para la construcción de pavimentos asfálticos más durables y resistentes.

**Palabras clave:** Agregados de arcilla cristalizada, óxido de calcio, mezclas asfálticas, propiedades volumétricas, propiedades mecánicas, inmersión compresión.

## ABSTRACT

Currently, new techniques and procedures are being researched and developed to create high-strength asphalt mixtures capable of resisting wear caused by traffic and prolonging the service life of pavements. The fundamental purpose of this study is to evaluate the effect of incorporating artificial aggregates of crystallized clay reinforced with calcium oxide on the physical and mechanical properties of hot mix asphalt. The growing need to improve and comply with the parameters of stability, flow and volumetric properties of the compacted mix required in EG-2013 of the MTC, guaranteeing a longer pavement life. The development of the research involved using calcium oxide as a key component for the artificial coarse aggregate from crystallized clay, processed to obtain a nominal maximum size of 1/2" for a hot mix asphalt gradation (MAC/02). This design was adjusted to meet the established particle size requirements. In the initial experimental phase, 6 types of mixes were prepared with the combination of coarse aggregate (artificial aggregate manufactured with 0% calcium oxide), fine aggregate and filler; with the variation of asphalt cement of 4%; 4.5%, 5%, 5.5% 6%, 6.5%; for each mix, 3 series were prepared with a different liquid asphalt content, in order to determine the optimum asphalt content by analyzing the volumetric properties, stability, flow, and resistance to compression immersion. With this asphalt content, mixes were designed with artificial aggregates incorporated with calcium oxide in percentages of 0%, 6%, 12%, 18% and 24%.

As a result, the optimal asphalt content of 5.45% was obtained in the first phase, and subsequently an optimal calcium oxide dosage of 18% in the artificial coarse aggregate was determined, meeting the requirements established for pavements intended for low and medium traffic levels, offering a viable and improved solution for the construction of more durable and resistant asphalt pavements.

**Key words:** Crystallized clay aggregates, calcium oxide, asphalt mixes, volumetric properties, mechanical properties, compression immersion.

## INTRODUCCIÓN

La utilización de mezclas asfálticas incorporado de materiales artificiales ha crecido progresivamente en la construcción de carreteras por su sostenibilidad y ahorro de recursos debido a la demanda de reciclar materiales, fomentando la conciencia sobre el pensamiento ecológico. De las mismas, varios países han comenzado a utilizar estos cambios en los pavimentos asfálticos. La creciente demanda de materiales de construcción sostenibles y de alto rendimiento ha impulsado la investigación y el desarrollo de nuevos componentes y métodos orientados a perfeccionar las propiedades de desempeño de mezclas de asfalto tradicionales.

El uso de arcilla cristalizada como materia prima para la elaboración de agregados artificiales presenta ventajas significativas, entre las que se incluyen su abundancia, el bajo costo y un buen desempeño de mejora en las propiedades como: la durabilidad, la resistencia y la estabilidad del pavimento. Además, la adición de reforzamientos químicos, como el óxido de calcio en el agregado grueso, puede potenciar aún más estas propiedades, contribuyendo a la creación de pavimentos de mayor durabilidad al desgaste, resistente ante las deformaciones plásticas, efectos adversos al tráfico y medio ambiente. Así como para promover la sostenibilidad mediante la utilización eficiente de los recursos y la mini minimización de los efectos negativos sobre el medioambiente.

La presente tesis está enfocada en el estudio detallado del efecto de sustituir el agregado grueso por la arcilla cristalizada reforzado con la incorporación de óxido calcio en diferentes proporciones para evaluar sus efectos en las propiedades mecánicas y físicas de mezclas de asfalto. Mediante la caracterización exhaustiva de los materiales y la realización de ensayos específicos, se busca determinar cómo estas modificaciones van a influir en parámetros importantes como el flujo, la estabilidad, las propiedades volumétricas y la resistencia a los efectos del agua bajo pruebas de compresión inmersión.

La arcilla cristalizada se ha identificado como un material potencialmente eficaz para la elaboración de agregados artificiales debido a su estructura mineralógica y propiedades físicas favorables. Estudios previos han demostrado que la utilización de arcilla calcinada a altas temperaturas puede mejorar mayor adhesividad entre el agregado y el ligante asfalto, así de incrementar la resistencia frente a la deformación permanente y los daños por fatiga. No obstante, la investigación sobre la incorporación de reforzamientos adicionales, como el óxido de calcio, en este tipo de agregados es aún limitada y presenta un campo amplio para la innovación y el desarrollo.

La realización de este estudio se justifica por la necesidad de desarrollar materiales de pavimentación más eficientes y sostenibles, capaces de satisfacer las crecientes demandas de tráfico y resistir condiciones ambientales adversas. Además, el aprovechamiento de materiales abundantes y económicos como la arcilla, combinado con técnicas de modificación química, puede contribuir a la reducción de costos y la optimización en el manejo de los recursos naturales. El estudio se centrará en evaluar mezclas asfálticas en caliente diseñadas bajo condiciones controladas en laboratorio, lo que permite una caracterización detallada y precisa de las propiedades evaluadas. Por tanto, se sugiere que futuros estudios incluyan evaluaciones a escala real y análisis de desempeño a largo plazo para complementar y validar los hallazgos obtenidos en este trabajo.

Los resultados obtenidos podrían conducir al desarrollo de pavimentos con mejor desempeño mecánico y mayor durabilidad, contribuyendo a la disminución de costos de mantenimiento. Además, el uso de materiales abundantes y sostenibles como la arcilla promueve prácticas constructivas más amigables con el medio ambiente, alineadas con las tendencias actuales de desarrollo sostenible en la ingeniería.

El presente estudio se compone en los capítulos que se detallan enseguida:

Capítulo I, especifica el planteamiento, la formulación del problema, objetivos, justificación, delimitación de la investigación, hipótesis y descripción de variables.

En el Capítulo II, Se expone el contexto general del problema de investigación, sustentado en antecedentes que detalla otros estudios vinculados con el trabajo de investigación y los fundamentos teóricos que lo sustentan en el desarrollo de la investigación.

En el Capítulo III, se consignan las características metodológicas respecto del estudio, así mismo se reconoce el diseño, la población, muestra, técnicas e instrumentos y procedimientos implementados para la obtención de datos.

En el Capítulo IV, Especifica la contribución más significativa del trabajo de estudio, así mismo se presentan los resultados obtenidos bajo un orden estricto en el cumplimiento de los objetivos propuestos con ensayos caracterizados y el desempeño de los agregados artificiales cristalizados reforzados con óxido de calcio para mezclas asfálticas, consiguiente de esta manera se dan a conocer las conclusiones y las recomendaciones correspondientes a cada una de estas.

# CAPÍTULO I

## PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

### 1.1. Planteamiento del Problema

Aunque esta tecnología muestra promesa en laboratorio y en algunos casos de aplicación piloto, hay una falta de estudios exhaustivos y datos a largo plazo que demuestren su efectividad en diferentes condiciones climáticas y de tráfico en diversas regiones del mundo. Mezclas asfálticas modificadas con estos agregados puede variar significativamente según los materiales utilizados, las condiciones de mezcla, compactación, y el diseño del asfalto. Esta variabilidad puede dificultar la estandarización y la implementación a gran escala. Aunque estos agregados pueden mejorar ciertas propiedades mecánicas y características físicas de mezclas asfálticas, su efecto a largo plazo en la durabilidad y resistencia del pavimento aún no se ha establecido completamente. Es necesario realizar estudios a largo plazo para evaluar su desempeño en condiciones reales de tráfico y clima (1).

A nivel internacional, la viabilidad y la efectividad de incorporar agregados artificiales de arcilla cristalizada reforzada con óxido de calcio en mezclas bituminosas en caliente enfrenta desafíos relacionados con la escasez de datos, la variabilidad en los resultados, el costo y la disponibilidad de los materiales, el impacto a largo plazo en la durabilidad y resistencia, y la regulación y estándares. Estos desafíos deben abordarse mediante una investigación continua, colaboración entre la industria y el sector público, y la adopción de enfoques integrados al desarrollo y la implementación de tecnologías innovadoras en la red de infraestructura de tránsito (2).

Bajo un enfoque nacional, la complejidad de la elaboración de proyectos viales en Perú es alta, producto de la variación climática. Lo cual agrava la aplicación de agregados artificiales a partir de la arcilla cristalizada que puede en sus componentes originales, no resistir las condiciones de tráfico y geográficas en estas variaciones climáticas a nivel nacional. (3)

En Huancayo, presentan más de 100 expedientes de proyectos para la extracción de material agregado en el río Mantaro ante la Autoridad Local del Agua (ALA-Mantaro). De estos, el 20% descartan para que no se produzca un efecto perjudicial de posibles afectos sobre el caudal de los ríos, impactos en las defensas a lo largo de las riberas debido a la sobreexplotación después de varios años. Estos materiales naturales son muy usados en construcción de pavimento asfáltico por lo que es necesario analizar y crear agregados artificiales para mezclas asfálticas. Sin embargo, este pavimento enfrenta desafíos relacionados con la durabilidad y la resistencia al tráfico constante y las condiciones climáticas adversas. En busca de soluciones innovadoras

para mejorar el desempeño estructural funcional del pavimento, prolongando así su vida útil, surge el interés en la incorporación de nuevos materiales, como los agregados artificiales de arcilla cristalizada reforzada con óxido de calcio. A pesar del potencial de estos agregados, existe una falta de comprensión sobre su impacto específico en las propiedades como mecánicas y físicas de la mezcla bituminosa en el contexto de Huancayo en 2024. Por ello, el planteamiento del problema se centrará en investigar cómo esta incorporación afecta las propiedades clave de la mezcla bituminosa, incluyendo su resistencia, su durabilidad y comportamiento ante las condiciones locales (3)

## **1.2. Formulación del Problema**

### **1.2.1. Problema General**

¿Cuál es efecto de la sustitución del agregado grueso por la arcilla cristalizada reforzado con oxido de calcio en las propiedades físicas y mecánicas de mezclas asfálticas en caliente Huancayo, 2024?

### **1.2.2. Problemas Específicos**

- ¿Cuál es el efecto de la sustitución del agregado grueso por la arcilla cristalizada reforzado con oxido de calcio en la densidad y volumen de vacíos de mezclas asfálticas en caliente Huancayo, 2024?
- ¿De qué manera varía la estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente con la sustitución del agregado grueso por la arcilla cristalizada reforzado con oxido de calcio Huancayo, 2024?
- ¿En qué porcentaje varía la resistencia retenida en el ensayo de inmersión compresión de mezclas asfálticas en caliente con la sustitución del agregado grueso por la arcilla cristalizada reforzado con oxido de calcio Huancayo, 2024?

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. Objetivo general**

Evaluar el efecto de la sustitución del agregado grueso por la arcilla cristalizada reforzado con oxido de calcio en las propiedades físicas y mecánicas de mezclas asfálticas en caliente Huancayo, 2024.

#### **1.3.2. Objetivos específicos**

- Determinar el efecto de la sustitución del agregado grueso por la arcilla cristalizada reforzado con oxido de calcio en la densidad y volumen de vacíos de mezclas asfálticas en caliente Huancayo, 2024.
- Evaluar la variación en la estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente con la sustitución del agregado grueso por la arcilla cristalizada reforzado con oxido de calcio Huancayo, 2024.
- Determinar en qué porcentaje varía la resistencia retenida en el ensayo de inmersión compresión de mezclas asfálticas en caliente con la sustitución del agregado grueso por la arcilla cristalizada reforzado con oxido de calcio Huancayo, 2024.

### **1.4. Justificación e importancia**

#### **1.4.1. Justificación práctica**

El uso del agregado grueso por la arcilla cristalizada reforzado con oxido de calcio puede ayudar a prolongar la longevidad del pavimento y minimizar la necesidad de mantenimiento y reparaciones frecuentes. Esto puede resultar en ahorros significativos para el municipio de Huancayo en términos de costos de mantenimiento y rehabilitación de carreteras.

#### **1.4.2. Justificación teórica**

La justificación teórica es de investigar el efecto de la sustitución del agregado grueso por la arcilla cristalizada reforzado con oxido de calcio en las propiedades físicas y mecánicas de mezclas bituminosas en caliente, se basa en los principios de interacción de materiales, mejora el desempeño de las propiedades, control de daños y aumento de la durabilidad del pavimento, todos estos aspectos influyen de manera significativa en el proceso de diseño y la ejecución de la carpeta de rodadura garantizando la alta durabilidad y calidad.

### **1.4.3. Justificación metodológica**

Se requerirá realizar un análisis de comparación exhaustiva entre la mezcla bituminosa convencional y las mezclas modificados de agregado grueso por la arcilla cristalizada reforzado con oxido de calcio. Esto permitirá evaluar de manera objetiva y cuantitativa de la influencia de la sustitución de estos agregados en diversas propiedades físicas y mecánicas de las mezclas bituminosas. A su vez estos procedimientos serán realizados por métodos ya conocidos en la ingeniera.

## **1.5. Delimitación de la investigación**

### **1.5.1. Delimitación espacial**

La delimitación espacial para este estudio se centraría en la ciudad de Huancayo y sus alrededores, con el objetivo de comprender el impacto del sustituto del agregado grueso por la arcilla cristalizada reforzado con oxido de calcio en sus propiedades físicas y mecánicas de las mezclas bituminosas en caliente en un contexto específico y relevante para esta área geográfica.

### **1.5.2. Delimitación temporal**

La recolección de datos y la ejecución de las pruebas en laboratorio y ensayos de campo se llevarían a cabo durante el año 2024. Esto garantiza que los datos recopilados sean relevantes y actualizados para ese año en particular.

### **1.5.3. Delimitación conceptual**

La delimitación conceptual establecería los términos y conceptos clave que serán abordados dentro del estudio, proporcionando una base sólida para la comprensión y análisis exhaustivo de los datos y resultados conseguidos respecto a la influencia del sustituto del agregado grueso por la arcilla cristalizada reforzado con oxido de calcio en las propiedades mecánicas, como físicas de mezclas asfálticas en caliente en Huancayo.

## **1.6. Hipótesis y Variables**

### **1.6.1. Hipótesis General**

La sustitución del agregado grueso por la arcilla cristalizada reforzado con oxido de calcio mejora las propiedades físicas y mecánicas de mezclas asfálticas en caliente Huancayo 2024.

### **1.6.2. Hipótesis Específicas**

- La sustitución del agregado grueso por la arcilla cristalizada reforzado con oxido de calcio resultan optimas la densidad y aumenta volumen de vacíos de la mezcla bituminosa en caliente Huancayo, 2024.
- La sustitución del agregado grueso por la arcilla cristalizada reforzado con oxido de calcio Varia la estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente Huancayo, 2024.
- La sustitución del agregado grueso por la arcilla cristalizada reforzado con oxido de calcio mejora la resistencia retenida en el ensayo de inmersión compresión de mezclas asfálticas en caliente Huancayo, 2024.

### **1.6.3. Variables**

#### **1.6.3.1. Variable Independiente**

- Agregado grueso por la arcilla cristalizada reforzado con oxido de calcio.

#### **1.6.3.2. Variables Dependientes**

- Propiedades físicas y mecánicas.

#### **1.6.3.3. Operacionalización**

- **Tema:** Efecto de la incorporación de agregados artificiales de arcilla cristalizada reforzado con oxido de calcio en las propiedades físicas y mecánicas de mezclas asfálticas en caliente Huancayo, 2024.

**Tabla 1: Operacionalización de las variables**

<b>Variables</b>	<b>Definición conceptual</b>	<b>Dimensión</b>	<b>Indicadores</b>	<b>Instrumento</b>	<b>Escala</b>
<b>VI: Agregado grueso por la arcilla cristalizada reforzado con óxido de calcio</b>	Comúnmente conocida como cal viva, es un material muy utilizado. Es un sólido blanco, cáustico y alcalino a temperatura ambiente. Como producto comercial, la cal suele contener también MgO, óxido de silicio (arena) y pequeñas cantidades de óxido de aluminio y óxido de hierro (4).	D1: Modificación de mezcla asfáltica con óxido de calcio	I1: MTC E 501: Muestra de Mezcla asfáltico	Ficha de recopilación de información	Razón
		D2: Porcentaje de adición	I2: Adición: 0%, 6%, 12%; 18% y 24%		
<b>VD: Propiedades físicas y mecánicas</b>	Se debe planificar, fabricar y ponerle una porción de concreto asfáltico a fin de conseguir las siguientes características deseables de la mezclilla: Estabilidad, Durabilidad, Flexibilidad, Resistencia, etc. (5)	D1: Densidad y volumen de vacíos	I1: ASTM 2041	Ficha de recopilación de información	Razón
		D2: Estabilidad y flujo.	I2: MTC E 504		
		D3: Inmersión compresión.	I3: MTC E 522		

*Fuente: Elaboración propia*

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Antecedentes del Problema

##### 2.1.1. Antecedentes Nacionales

Según (6) la tesis de posgrado titulada “Óxido de calcio para mejorar las propiedades físicas y mecánicas del concreto estructural” su objetivo principal fue evaluar la influencia del óxido de calcio en el mejoramiento de las propiedades mecánicas del concreto estructural. El estudio fue desarrollado siguiendo un enfoque metodológico cuantitativo, utilizando un diseño cuasiexperimental desarrollándose dentro de un marco experimental.

La metodología consistió en efectuar una serie de pruebas de laboratorio, en las cuales se incorporaron distintas cantidades de proporciones de óxido de calcio en mezclas de concreto para evaluar su resistencia a la compresión. Los resultados evidenciaron mejoras notables en propiedades relacionado con el estado fresco como el tiempo de fraguado, la trabajabilidad; así mismo en estado endurecido como la resistencia a los esfuerzos por compresión.

En cuanto a la trabajabilidad, se identificó que con una proporción del 4% de óxido de calcio fue óptimo y la más adecuada, ya que permitió alcanzar un asentamiento de 11 cm. Este mismo porcentaje también resultó ser el más eficaz para incrementar la resistencia a la compresión, alcanzando un valor de 353 kg/cm<sup>2</sup>. Por lo tanto, concluye que al añadir el 4% de óxido de calcio en mezclas de concreto resulta una relación agua/cemento de 0.43, así mismo evidencio la disminución de su tiempo necesario de su proceso de fraguado (375 minutos) que corresponden de 6 horas con 25 minutos y alcanzando una resistencia máxima a compresión de 353 kg/cm<sup>2</sup>. Para el diseño utilizó material grueso una distribución granulométrica de TMN ( ½”) 12.7 mm.

Según (7) en la tesis titulada “Estabilización usando óxido de calcio para mejorar las propiedades físicas y mecánicas en la subrasante en la carretera Talara-Lobitos, Pariñas-Talara-Piura-2022”, tuvo como objetivo principal mejorar las características mecánicas y físicas del suelo a nivel subrasante en un tramo vial especificado. El estudio fue desarrollado dentro de un enfoque cuantitativo, de tipo aplicado, con un nivel explicativo y utilizando un diseño experimental.

Para la investigación, se recolectaron muestras de cinco calicatas cada 250 metros de la carretera, sobre las cuales se efectuaron ensayos tanto en campo (in situ) como en laboratorio, incorporando óxido de calcio en proporciones del 10%, 20% y 30% sucesivamente. Entre las

pruebas realizadas en laboratorio se incluyen el ensayo de contenido de humedad, análisis de granulometría, los límites de Atterberg (Límite Líquido, Límite Plástico y Índice de Plasticidad), el ensayo Proctor modificado y prueba del CBR donde ello permitió determinar la resistencia de suelo de la vía, evaluando su capacidad para soportar cargas o esfuerzos aplicados por el tránsito.

El resultado más destacable se evidenció en el ensayo CBR, donde se registró un aumento significativo de resistencia del suelo respecto al uso de una dosis de 30% de óxido de calcio, resultado un aumento del CBR del 10.90% al 30.80% de valor de soporte alcanzando el 95% de su máxima densidad seca óptima determinada en el laboratorio. Da por concluida, que la estabilización con adición de óxido de calcio presenta un incremento considerable en las propiedades físicas y mecánicas del suelo, especialmente en términos de resistencia y soporte, reflejado en el aumento del valor del CBR.

Según (8), en el estudio titulado “Propiedades físicas y mecánicas en mezclas de asfalto en caliente incorporando fibra de vidrio, Trujillo”, tuvo como propósito principal en evaluar la incidencia de la incorporación de fibra de vidrio en las propiedades volumétricas y mecánicas de mezclas asfálticas bituminosas en caliente. La investigación se realizó empleando un enfoque cuantitativo, utilizando un diseño experimental de tipo aplicado con un nivel explicativo.

La muestra consistió en elaborar 24 briquetas en laboratorio, las cuales fueron sometidas a distintos ensayos, cada espécimen de mezcla fue elaborado con una proporción de fibra de vidrio de 3% al 6% y posteriormente evaluó las características como: % de volumen de vacíos ( $V_v$ ), densidad de la mezcla compactada, la estabilidad mecánica y la viscosidad del asfalto. Para el análisis de los resultados se implementó mediante el uso estadístico descriptiva, y la técnica utilizada fue a base de la observación empleando una ficha de observación como instrumento de recolección.

En su estudio evidenció mejoras significativas en las propiedades volumétricas de la mezcla de asfalto, al diseñar con el porcentaje óptimo del 4% de fibra de vidrio. Y resulta que la adición de fibra de vidrio en dicha proporción contribuye significativamente al cumplimiento del objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS 11): Ciudades y comunidades sostenibles. Finalmente, se destacó que los resultados obtenidos se ajustan a los estándares especificados en el MTC y la normativa AASHTO, lo que respalda la viabilidad de su aplicación práctica.

Según (9) en su tesis titulada “Propiedades mecánicas y físicas de la mezcla asfáltica en caliente al adicionarle cenizas de algas marinas, Chimbote - Áncash - 2019”, fijó como propósito

principal el análisis de la variación de las propiedades físicas y mecánicas de una mezcla asfáltica en caliente al incorporarle cenizas de algas marinas como componente de relleno mineral (filler).

El estudio fue de tipo cuasiexperimental, lo cual la población estuvo conformada por 36 muestras de briquetas, las cuales fueron diseñadas y evaluadas utilizando la metodología Marshall. Los instrumentos de medición para la determinación de datos fueron los protocolos de requerimientos normativos EG2013, así mismo se aplicó el ensayo Marshall ASTM 1559 como herramienta de análisis documental.

Tuvo como resultado que con un 5% de cemento asfáltico (C.A.) correspondiente al óptimo contenido ideal, alcanzó una estabilidad mecánica de 1880 kg, una deformación por fluencia de 3.8 milímetros y un porcentaje de espacios de vacíos de 5.17%. En contraste, con la mezcla modificada con el mismo 5% de C.A. añadidas un 10% de cenizas, resultó un porcentaje de vacíos (Va) de 4.22%, estabilidad mecánica de 1998 kg y un flujo reducido a 3 mm.

Finalmente, el autor concluye que la inclusión de cenizas de algas marinas del 5% al 10% con un patrón de 5% C.A, mejora significativamente sus propiedades mecánicas y físicas respecto a la mezcla convencional.

Según (10) en su tesis de posgrado titulada “Propiedades mecánicas de mezcla asfáltica en caliente modificado con residuos de ignimbrita para vías de alto tránsito, Arequipa 2021”, el objetivo principal fue analizar las características mecánicas de una mezcla asfáltica en caliente al reemplazar parcialmente el agregado fino por residuos de ignimbrita, específicamente aplicada para vías de alto tráfico

La investigación fue de tipo aplicada, con un enfoque cuantitativo y niveles metodológicos que abarcaron de forma descriptivo, correlacional y explicativo, dentro de un diseño experimental. Para ello se desarrolló el diseño de mezclas convencionales y modificadas bajo las especificaciones granulométricas MAC -2, las mezclas modificadas fueron incorporadas ignimbrita como reemplazo del material finos que pasan por un tamiz N°80, en proporciones de 0.5%, 1.0% y 3.0%; con ligante asfalto de grado de penetración de PEN 85-100. Las mezclas fueron evaluadas mediante los parámetros Marshall y ensayadas a tensión indirecta (TSR) con el propósito de medir la resistencia al daño inducido por el humedecimiento para niveles de tráfico pesado (ESAL 10<sup>6</sup> millones de ejes equivalentes).

Los resultados evidenciaron que con la adición de ignimbrita entre 0.5% y 1.0% tuvo un impacto positivo en las propiedades mecánicas de la mezcla. En particular, con un 0.5% de ignimbrita, se pudo observar una mejora de hasta 6.5% en la resistencia al daño ocasionada por

la humedad en comparación con la mezcla convencional. Como conclusión, el estudio establece que la incorporación del 0.5% de ignimbrita en el material del agregado fino incide positivamente en reforzamiento de las propiedades mecánicas del asfalto.

### **2.1.2. Antecedentes Internacionales**

Según (11) en el artículo científico titulado “Los efectos de la adición de nanoarcilla y nano óxido de zinc en la reología del cemento asfáltico” El análisis tiene como propósito escudriñarse en los efectos sobre la física del cemento asfáltico (AC) cuando se añaden compuestos de arcilla de tamaño Nano (NC) y de óxido de zinc (NZnO). Los componentes comprobados de NC fueron el 8, el 10 y el 12 por ciento, en tanto que los de NZnO fueron el 1, el 2 y el 3 por ciento de AC en peso.

El estudio utilizó CA con grado de penetración 60/70, y realizó diferentes pruebas tanto en el AC de control (CAC) como en el AC modificado (MAC), incluyendo reómetro oscilatorio de esfuerzo de corte dinámico (DSR), punto de reblandecimiento (SP), puntos de penetración, inflamación y fuego (FFP), reómetro de haz de prueba de flexión (BBR), y pruebas de viscosidad. Los resultados de estas pruebas demostraron que los modificadores tienden a disminuir los valores de penetración, pero aumentan los valores de FFP, viscosidad y SP.

También fue evidente una ligera mejora en las propiedades reológicas del AC a altas temperaturas mediante la adición de NC o NZnO. Además, agregar cualquiera de los modificadores condujo a mejoras significativas en condiciones de baja temperatura en el rendimiento del aire acondicionado y la resistencia al agrietamiento. Los modificadores óptimos de NC y NZnO fueron 10% y 3% en peso de AC, respectivamente.

Según (12) en su artículo científico titulado “Los efectos de la adición de nanoarcilla y nano óxido de zinc en la reología del concreto asfáltico” certificada por el ScienceDirect. Utilizó la prueba Marshall de inmersión, y el ensayo de resistencia a la tracción diametral o indirecta, la prueba de agua hirviendo, la prueba de fluencia estática, la adherencia por extracción y la prueba de ensayo llamado fractura por flexión en una muestra semicircular (SCB). Modificó El betún puro con tres contenidos de Nano óxido de zinc ZnO y Nano óxido de grafeno reducido (RGO) (0,2 %, 0,4 % y 0,6 % en peso de ligante asfáltico).

Los resultados de este trabajo indica que la adición de Nano RGO en aglutinante puro aumenta el punto de reblandecimiento y la viscosidad y disminuye las propiedades de penetración y ductilidad del betún puro. Además, la adición de Nano ZnO al betún puede aumentar la ductilidad, el punto de reblandecimiento y la viscosidad, y disminuir las propiedades de penetración del betún puro. Los resultados de las pruebas mecánicas mostraron que un aumento

en el porcentaje de Nano ZnO y RGO conduce a un aumento en la estabilidad Marshall, la durabilidad a la tracción indirecta, la tensión acumulada, la capacidad de adherencia al desprendimiento y la energía de fractura y mejora el recubrimiento bituminoso sobre agregados en mezclas Stone Mastic Asphalt (SMA). El examen de los resultados de las pruebas mostró que la prueba de fractura ITS, de arranque y de flexión semicircular (SCB) puede dar una buena estimación de la sensibilidad a la acción de la humedad de mezcla bituminosas caliente.

Según (13) en el artículo científico titulado “Óxido de calcio recubierto con una esponja de poliuretano reciclado para mejorar la resistencia al agua y a las heladas de la mezcla de asfalto a base de agua”, de la revista SSRN. En este estudio, la esponja de poliuretano (PUS) se reciclo utilizando un método mecano químico de bajo costo con CaO como agente auxiliar mientras se recubre el CaO. Luego, utilizó óxido de calcio recubierto (CaOAPUS) como relleno para aumentar el tiempo operativo y mejorar la resistencia al agua y a las heladas de la mezcla bituminosa a base de agua.

La estabilidad residual Marshall (RMS) y la relación del Índice de resistencia a la tracción diametral (TSR) de congelación descongelación aumentaron de 67,67% y 78,72% a 91,59% y 93,46%, respectivamente. La prueba del ángulo de contacto (CA) y el análisis mecánico dinámico (DMA) mostraron que el CA entre el residuo evaporado de asfalto a base de agua (ERWA) y el agua aumentó de 70° a 103,7°. Además, la temperatura de transición vítrea (Tg) disminuyó de -24,5 °C a -42,1 °C. Implica que CaOAPUS puede mejorar enormemente la operatividad, la resistencia al agua y la resistencia a las heladas de las mezclas asfálticas a base de agua.

En comparación con el CaO, CaOAPUS tiene una estructura núcleo-cubierta eficaz, que puede ralentizar en gran medida la tasa de desemulsificación del asfalto a base de agua, en referencia a las pruebas reológicas, la microscopía electrónica de barrido (SEM) y la espectroscopía fotoelectrones de rayos X ( XPS) análisis de materiales asfálticos. El hidróxido de calcio hidratada (Ca(OH)<sub>2</sub>) se produjo por la hidratación de CaO, y cuando Ca(OH)<sub>2</sub> se combina con los componentes hidrofílicos del asfalto a base de agua, genera grupos hidrofóbicos.

Los grupos hidrofóbicos con Ca<sup>2+</sup> aumentan aún más la flexibilidad del asfalto a bajas temperaturas. La resistencia frente al contacto del agua y a las heladas de la mezcla de asfalto se ve reforzada simultáneamente por la acción química del Ca<sup>2+</sup> y las características de expansión del CaO. Este trabajo ofrece un método de bajo costo para el poliuretano altamente reticulado, difícil de reciclar.

Según (14) en el artículo científico titulado “Uso de óxido de calcio como carga activa para materiales bituminosos estabilizados”, de la revista Taylor & Francis Online, Presenta que es necesario comprender el desempeño mecánico de la mezcla de reciclaje en frío para establecer el proceso de diseño en un enfoque basado en el rendimiento.

Este estudio fue diseñado para evaluar la evolución del comportamiento mecánico relacionado con la aplicación de la cal viva conocido como (óxido de calcio) como relleno activo en una mezcla de BSM; la cal viva se añadió en diferentes contenidos hasta un 5%, considerando que su reacción química con el agua puede ser muy conveniente para afrontar las limitaciones ambientales en la construcción de una capa de BSM. Además, este estudio también compara de forma cualitativa los cambios en las propiedades mecánicas cuando se utiliza cal o cemento como carga activa. Se realizaron pruebas de tensión indirecta y pruebas triaxiales monótonas en mezclas de BSM producidas con cal viva o cemento añadidos en diferentes cantidades.

Los resultados mostraron que el uso de cal viva puede aportar varias ventajas a las operaciones de reciclaje en frío, con una variación de rendimiento insignificante incluso cuando se añade en cantidades mayores. Los resultados también indicaron que las mezclas diseñadas con cemento son más susceptibles a cambios de comportamiento mecánico en comparación con las diseñadas con cal, lo que sugiere que las mezclas diseñadas con cemento necesitan un diseño de mezcla más preciso y especialmente un control de mezcla más preciso en las operaciones de campo.

Según (15) en el artículo científico titulado “El efecto de la adición de piedra caliza e hidróxido de calcio en la mezcla de hormigón asfáltico”. De la revista ResearchGate. Esta investigación se basó en conocer los efectos de la combinación agregada de piedra caliza e hidróxido de calcio sobre la mezcla asfáltica de concreto como relleno resistente a inundaciones. La mezcla asfáltica de hormigón rellena con una combinación de piedra caliza e hidróxido de calcio es una mezcla que se elabora con gradaciones de agregados no uniformes, relleno y asfalto líquido mezclados y solidificados en estado térmico. Se utilizó una mezcla de piedra caliza e hidróxido de calcio.

La mezcla asfáltica de concreto con la combinación de relleno de piedra caliza e hidróxido de calcio elaboro con asfalto óptimo 5,4%, un nivel de variación de piedra caliza (15%) e hidróxido de calcio (15%) y tres niveles de variación de rellenos (5%, 7,5% y 15%) para obtener niveles óptimos de asfalto y niveles de relleno que sean compatibles con la condición de inundación. Basado en asfalto óptimo, 5,4 % del peso total del agregado y nivel combinado de piedra caliza e hidróxido de calcio adecuado para las condiciones, 8,75 % del peso del Árido fino.

El valor característico de la mezcla de piedra caliza e hidróxido de calcio en condiciones máximas es VIM 4.55%, VMA 18.83%, estabilidad 1031.26 kg y flujo 4.93 mm, donde el valor característico cumple con las especificaciones estándar establecidas por Pekerjaan Umum Bina Marga. Del resultado se desprende que el uso de la mezcla puede disminuir el valor de estabilidad y aumentar el valor de fluidez, en comparación con asfalto y relleno con niveles normales.

## **2.2. Bases Teóricas**

### **2.2.1. Pavimento flexible**

Estas pueden describirse como pavimentos flexibles estructurada por una capa de rodadura asfáltica respaldada por capas de rigidez reducida, conformadas por agregados granulares sin tratamiento ni ligantes conformadas por capas de base, subbase afirmada. Y en ciertas situaciones, se utilizan subrasantes mejoradas o materiales de conformación, que resisten sobre el suelo de fundación o subrasante. Las tensiones provocadas por el tránsito vehicular se distribuyen a lo largo de los distintos niveles que forman la estructura de un pavimento flexible, de modo que, cuando alcanzan los esfuerzos a la subrasante, el suelo debe ser capaz de ofrecer la resistencia mecánica necesaria para resistirlo tal esfuerzo sin sufrir deformaciones. (16)

Para la preparación de la mezcla bituminosa en caliente, la gradación de los agregados debería adecuarse a gradaciones que se encuentran ligados con un ligante asfáltico correspondiente al diseño. Para concretar esta mezcla el ligante asfáltico debe estar en un estado fluido para poder mezclarse correctamente y cubrir todos los agregados pétreos. La fluidez del asfalto se logra o bien utilizándolo en forma de emulsión asfáltica o calentando el asfalto a temperaturas que fluctúan entre 130 a 170 °C, en función del tipo de asfalto. Por lo general, una mezcla debe ser durable frente a los agentes climáticos, resistencia al deslizamiento, flexibilidad, Estabilidad y compactibilidad (17 pág. 20)

### **2.2.2. Mezcla Asfáltica en caliente**

A lo largo del tiempo, se han estudiado diversos componentes de la mezcla. (18 pág. 75) buscó optimizar la gradación de agregados para mejorar la densidad del concreto, advirtiendo que un exceso de tamaños finos afecta la resistencia.

A principios de los años 80, implemento una metodología de estudio de gradación para controlar la trabajabilidad y compatibilidad de mezclas asfálticas. El Asphalt Institute introdujo puntos de control para mejorar la durabilidad. (19 pág. 35) presentaron pautas para la selección de gradación, logrando resistencia al ahuellamiento. Roque y su equipo propusieron el concepto

de rango de tamaño de agregado dominante (DASR) para diferenciar mezclas. (20 pág. 61) estudiaron el impacto de la gradación en el rendimiento asfáltico.

Se desarrolló un nuevo marco morfológico de mezcla asfáltica en el KTH Royal Institute of Technology en Suecia, basado en el principio DASR, que permite cuantificar de manera precisa los parámetros morfológicos. Este sistema ha demostrado su eficacia en materiales granulares y mezclas asfálticas, diferenciando desempeño en deformación permanente y daños por humedad. Cuantifica parámetros relacionados con la disposición de agregados y su influencia en la conectividad y rendimiento de la mezcla. (21 pág. 53)

Se denomina mezcla bituminosa en caliente a la combinación del ligante bituminoso o aglutinante con áridos (Agregados) adecuadamente gradados que incluyen el material del relleno mineral y, finalmente, modificadores de ligante como aditivos. Su proceso de producción requiere el calentamiento del asfalto y la combinación de material de agregados fino y grueso (a excepción, de forma eventual, el relleno mineral filler); a medida que va enfriando el asfalto, aumenta su rigidez (dureza) y estas recuperan sus propiedades de ligante, lo que lo convierte en un material altamente eficaz para soportar las cargas del tránsito (22 pág. 37).

Las combinaciones de asfalto se componen de cerca del 90% de agregados finos y pétreos, un porcentaje en un 5% de relleno mineral filler y el restante de 5% de contenido de asfalto como aglutinante. Los componentes señalados previamente son indispensables para un buen funcionamiento adecuado de la superficie de rodamiento, la deficiencia en la calidad en algunos de estos elementos puede afectar el conjunto; el polvo mineral y el ligante asfáltico son los componentes que tienen la mayor influencia tanto en su coste total y la calidad de la mezcla bituminosa.

#### **2.2.2.1. Método marshal**

Bruce Marshal, ingeniero de pavimentación del Departamento estatal de Autopistas de Mississippi, propuso el diseño de mezclas Marshall, quien posteriormente formó parte de la delegación de ingenieros de los Estados Unidos. Propuso el método solo válido para mezclas densas obtenidas en caliente, limitando el tamaño máximo de los agregados a 25 mm (1") con muestras de prueba de los especímenes que tienen una altura (2 ½") correspondiente a 6.4 cm y con un diámetro de 10.2 cm (4"). (23 pág. 49)

El propósito del método Marshall es encontrar la cantidad del contenido ideal del asfalto en una determinada combinación particular de agregados, además esta técnica nos ayuda a determinar la información sobre las características mecánicas y físicas de mezclas bituminosas, con fin de

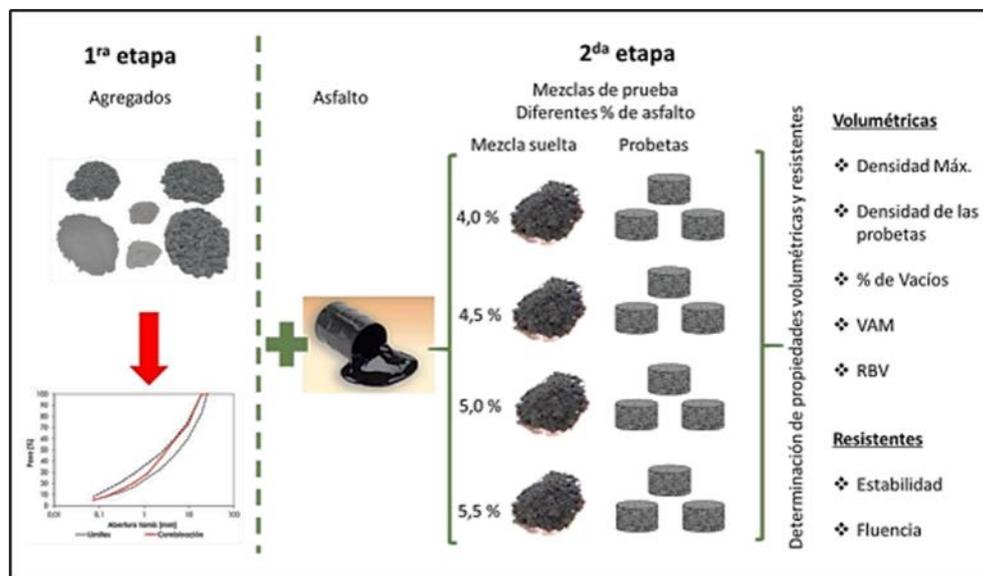
determinar si se cumplen los criterios establecidos en cuanto a la densidad y porcentajes de vacíos durante la ejecución de la capa de pavimento.

En la metodología Marshall se contemplan la ejecución de tres tipos de pruebas con la finalidad de encontrar tanto sus parámetros volumétricos y las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica compactada; determinación de análisis de vacíos y densidades; la gravedad específica, Ensayos de estabilidad estructural y la deformación (flujo).

Esto se basa en etapas de diseño, lo cual primeramente se realiza una evaluación de la distribución granulométrica resultante de los componentes (agregados) combinados y segundo establece la proporción óptimo de asfalto u ideal para cumplir estrictamente los requerimientos de pruebas volumétricos y pruebas mecánicas de resistencias especificadas (24 pág. 19).

El proceso de la mezcla es calentar y compactarlo siguiendo las indicaciones de (ASTMD1559). Estos se basan en elaborar los especímenes con diferentes proporciones de porcentajes de asfalto (4%, 4.5%, 5%, 5.5%, 6%, 6.5%), y así obteniéndose los dos aspectos principales correspondiente al análisis de vacíos y densidad de la mezcla, ensayo de estabilidad y fluencia de los especímenes(24 pág. 19).

**Figura 1: Esquema del método de dosificación Marshall.**



*Fuente: (24 pág. 20)*

### **2.2.2.2. Efecto en las propiedades físicas de la mezcla asfáltica**

El pavimento se contrae y acumula tensiones internas a medida que desciende la temperatura circundante. No tiene tiempo suficiente para relajar las tensiones, si la contracción ocurre lo suficientemente rápido al aplicar la carga, resultara en la formación de grietas en capa superficial de la pavimentación. El resultado de este tipo de grieta que comúnmente se conoce como grieta térmica podría ocurrir en cualquiera de dos mecanismos relacionados que son los siguientes: (25 pág. 58)

La causa de que la tensión se acumule rápidamente hasta un punto crítico que provoque grietas es posible cuando se produce una caída severa de la temperatura. La temperatura particular relacionada con estas tensiones críticas se denomina "temperatura crítica" y el proceso se conoce como "craqueo a baja temperatura de un solo evento".

Ciclos térmicos por encima de la temperatura crítica: las tensiones podrían acumularse debido a la contracción y expansión térmica repetidas que ocurren por encima de la temperatura crítica.

### **2.2.3. Ligante asfáltico**

El ligante asfáltico se presenta como unas sustancias de color negro, debido a su naturaleza pegajosa y su bajo precio, se utiliza como el pegamento de mayor volumen del mundo en la construcción de carreteras. En Norteamérica se le conoce como asfalto, también se le denomina cemento o pavimento asfálticos mientras que en el resto del mundo se le conoce como betún. La construcción de carreteras desempeña un papel vital en el desarrollo de proyectos de infraestructuras sostenibles para todas las economías. Los países sin caminos y autopistas se encontrarán subdesarrollados y tendrán dificultades para alcanzar un nivel de riqueza que generalmente se alcanza en el mundo desarrollado. La construcción de carreteras y autopistas ha sido una prioridad en el mundo occidental desde la época romana. Países como Estados Unidos y Canadá invierten una cantidad de dinero de para su desarrollo y mantenimiento de su sistema de transporte por carretera. La provincia de Ontario gasta aproximadamente 300 millones de dólares al año en la compra de hormigón asfáltico para la construcción, conservación y la reparación de vías y autopistas provinciales, mientras que las ciudades y municipios gastan unas cuantas veces esta cantidad en carreteras locales (26). Para minimizar los costes del asfalto, es fundamental seleccionar los materiales adecuados para garantizar un ciclo de vida optimizado del pavimento. Se prevé que la demanda de cemento asfáltico crecerá un 2 por ciento anual hasta 2013 y que alcanzará un volumen anual de poco más de cien millones de toneladas métricas en el mundo (2 pág. 27).

La palabra "asfalto" se proviene de la palabra griega "asphaltos" que indica "seguridad". De manera similar, la palabra "betún" se originó a partir de la palabra sánscrita "jatu-krit" que significa "creación de brea" (27 pág. 34). En la antigüedad, el asfalto se utilizaba como mortero entre ladrillos y piedras, para calafatear barcos y como material impermeabilizante (28 pág. 75). Se utilizó principalmente para aplicaciones adhesivas donde se deseaban propiedades impermeabilizantes. Según el Oxford English Reference Dictionary, el asfalto es definido como "una combinación similar al alquitrán de hidrocarburos derivados del petróleo de forma natural o por destilación y que se utiliza para pavimentar carreteras y techar" (27 pág. 35). Los asfaltos son definidos por la (ASTM) Sociedad Estadounidense de Pruebas Materiales. le asignan "materiales cementantes de tonalidad marrón intensa a negra en los cuales los elementos esenciales son el betún que se produce en el procesamiento del petróleo" (29). Según el American Heritage Dictionary, el asfalto se define como "una mezcla sólida o semisólida de color negro parduzco obtenida de depósitos nativos o como subproducto del petróleo, utilizada en pavimentación, techado e impermeabilización".

#### **2.2.3.1. Efecto de la oxidación sobre las propiedades físicas del asfalto**

Se han observado las diferentes sensibilidades de la viscosidad de los distintos asfaltos a la cantidad de cetonas formadas, sin duda relacionada con la dispersabilidad de los asfaltenos y con el poder dispersivo de la fracción de maltenos asfálticos. Los asfaltenos formados durante el envejecimiento oxidativo tienen efectos similares sobre las propiedades reológicas a los de los asfaltenos originalmente presentes en el asfalto, como lo demostraron (30 pág. 54). Con respecto a la asociación o agregación molecular (microestructura), es instructivo considerar más a fondo las posibles implicaciones de las correlaciones presentadas (25 pág. 36).

#### **2.2.3.2. Requerimientos de agregados gruesos para mezcla asfáltica**

##### **A. Agregados gruesos**

Están principalmente definidos por piedras, derivados por la desintegración de forma naturales o artificiales de las rocas y eventualmente por materiales que presentan características con textura superficial rugosa en estado muy angulosos o fracturado, estos agregados gruesos como gravas o piedra chancadas son materiales retenidos en el tamiz 4.74mm (N°4).

Es indispensable que los agregados gruesos deben satisfacer con los criterios establecidos y requisitos de acuerdo la tabla que se presenta enseguida. (31 pág. 560).

**Tabla 2: Requerimientos de ensayos para agregado grueso.**

Ensayos	Norma	Requerimiento	
		Altitud (m.s.n.m)	
		≤ 3.000	> 3.000
<b>Durabilidad (al Sulfato de Magnesio)</b>	MTC E 209	18% máx.	15% máx.
<b>Abrasión Los Ángeles</b>	MTC E 207	40% máx.	35% máx.
<b>Adherencia</b>	MTC E 517	+95	+95
<b>Índice de Durabilidad</b>	MTC E 214	35% mín.	35% mín.
<b>Partículas chatas y alargadas</b>	ASTM 4791	10% máx.	10% máx.
<b>Caras fracturadas</b>	MTC E 210	85/50	90/70
<b>Sales Solubles Totales</b>	MTC E 219	0,5% máx.	0,5% máx.
<b>Absorción *</b>	MTC E 206	1,0% máx.	1,0% máx.

**\* Excepcionalmente se aceptarán porcentajes mayores sólo si se aseguran las propiedades de durabilidad de la mezcla asfáltica.**

*Fuente: (31 pág. 560)*

## **B. Agregados finos**

Serán obtenidos de piedra natural finamente triturada, o también arenas naturales de granos angulosos provenientes de la fragmentación natural de rocas transportados por acción de vientos o corrientes fluviales. Se considera como agregado fino aquel material pasante por el tamiz 9.5 mm (3/8”).

Como en todos los casos, el agregado debe ser presentadas de manera limpia, que sus partículas no se encuentran impregnadas con arcilla limosa y otras sustancias perjudiciales, para que haya una buena adherencia efectiva entre el agregado y ligante de asfalto. Y estas deberán estar libre de cualquier sustancia de impurezas orgánicas.

Adicionalmente los agregados finos deben ser cumplidos con las especificaciones técnicas vigentes y parámetros establecidos en la tabla que se muestra seguidamente (31 pág. 560).

**Tabla 3: Requisitos de pruebas de ensayo para agregado fino.**

Ensayos	Norma	Requerimiento	
		Altitud (m.s.n.m)	
		≤ 3.000	> 3.000
Equivalente de Arena	MTC E 114	60	70
Angularidad del agregado fino	MTC E 222	30	40
Azul de metileno	AASTHO TP 57	8 máx	8 máx.
Índice de Plasticidad (malla N.º40)	MTC E 111	NP	NP
Durabilidad (al Sulfato de Magnesio)	MTC E 209	-	18% máx.
Índice de Durabilidad	MTC E 214	35 mín	35 mín.
Índice de Plasticidad (malla N.º 200)	MTC E 111	4 máx.	NP
Sales Solubles Totales	MTC E 219	0,5% máx.	0,5% máx.
Absorción* *	MTC E 205	0,5% máx.	0,5% máx.

\*\*Excepcionalmente se aceptarán porcentajes mayores sólo si se aseguran las propiedades de durabilidad de la mezcla asfáltica.

*Fuente: (31 pág. 560)*

### C. Relleno mineral filler

El relleno filler polvo mineral se obtiene mediante la trituración de los agregados minerales, como polvo de roca, su aporte también puede utilizarse mediante productos de uso comercial como: partículas finas de caliza, la cal hidratada, el cemento portland, u otro componente mineral no plástico, los rellenos deben presentarse secas y libres de grumos. El material deberá ajustarse a los límites granulométricos mínimos establecidos en la tabla 4.

**Tabla 4: Exigencia mínima de granulometría**

Nº DE MALLA	% pasante (EN PESO SECO)
Nº 30	(100%)
Nº 100	(95 - 100%)
Nº 200	(70 - 100%)

*Fuente: (31)*

#### D. Cemento asfáltico

En cuanto al cemento asfáltico según (31) este contenido debe constituir en el porcentaje entre el 4% a 7 % en relación de la masa total de la mezcla bituminosa, además, se seleccionará según sus características, viscosidad absoluta y por penetración que convengan para el diseño, sus características cambia según la temperatura del lugar del proyecto, para la realización del diseño de la mezcla bituminosa en nuestro estudio, se usara un cemento asfalto cuya penetración PEN comprendida entre 85 a 100, dado a que la temperatura promedio anual de la zona se encuentra alrededor de los 5 grados Celsius.

**Tabla 5: Elección del cemento asfáltico según sus características**

Temperatura Media durante todo el año			
24°C o más	(24°C a 15°C)	(15°C a 5°C)	Menos de 5°C
40-50 o		85 - 100	Asfalto
60-70 l	60 – 70	120-150	mejorado
Modificado			mediante modificación

*Fuente: (31 pág. 471)*

#### 2.2.3.3. Gradación para mezclas asfáltica – Granulometría

El método Marshall emplea una representación gráfica semilogarítmica para establecer la granulometría aceptable, donde en la dirección del eje vertical (ordenada) representa el porcentaje del material pasante de cada malla, y en eje horizontal (abscisas) se indican las aberturas de cada malla medidas en milímetros, esto representadas en escala logarítmica. (22)

La gradación de la mezcla combinada de los materiales correspondiente al agregado fino, grueso, y el relleno mineral (Filler), debería adecuarse a las gradaciones según las normativas vigentes, lo que resulta en mezclas que intenten acatar las regulaciones de la norma nacional Marshall y simultáneamente cumplir con las exigencias de las normativas internacionales de referencia en relación con los ensayos de rendimiento de los diferentes tipos de mezcla a los que se sometieron (31 pág. 561).

**Tabla 6: Gradación para mezcla asfáltica en caliente (MAC)**

Tamiz	Porcentaje que pasa		
	MAC -1	MAC-2	MAC-3
25,0 mm (1")	100		
19,0 mm (3/4")	80-100	100	
12,5 mm (1/2")	67-85	80-100	
9,5 mm (3/8")	60-77	70-88	100
4,75 mm (N° 4)	43-54	51-68	65-87
2,00 mm (N° 10)	29-45	38-52	43-61
425 µm (N° 40)	14-25	17-28	16-29
180 µm (N° 80)	8-17	8-17	Set-19
75 µm (N° 200)	4-8	4-8	5-10

*Fuente: Usos granulométricos de agregados pétreos (31 pág. 561)*

#### **2.2.4. Mezcla de agregados**

Para obtenerse contenido óptimo de ligante asfalto depende de muchos criterios, principalmente de la combinación de los agregados, donde esta combinación es el punto inicial importante para la elaboración de la mezcla bituminosa compactada. Para obtener el aglutinante óptimo de asfalto primeramente se traza los límites de vacíos de aire para el promedio de 3-5 el cual es 4% vs los porcentajes de asfalto y respecto a este porcentaje de asfalto óptimo encontrado deberán ser medidas las propiedades físicas y mecánicas, estos serán evaluadas y comparadas con las especificaciones y parámetros de diseño de mezclas de asfalto. Si se satisfacen todos los parámetros de diseño estipulados con base en lo anterior mencionados, por lo cual se obtendrá el diseño específico preliminar de la mezcla bituminosa, si estas no cumplen con los requisitos establecidos, será necesario realizar algunos ajustes, o iniciar un nuevo proceso de diseñar la mezcla (Rediseñar).

Los criterios para seleccionar una mezcla satisfactoria deben ajustarse a los criterios de diseño establecidas para mezclas de asfalto, que se muestran en la Tabla 7 y 8, el tipo de mezcla a producir se hará la selección principalmente según al tipo y volumen de tráfico y referencia al diseño proyectado (31 págs. 570-571).

**Tabla 7: Requisitos técnicos para Mezclas de Concreto Bituminoso**

Parámetro de diseño	Clase de mezcla		
	C	B	A
	Tránsito liviano	Tránsito mediano	Tránsito pesado
<b>Marshall MTC E 504</b>			
1. Compactación, número de golpes por lado	35	50	75
2. Estabilidad (Mínimo)	4.53 kN	5.44 KN	8.15 kN
3. Flujo 0.01" (0.025 mm)	8 - 20	8 - 16	8 - 14
4. Porcentaje de vacíos con aire (1) (MTC E 505)	3 - 5	3 - 5	3 - 5
5. Vacíos en el agregado mineral	ver tabla 8		
Inmersión - Compresión (MTC E 518)			
1. Resistencia a la compresión Mpa mín.	1.4	2.1	2.1
2. Resistencia retenida % (mín.)	75	75	75
Relación Polvo - Asfalto (2)	0.6 - 1.3	0.6 - 1.3	0.6 - 1.3
Relación Estabilidad/Flujo (kg/cm) (3)	4.000 - 1.7000		
Resistencia conservada en la prueba de tracción indirecta AASHTO 283	80 Mín.		

Fuente: Manual de carreteras Especificaciones técnicas generales para construcción EG-2013

**Tabla 8: Vacíos mínimos en el agregado mineral (VMA).**

Tamiz	Vacíos mínimos en el agregado mineral (VAM) %
	Marshall
2,36 mm (N°8)	21
4,75 mm (N°4)	18
9,50 mm (3/8")	16
12,5 mm (1/2")	15
19,0 mm (3/4")	14
25,0 mm (1")	13
37,5 mm (1 1/2")	12
50,0 mm (2")	11,5

Fuente: Manual de carreteras Especificaciones técnicas generales para construcción EG-

2013

### **2.2.5. Propiedades Volumétricas**

Las características volumétricas más relevantes de mezclas asfálticas compactadas para pavimento son: Espacios vacíos presentes en el agregado mineral (VMA), y el contenido de asfalto efectivo (Pbe), porcentaje de vacíos llenos de asfalto (VFA), porcentaje de Vacíos de aire en la mezcla asfáltica compactada (Va), proporcionan una estimación del comportamiento que tendrá la mezcla final durante su periodo y desempeño estructural del pavimento.

#### **2.2.5.1. Análisis de densidad y vacíos**

Son volúmenes de espacios de aire atrapado que permanecen en la mezcla de asfalto compactada. Cuando este porcentaje de vacíos de aire la mezcla sea menor, mucho menor será la permeabilidad, lo que ayuda a evitar el deterioro causado por el ingreso de agua. En ensayos de laboratorio para mezclas convencionales, se busca que los % volumen de vacíos de aire se mantengan en un rango del 3% a 5%. Pero durante la ejecución en campo se puede permitir un valor mayor, hasta un 8%. Esto se debe a que el tránsito vehicular ayudara con el tiempo a compactar la mezcla, reduciendo este porcentaje. (32).

Los resultados obtenidos a partir del análisis de densidad de la mezcla dependerán del porcentaje de contenido de vacíos; que cuando presenta menor % de vacíos, mayor será la densidad, y viceversa. Una elevada cantidad de vacíos resultará una mezcla con mayor porosidad, esto permite que el agua atraviesa a la capa de rodadura y provoca el deterioro y la aceleración de la oxidación o despegue del asfalto respecto a los agregados.

Un Bajo porcentajes de volumen de vacíos de aire también puede ser perjudicial para la mezcla, ya que, al estar expuesta a la sollicitación de cargas de tráfico, la mezcla asfáltica tenderá a comprimirse y el aglutinante asfáltico tratará de acomodarse y ocupando todos los vacíos que han sido atrapado. Cuando este % de vacíos de la mezcla compactada es muy reducido, el ligante de asfalto no podría acondicionarse en todo el interior, por lo que este tiende a salir a la hacia fuera de la superficie de la capa de rodadura. Este suceso se le conocido como la exudación.

### A. Gravedad Específica del agregado mineral Bulk (Gsb)

Es la proporción entre el peso del material medida al aire (Incluidos sus espacios impermeables y permeables del agregado) a la misma temperatura establecida al volumen del material pétreo.

$$G_{sb} = \frac{W_s}{(V_s + V_{PP})\gamma_w}$$

**Donde:**

**Vs:** Volumen del material pétreo con espacios impermeables

**Gsb:** Gravedad específica bulk del agregado

**Vpp:** Volumen de vacíos permeables

**Ws:** Peso del agregado seco

**γw:** Peso específico del agua, 1gr/cm<sup>3</sup>

La gravedad específica bulk (combinación de los agregados), también se puede determinar con la siguiente ecuación, para ello primeramente consiste en calcular su peso específico de los Áridos de forma individual, del relleno mineral filler, agregado fino y grueso. La gravedad específica estará en función de los porcentajes de peso de cada material.

$$G_{sb} = \frac{P1 + P2 \pm \dots + Pn}{\frac{P1}{G1} + \frac{P2}{G2} + \dots + \frac{Pn}{Gn}}$$

**Donde:**

**Gsb:** Gravedad específica bulk de la combinación de los agregados

**P1, P2, Pn:** Porcentajes individuales por peso del agregado

**G1, G2, Gn:** Gravedad específica bulk individual del agregado

La Gravedad específica bulk del filler mineral es difícil determinarlo actualmente. Sin embargo, si se sustituye por la gravedad específica aparente del filler, el error es mínimo.

El valor precisa de la gravedad específica del mineral filler resulta compleja en determinarlo actualmente. Por ello se puede sustituir por su gravedad específica aparente presentado un error de cálculo mínimo.

### **B. Gravedad específica efectiva del agregado, G<sub>se</sub>**

Corresponde a la proporción entre peso en el aire de un material pétreo permeable sin excluir el volumen de vacíos permeables o poros absorbentes al asfalto, en proporción al volumen del material (agregado) con los espacios vacíos o poros impermeables y volumen de vacíos permeables que no fueron absorbidos por el asfalto.

$$G_{se} = \frac{W_s}{(V_s + V_{pp} - V_{ap})\gamma_w}$$

**Donde:**

**G<sub>se</sub>:** Gravedad específica efectiva de los agregados

**W<sub>s</sub>:** Peso del material Pétreo (Agregado) seco

**V<sub>s</sub>:** Volumen del agregado con vacíos impermeables

**V<sub>pp</sub>:** Volumen de vacíos permeables

**γ<sub>w</sub>:** Peso específico del agua, 1gr/cm<sup>3</sup>

La gravedad específica efectiva específica se puede determinar desde la gravedad teórica máxima de mezclas asfálticas, este valor determinado del ensayo de RICE. Esto se halla aplicando a la ecuación.

$$G_{se} = \frac{P_{mm} - p_b}{\frac{P_{mm}}{G_{mm}} - \frac{p_b}{G_b}}$$

**Donde:**

**G<sub>se</sub>:** Gravedad específica efectiva del agregado

**P<sub>mm</sub>:** Porcentaje en peso total de la mezcla suelta, 100%

**P<sub>b</sub>:** Porcentaje del asfalto para el peso total de la muestra

**Gmm:** Gravedad específica teórica máxima (ASTM D-2041) (sin vacíos)

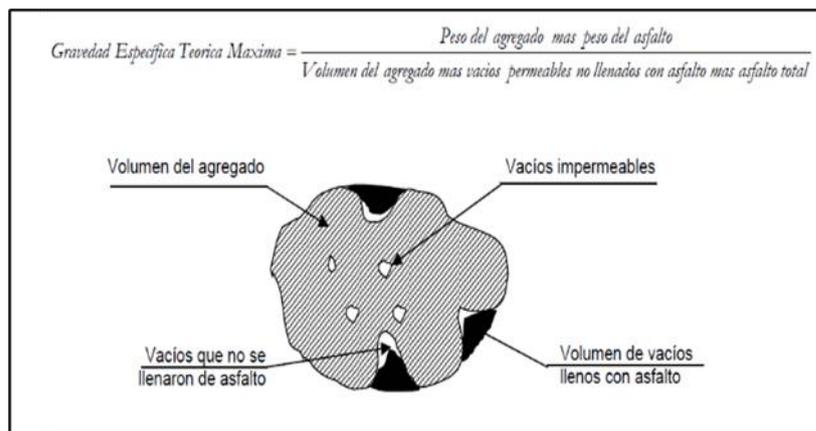
**Gb:** gravedad específica del asfalto

### C. Gravedad específica teórica máxima determinada para mezclas asfálticas con distintos porcentajes de contenido de asfalto

Es un parámetro clave para diseño de mezclas bituminosa en caliente, y esto es determinado mediante el ensayo de laboratorio y representa la densidad máxima que puede alcanzar la mezcla asfáltica considerando que no contuviera vacío o poros de aire, prácticamente es asumido que todo el aire ha sido eliminado.

Es necesario determinar la gravedad densidad teórica máxima (Gmm) para cada mezcla considerada para los diferentes porcentajes del asfalto.

**Figura 2: Gravedad específica Teórica Máxima.**



*Fuente: mezclas asfálticas (22 pág. 15)*

$$G_{mm} = \frac{P_{mm}}{\frac{P_s}{G_{se}} + \frac{P_b}{G_b}}$$

**Donde:**

**Gmm:** Gravedad específica teórica máxima

**Pmm:** Porcentaje del peso total de la mezcla suelta; 100%

**Ps:** Contenido de agregado, porcentaje en peso del total de la muestra

**Pb:** Contenido de asfalto, porcentaje en peso total de la mezcla

**Gse:** Gravedad específica efectiva del agregado

**G<sub>b</sub>**: Gravedad específica del asfalto

#### **D. Porcentaje de asfalto Absorbido, (% P<sub>ba</sub> )**

Este es el porcentaje de ligante de asfalto que es absorbida por el agregado, y es el valor de la cantidad de ligante asfáltico que penetra en los poros del agregado durante la mezcla y pruebas de compactación. Este es un dato muy indispensable porque este asfalto que fue absorbido no contribuye a recubrir toda la superficie de los agregados, no obstante, este porcentaje asfáltico no influye directamente en la resistencia ni en la adherencia entre asfalto y agregado.

La absorción de la mezcla asfáltica es expresada en porcentaje y se calcula con la siguiente fórmula.

$$p_{ba} = 100 * \frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{se} * G_{sb}} G_b$$

**Donde:**

**P<sub>ba</sub>**: Asfalto absorbido, porcentaje del peso de agregado.

**G<sub>se</sub>**: Gravedad específica efectiva del agregado.

**G<sub>b</sub>**: Gravedad específica del asfalto.

**G<sub>sb</sub>**: Gravedad específica bulk del agregado.

#### **E. Contenido de asfalto efectivo de la mezcla, P<sub>be</sub>**

Este es el porcentaje de contenido asfáltico que participa y actúa directamente en la mezcla contribuyendo a la resistencia, la cohesión y fatiga, este contenido recubre toda la superficie exterior de los agregados formando una película de asfalto. Este valor se obtiene restando el contenido del ligante asfáltico menos el porcentaje de asfalto que fue absorbida por el agregado.

$$p_{be} = P_b\% - \frac{P_{ba}\%}{100} P_s\%$$

**Donde:**

**P<sub>be</sub>**: Contenido de asfalto efectivo, porcentaje del peso total de la mezcla.

**P<sub>b</sub>**: Contenido de asfalto, porcentaje del peso total de la mezcla.

**P<sub>ba</sub>**: Asfalto absorbido, porcentaje del peso de agregado.

**Ps:** Contenido de agregado, porcentaje del peso total de la mezcla

#### **F. Porcentaje de vacíos del agregado mineral (%VMA)**

Dentro del análisis el VMA es considerada por los volúmenes que están ocupados por el aire (va) atrapado en la mezcla y asimismo incluyendo el porcentaje de asfalto efectivo. Los parámetros de diseño establecen un valor mínimo de porcentaje de VMA en función de las características como el tamaño de los áridos. Si los valores de porcentaje de VMA es baja la película de asfalto resultará muy delgada y la mezcla será más propensa a la oxidación. En cuanto se tiene altos porcentajes de VMA, la película de asfalto se vuelve de mayor grosor y la mezcla resulta más durable (33 pág. 10).

El VMA se determinada a partir del peso específico total del material (agregado fino, grueso y filler) usado para la mezcla y esta es expresada en porcentaje (%) del volumen total de la mezcla asfáltica compactada. Se definen como porcentaje de vacíos que existe entre partículas como los vacíos de aire y el porcentaje de asfalto efectivo de la mezcla compactada,

$$VMA = 100 - \frac{G_{mb} * Ps\%}{G_{sb}}$$

**Donde:**

**VMA:** Vacíos en el agregado mineral, porcentaje del volumen.

**Gsb:** Gravedad específica bulk agregado total.

**Gmb:** Gravedad específica bulk de la mezcla compactada.

**Ps:** Contenido de agregado, porcentaje del peso total de la mezcla.

### **G. Porcentaje de Vacíos de Aire en mezcla compactada**

Es el porcentaje de vacíos ( $v_a$ ) en una mezcla asfáltica compactada, lo cual corresponde el % del total de la mezcla está ocupado por aire es decir son espacios pequeños de vacíos no llenados de asfalto y vacíos de aire entre las partículas recubiertas.

$$V_{a\%} = 100 * \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}}$$

**Donde:**

**Va:** Vacíos de aire en la mezcla compactada, porcentaje del volumen total.

**Gmm:** Gravedad específica teórica máxima de la mezcla.

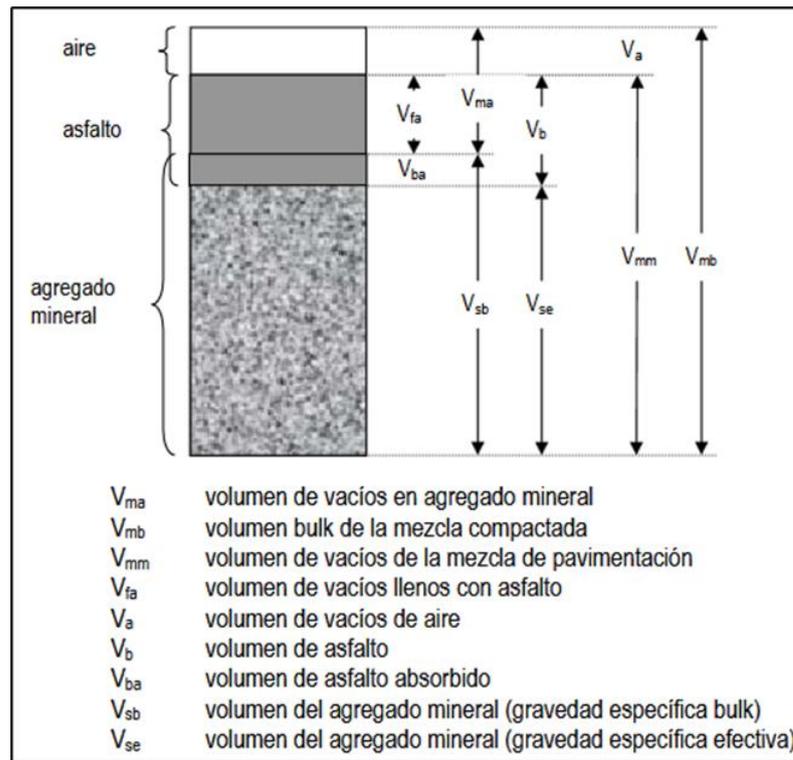
**Gmb:** Gravedad específica Bulk de la mezcla compactada.

### **H. Porcentaje vacíos llenados de asfalto VFA en mezclas asfálticas**

Son vacíos llenos con asfaltos (VFA), representa la proporción de espacios ínter granulares entre las partículas de agregado (VMA) que se encuentra llenos y cubiertas por el asfalto efectivo (pbe), no se incluyen el porcentaje de ligante que es absorbido por el agregado. El VMA está abarcado el asfalto y aire, por consiguiente, el VFA se determina restando los espacios de vacíos (VMA) del agregado mineral y posteriormente dividida por el VMA, y el valor es expresada en % (23 pág. 14).

Los valores límites máximo y mínimos de VFA se determina según los valores típicos dados por las especificaciones, lo cual está relacionado según el tipo de tráfico para el cuál será proyectado el diseño de la carpeta.

**Figura 3: Esquema de una Muestra HMA Compactada.**



Fuente: *Diseño moderno de pavimentos asfálticos* (23 pág. 14)

$$VFA\% = 100\% * \frac{(VMA\% - V_a\%)}{VMA\%}$$

**Donde:**

**VFA:** vacíos llenados con asfalto, porcentaje de VMA.

**VMA:** vacíos en el agregado mineral, porcentaje del volumen bulk.

**Va:** vacíos de aire en mezcla compactada, porcentaje del volumen total.

### **I. Análisis de peso unitario**

Para obtener el peso unitario promedio de cada probeta se calcula a través del producto del peso específico total de la mezcla por la densidad del agua 1000kg/m<sup>3</sup>

## **J. Determinación del peso Específico total**

El peso específico de la mezcla compactada es también conocido como la densidad bulk, y se determina después de compactarlas cada espécimen y se espera que se enfríen completamente a temperatura de ambiente. Este valor de peso específico es un parámetro elemental para evaluar las propiedades volumétricas como análisis de densidad de vacíos en una mezcla, cual esto influirá directamente en la evaluación de su calidad y durabilidad.

### **2.2.6. Pruebas mecánicas de Ensayos de estabilidad y fluencia**

Esta prueba mecánica de estabilidad se realiza para estimar la carga máxima y la resistencia que va a soportar mezcla asfáltica frente a la deformación generado por el tránsito. La fluencia evalúa el grado de la deformación de la briqueta, bajo la sollicitación de carga que experimenta la muestra, y se mide en 0.25mm (unidades Marshall) o expresadas en una centésima de pulgada (0.01”). Las mezclas con fluencia que contienen los valores bajos resultan ser demasiado frágiles y valores de estabilidad excesivamente altos son indicativos de una mezcla muy Rígida. Así mismo las mezclas con altos valores de fluencia son consideradas demasiadas blandas o plásticas, es decir son propensas a sufrir deformaciones fácilmente bajo las cargas repetidas del tráfico que está proyectado (23 pág. 18).

La estabilidad del espécimen de prueba corresponde al valor máximo de resistencia medida de N(Ib), se realiza sobre especímenes cilíndricos compactadas (esto va a depender del nivel de tránsito: 35, 50 o 75 golpes por cara), la probeta estándar desarrollará a una temperatura 60°C (baño de María) a un ritmo constante de 50mm/minuto hasta el instante que produzca la falla total del espécimen cilíndrico.

### **2.2.7. Ensayo de inmersión – compresión**

Este ensayo se desarrolla conforme a la Norma (ASTM D1075) y es empleada para calcular a la capacidad a compresión al ser sometidas los especímenes a la acción del agua o por daño de la humedad. Este índice de disminución de resistencia es obtenido mediante especímenes recién moldeadas y especímenes sumergidos en agua.

Esta determinación implica llevar a cabo 6 juegos de briquetas compactadas; y estas muestras son divididas en dos grupos de 3, donde el Grupo A se examinarán en compresión después de estar sumergidas en agua a una T° de 25C°; el Grupo B correspondiente a los 3 últimas briquetas serán colocadas en un baño de agua sumergidas a 60C° por 24 horas; luego estas se vuelven a sumergir a una T° de 25C° y posteriormente las muestras serán sometidas a pruebas de compresión para identificar su carga máxima a ruptura (34 pág. 20).

El cálculo de la velocidad de deformación es similar a la prueba de compresión axial sin confinamiento; la diferencia principal radica en que las probetas tienen una relación altura – diámetro diferente, en este caso de (1:1) considerando moldes y pistones de 4” de diámetro interno y una altura de 4”; por lo que se utiliza una velocidad de deformación de 5mm/m (32 pág. 31).

**Figura 4: Ensayo de inmersión compresión – Probeta después del ensayo**



*Fuente: Aspectos del diseño volumétrico de mezclas asfálticas (32 pág. 32)*

### **2.2.8. Determinación de óptimo Contenido de Asfalto**

El valor del óptimo ideal del aglutinante de asfalto asegura que la mezcla tenga resistencia, trabajabilidad adecuada y durable la mezcla asfáltica, esta va depender fundamentalmente de la granulometría del agregado y de su absorción, este porcentaje de ligante es incorporado a la mezcla, lo cual una cierta parte será absorbida por los poros del material (agregado) y el resto de porcentaje de asfalto recubrirán las partículas del agregado formando una película de asfalto esto actuando como adhesivo.

Para la identificación del contenido ideal del asfalto en el diseño (OCA) se graficarán con el contenido de asfalto analizadas en diferentes porcentajes (Pb) lo cual se ubica en el eje X, y en el eje Y: los resultados de las pruebas, de cada espécimen realizada en serie. Para entender mejor las características en particular primeramente se identifica Mediante el estudio de las gráficas y se trazan para cada prueba y respecto a ello se evalúan cuál probeta de serie cumple de forma óptima según las especificaciones para el diseño de la capa de rodadura (22 pág. 18).

- % de vacíos en la mezcla compactada (Va) vs % de asfalto.
- %de vacíos llenos de asfalto vs % de asfalto.
- Peso unitario de la mezcla compactada vs % de asfáltico.
- % de vacíos en el agregado mineral (VMA) vs % de asfalto
- Valores de estabilidad Marshall vs % de asfáltico.

- Valores de fluencia Marshall vs % de asfalto.

El óptimo contenido asfáltico es determinado a partir de los resultados de cada espécimen mediante Gráficas, en primer lugar, se traza el contenido de asfalto para el cual contenga un valor de porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica de 4%. Posteriormente para este ligante de asfalto identificado deben ser medidas y analizadas para todas las propiedades, y estos resultados deben ser comparadas con los valores establecidos de diseño; si estas cumplen con los parámetros y rangos establecidas, ese contenido asfalto será el óptimo, en caso contrario de no cumplir será necesario realizar algunos ajustes o balances o previamente rediseñar otra vez la mezcla asfáltica.

### **2.2.9. Oxido de Calcio**

La lluvia hace que la carretera asfaltada se dañe con baches. La lluvia hace que el drenaje de agua se desborde y provoca inundaciones a largo plazo. El asfalto tiene una característica anti - agua, lo que hace que sea difícil integrar el agua con su material, ya que fue elaborado a partir de petróleo y por lo tanto el agua no se puede integrar con él. Entonces, la función del asfalto como aglutinante falla mientras el agua lo humedece. Cuando el asfalto pierde su función como aglutinante, los agregados se deslizan y la carretera no puede cumplir su función. Alternativamente, los agregados se pueden reemplazar con otros materiales, lo que ayuda a unir más fuerte su sistema. Algunas de ellas conocidas como calizas. La piedra caliza es una de las mayores cantidades de piedra jamás encontrada. También se utiliza como relleno de hormigón asfáltico. Este tipo de piedra tiene muchas funciones como material de construcción, como la estabilización de cimientos de carreteras (35 pág. 36). La piedra caliza contiene  $\text{CaCO}_3$  (carbonato de calcio) que se forma en rocas y objetos refinados (forma de grano fino). La piedra caliza que se puede encontrar en la naturaleza es una piedra caliza de magnesio. Hay algunas características de la piedra caliza, que incluyen:

- Color: blanco, blanco marrón y blanco grisáceo
- Polaco: vidrio y tierra.
- Rayado: Blanco a blanco grisáceo.
- Parte dividida/campo dividido: No regular/irregular.
- Fracción: Impar/desigual. Fuerza: 2,7 – 3,4 Mohs.
- Gravedad específica: 2.387t/m<sup>3</sup>.
- Características: Duro, compacto, parcialmente espacial.
- Descripción: La escala de dureza mineral de Mohs clasifica la resistencia al golpe contra varios minerales a través de la capacidad de un material de ser duro, al raspar

los ingredientes son más indulgentes. La investigación de piedra caliza utiliza forma de grano fino y calidad No. 200.

La piedra caliza es la piedra caliza de Tohor (Óxido de Calcio, CaO) que se regó para producir calor y convertirse en cal hidratada (Hidróxido de Calcio, CaOH). Esta piedra se utiliza como aglutinante hidráulico que al mezclarlo con agua formara una pasta endurecida y no se puede volver a disolver en agua. Estas partes de mezcla, como la piedra caliza y la cal hidratada, se pueden utilizar como relleno en el hormigón asfáltico. Por lo tanto, esas funciones se pueden describir más en esta investigación. El relleno influye en el asfalto óptimo a través de la superficie de las partículas del terreno, de modo que las propiedades de la superficie modificarán las características del asfalto, por ejemplo; la penetración, la ductilidad y la resiliencia (36 pág. 85). Mientras tanto, el tipo y cantidad de masilla también influye en la calidad de su mortero o pasta. Excepto los rellenos, la adición de materiales como químicos como polímeros impactan contra las características de mezclas bituminosas (37 pág. 65).

El uso de óxido de calcio (CaO) como relleno asfáltico a base de agua puede mejorar la polaridad del asfalto, mejorar la adhesión entre el material (correspondiente al agregado) y el asfalto, la reducción de la Tg de los materiales asfálticos y mejorar la estabilidad del asfalto en agua (38 pág. 44). El CaO, un relleno alcalino, es propenso a la adsorción con grupos polares en aglutinantes asfálticos a base de agua debido a que su enlace Ca-O tiene una fuerte polaridad. Después de hidratarse, el CaO generará hidróxido de calcio en escamas (Ca(OH)<sub>2</sub>). Ca(OH)<sub>2</sub> reaccionará con grupos hidrófilos en el asfalto para fortalecer la fuerza de unión entre el asfalto y el agregado. De esta manera, es difícil que el agua forme enlaces de hidrógeno con átomos de electronegatividad en la interfaz del relleno para causar daños y puede mejorar la suavidad del asfalto en circunstancias frías. Además, la acción química del Ca<sup>2+</sup> y las características de expansión del CaO mejoran sinérgicamente la resistencia a la humedad y a las heladas el asfalto (39 pág. 36).

Sin embargo, el CaO produce un calor enorme cuando reacciona con el agua, lo que podría provocar que el asfalto a base de agua se desmasifique rápidamente. La rápida des emulsificación del asfalto también puede resultar de la importante alcalinidad del Ca(OH)<sub>2</sub> que se genera durante la hidratación del CaO (39 pág. 39). Así, se utilice la mecana química.

## **2.3. Definición de Términos Básicos**

### **2.3.1. Mezcla asfáltica**

Se trata de dos componentes esenciales: agregados y aglutinante asfáltico. Los aditivos tienen una mezcla de componentes a partir de los más gruesos hasta los más finos, normalmente se combina una porción de roca y otra de arena de diferentes magnitudes (18 pág. 35).

### **2.3.2. Propiedades de la mezcla asfáltica**

Se debe planificar, fabricar y ponerle una porción de concreto asfáltico a fin de conseguir resultados deseables de la mezclilla y estas características son las siguientes: Que tenga una buena Resistencia a deformación permanente, que se ha Durable, buena Estabilidad, que presenta Flexibilidad, etc. (18 pág. 24).

### **2.3.3. Propiedades mecánicas**

La afinidad está determinada por las características del agregado. Las características mecánicas incluyen la capacidad de absorción, la forma en que se conforman, la textura y el tamaño de sus granos, entre otras. (18 pág. 72).

### **2.3.4. Oxido de Calcio**

Comúnmente conocida como cal viva, es un material muy utilizado. Es un sólido blanco, cáustico y alcalino a temperatura ambiente. Como producto comercial, la cal suele contener también MgO, óxido de silicio (arena) y pequeñas cantidades óxido de hierro y de óxido de aluminio (4 pág. 62).

## **CAPÍTULO III**

### **METODOLOGÍA**

#### **3.1. Métodos y alcance de la investigación**

##### **3.1.1. Método de la investigación**

El método científico es un proceso metódico y sistemático diseñado para resolver problemas o preguntas científicas generando nuevos conocimientos que constituyan soluciones o respuestas a estos problemas (5 pág. 45). El estudio se basará en procesos para dar solución al problema encontrado por medio de la observación del comportamiento de las mezclas bituminosa al reemplazar el agregado tamaño de 1/2”(grueso) por la arcilla cristalizada reforzado con oxido de calcio.

##### **3.1.2. Tipo de investigación**

El tipo de investigación es aplicada, está enfocado en generar información nueva que contribuyan al avance la ciencia solucionando efectivamente el problema planteado, el cual se refiere a los efectos de del remplazo del árido grueso por la arcilla cristalizada reforzado con oxido de calcio a la mezcla bituminosa utilizada para una superficie de rodadura base en Huancayo. Los nuevos conocimientos se pueden generar de dos maneras principales. Uno de ellos consiste en ampliar los principios teóricos de una determinada ciencia, la llamada investigación pura o investigación básica. Otro enfoque pretende aplicar directamente este conocimiento para resolver problemas prácticos, lo que se denomina investigación aplicada. (5 pág. 53)

##### **3.1.3. Nivel de investigación**

La investigación explicativa comienza identificando un problema claramente definido con el objetivo de comprender y saber las relaciones de causa y efecto. En este enfoque están formulados las hipótesis básicas para explicar la causa del problema o aspectos estrechamente relacionados con él. (40 pág. 75). Este estudio tuvo como finalidad principal de analizar el efecto de la sustitución del agregado grueso por la arcilla cristalizada reforzado con oxido de calcio en las características físicas y propiedades mecánicas de mezclas bituminosas Huancayo. Esto es interpretativo debido a las consideraciones presentadas en este estudio (41 pág. 68).

### 3.1.4. Diseño de investigación

El diseño de este estudio se clasifica como diseño cuasiexperimental puesto que se utiliza cuando un diseño experimental puramente aleatorio no es posible debido a limitaciones o restricciones específicas. Como en este estudio, si bien nos permite valorar relaciones causales y evaluar el impacto de una intervención o tratamiento sobre una variable dependiente, tiene limitaciones financieras y de tiempo. El estudio fue realizado en un laboratorio certificado donde se manipuló deliberadamente una variable (por ejemplo, el betún) con fin de obtener las respuesta y resultados de las pruebas de ensayos pertinentes a la investigación (41 pág. 86).

## 3.2. Población y muestra

### 3.2.1. Población

La población considerada en esta investigación abarca briquetas de mezcla asfáltica sin modificaciones y con el reemplazo del agregado grueso por la arcilla cristalizada reforzado con oxido de calcio (0%, 6%, 12%, 18%, y 24%). Las poblaciones en estudios cuasiexperimentales se definen en función de criterios y características específicos relevantes para el estudio, y la población se selecciona en relación con los objetivos del estudio (5 pág. 66).

### 3.2.2. Muestra

En este estudio, la muestra abarcará un total de 114 briquetas (muestras compactadas) de mezclas de asfalto sin y con la sustitución del agregado grueso por la arcilla cristalizada reforzado con oxido de calcio, donde ara la correcta validación estadística se emplearán 3 muestras por cada variación y tipo de estudio en laboratorio. Una muestra es parte de una colección que contiene una representación de elementos y es un conjunto necesario para realizar una investigación (5 pág. 71).

**Tabla 9: Tamaño de muestra**

<b>MUESTRA PATRÓN</b>							
<b>C. ASFALTO</b>	4%	4.50%	5%	5.50%	6%	6.5%	
<b>E. MARSHALL</b>	3	3	3	3	3	3	
					Total	18	
<b>MUESTRA OXIDO DE CALCIO</b>							
<b>% ADICIÓN</b>			0%	6%	12%	18%	24%

<b>DENSIDAD Y VOLUMEN DE VACÍOS</b>	3	3	3	3	3
<b>ESTABILIDAD Y FLUJO</b>	3	3	3	3	3
<b>INMERSIÓN COMPRESIÓN</b>	3	3	3	3	3
				Total	45

*Fuente: Elaboración propia*

### **3.2.3. Muestreo**

La muestra de esta investigación será no probabilística. Las muestras no probabilístico o también conocido como no aleatorias, también denominadas muestras guiadas, presuponen un procedimiento de selección no oficial. Se emplean en varias investigaciones, a partir de las cuales, se pueden hacer predicciones sobre el público. (41 pág. 59).

## **3.3. Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

### **3.3.1. Técnica**

Se llama como método de estudio a la manera específica o forma de conseguir información o datos. Debido a eso se harán experimentos en el laboratorio con muestras modelo y con diferentes niveles de la sustitución del agregado grueso artificial de arcilla cristalizada reforzado con oxido de calcio, luego se harán pruebas de laboratorio para observar la conducta del mezclado asfáltico modificado en relación con los parámetros del MTC (5 pág. 53).

### **3.3.2. Instrumento de recolección de datos**

Se considera instrumento de recolección de datos o información a cualquier herramienta, equipo o formato (ya sea físico o digital) utilizada para recopilar, preservar o almacenar datos. En el análisis se usó el instrumento de recopilación de datos, por tanto, para este estudio se usó una hoja destinada al registro de datos como instrumento para ordenar y tomar nota de la información que se obtuvo de las pruebas que se hicieron en el laboratorio (5 pág. 49).

#### **3.3.2.1. Validez**

En el presente estudio se hizo la comprobación de criterio, ya que de acuerdo con Trochim y Donnelly, este hace referencia a la capacidad que tiene un instrumento de medición de predecir o estar en correlación con un criterio externo o norma ya determinada como válida (42 pág. 37).

### **3.3.2.2. Confiabilidad**

Debido a que se harán pruebas de laboratorios bajo las normativas y regulaciones técnicas del MTC aplicados al diseño y ejecución de mezclas bituminosas, con fin de analizar las características de penetración y ductilidad del ligante asfáltico, además de la norma internacional ASTM que mide la densidad y el volumen de vacíos asfáltico (43 pág. 42).

### **3.4. Procedimiento de recolección de datos**

- Toma de muestra: Se colectarán los materiales pertinentes al tema de investigación
- Modificación del ligante asfáltico: Se extraerán muestras de mezcla asfáltico y cada una de ellas serán modificadas con la sustitución del agregado grueso por la arcilla cristalizada reforzado con óxido de calcio en distintos porcentajes (0%, 6%, 12%, 18%, 24%) y serán clasificadas de acuerdo con el tipo de ensayo que serán sometida.
- Realización de los ensayos: Primeramente, se prepara la muestra para someterlos a los procedimientos correspondiente a cada tipo de ensayo, luego se tendrá en cuenta todos los implementos necesarios para realizar los ensayos pertinentes al estudio.
- Procesamiento de datos: una vez realizados los ensayos, los datos obtenidos serán procesado por medio de una hoja Excel para poder identificar y analizar el desempeño de la mezcla bituminosa con la sustitución de agregado grueso por la arcilla cristalizada reforzado con óxido de calcio. Se llevan a cabo los procedimientos para conseguir la información necesaria a partir de los análisis, con el fin de generar los resultados esperados y ser comprobados de acuerdo con la hipótesis planteada y tener las conclusiones fundadas en la presente investigación.

### **3.5. Aspectos éticos**

Este proyecto se ha dado a conocer de acuerdo con los parámetros definidos por la Universidad Continental. De esta manera se preservó la consideración, el cuidado, la seriedad, la originalidad y la ética. Las informaciones que se obtienen en el laboratorio son oficiales a través de los documentos oficiales que genera un experto en la especialidad.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. Caracterización de agregados artificiales de arcilla cristalizada

La caracterización del agregado grueso artificial elaborado a partir de arcilla con cristalización controlada, que cumpla un tamaño máximo nominal de la partícula de 1/2”(12.5mm), es fundamental en la investigación de pavimentos asfálticos. Este proceso asegura que el agregado no solo se ajuste a las especificaciones granulométricas específicos necesarios para la mezcla en caliente, sino que también posea propiedades físicas y mecánicas adecuadas para soportar las cargas y las condiciones ambientales a las que se someterá el pavimento. La cristalización controlada optimiza la estructura interna del agregado, mejorando su durabilidad, resistencia al desgaste, y adherencia al asfalto, lo que es factores claves para garantizar un pavimento de excelente desempeño y prolongada vida útil, como se presenta en siguiente figura 5.

**Figura 5: Arcilla triturada cristalizada TMZ 12.7mm – agregado grueso artificial.**



*Fuente: Producción propia arcilla cristalizada artificial*

Los ensayos de abrasión Los Ángeles, durabilidad y absorción son fundamentales para establecer la calidad, el comportamiento y rendimiento del agregado grueso artificial TMN 1/2” elaborado a partir de arcilla cristalizada en aplicaciones de pavimentos asfálticos. Estos ensayos proporcionan información esencial sobre la resistencia del agregado a factores mecánicos y ambientales, lo que influye directamente en la longevidad y desempeño del pavimento.

#### 4.1.1. Ensayo de abrasión Los Ángeles

Esta prueba evalúa la capacidad del material (Agregado grueso) para resistir al desgaste y a la abrasión bajo condiciones de carga repetida, simulando el efecto del tráfico vehicular sobre el pavimento. Para el caso del material artificial de arcilla catalizada, esta prueba de abrasión Los Ángeles es especialmente importante, ya que permite evaluar si el proceso de cristalización ha mejorado la integridad estructural del agregado. Un bajo porcentaje de desgaste indica que el agregado puede soportar mejor la acción de los vehículos sin desintegrarse, lo que reduce la formación de partículas finas que pueden comprometer la cohesión de la mezcla asfáltica y la durabilidad del pavimento, como se detalla en la tabla 10.

**Tabla 10: Pruebas de Abrasión los Ángeles– agregado artificial de arcilla cristalizada.**

ENSAYO DE RESISTENCIA ABRASIÓN LOS ÁNGELES - MTC E 207				
	UND	M1	M2	M3
<b>PESO INICIAL</b>	gramos.	5000	5000	5000
<b>PESO FINAL</b>	gramos.	2918	2832	2794
<b>DESGASTE</b>	%	41.64	43.36	44.12
<b>DESGASTE PROMEDIO</b>	%		43.04	

*Fuente: Elaboración propia con hojas de cálculo*

#### 4.1.2. Ensayo de absorción

El ensayo de prueba de absorción estima la cantidad de agua que puede mantener un material (agregado), un factor clave en la resistencia a la intemperie y la durabilidad de la capa de rodadura. Un bajo nivel de absorción es deseable en el agregado grueso de arcilla cristalizada, ya que reduce la susceptibilidad a daños por congelación y deshielo y minimiza la cantidad de agua que podría disminuir la capacidad de adhesividad entre el agregado y el cemento asfáltico. Además, una baja absorción ayuda a mantener una buena estabilidad estructural de la mezcla, previniendo la aparición de defectos como envejecimiento a corto plazo, el desprendimiento y el agrietamiento, que pueden acelerarse en presencia de humedad, presentando los resultados del agregado artificial en la siguiente tabla 11.

**Tabla 11: Ensayo de absorción – agregado grueso artificial de arcilla cristalizada.**

<b>PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN DE AGREGADOS GRUESOS - MTC E</b>				
<b>206</b>				
	<b>UND</b>	<b>M1</b>	<b>M2</b>	<b>M3</b>
<b>PESO DE MUESTRA</b>	gr.	200 0	200 0	2000
<b>(B) PESO SATURADO SUPERFICIALMENTE SECO</b>	gr.	201 2	200 5	1997
<b>PESO DE CANASTILLA</b>	gr.	917	917	917
<b>PESO SUMERGIDO + CANASTILLA</b>	gr.	212 5	209 6	2091
<b>(C) PESO SUMERGIDO</b>	gr.	120 8	117 9	1174
<b>(A) PESO DE MUESTRA SECA</b>	gr.	199 3	198 5	1978
<b>PESO ESPECÍFICO DE MASA SECA</b>	gr./c m <sup>3</sup>	2.47 9	2.40 3	2.403
<b>PESO ESPECÍFICO DE MASA SATURADA CON SUPERFICIE SECA</b>	gr./c m <sup>3</sup>	2.50 2	2.42 7	2.426
<b>PESO ESPECÍFICO APARENTE</b>	gr./c m <sup>3</sup>	2.53 9	2.46 3	2.460
<b>ABSORCIÓN DE AGUA</b>	%	0.95	1.01	0.96
<b>ABSORCIÓN DE AGUA PROMEDIO</b>	%		0.97	

*Fuente: Elaboración propia con hojas de cálculo*

#### **4.1.3. Ensayo de durabilidad**

El ensayo de durabilidad en los agregados se centra en medir la resistencia frente al deterioro o a la desintegración, a los ciclos de humedecimiento y secado, o congelación y deshielo, que son representativos de las condiciones ambientales adversas que pueden ocurrir en diferentes climas. La durabilidad del agregado grueso de arcilla cristalizada es crítica para asegurar que el pavimento conserve su integridad estructural con el paso del tiempo, incluso cuando está expuesto a fluctuaciones extremas de temperatura y humedad. Un agregado con alta durabilidad es menos propenso a sufrir degradación, lo que se da una necesidad reducida al mantenimiento y una vida útil más prolongada del pavimento, presentando los resultados del agregado artificial dado la siguiente tabla 12.

Tabla 12: Ensayo de durabilidad – agregado grueso artificial de arcilla cristalizada

DURABILIDAD AL SULFATO DE MAGNESIO - MTC E 209								
	TAMIZ PASANTE	TAMIZ RETENIDO	PESO INICIAL	GRADACIÓN INICIAL	PESO DE FRACCIÓN	PESO RETENIDO TRAS ENSAYO	PÉRDIDA TOTAL	PÉRDIDAS CORREGIDAS
UND	(")	(")	(gr.)	(%)	(gr.)	(gr.)	(%)	(%)
MUESTRA 1	1	3/4	155	1.55				
	3/4	1/2	4272	42.72	912	822	9.87	4.22
	1/2	3/8	2113	21.13	475	339	28.63	6.05
	3/8	#4	3460	34.60	546	428	21.61	7.48
				<b>10000</b>				
MUESTRA 2	1	3/4	155	1.55				
	3/4	1/2	4272	42.72	925	826	10.70	4.57
	1/2	3/8	2113	21.13	452	321	28.98	6.12
	3/8	#4	3460	34.60	557	464	16.70	5.78
				<b>10000</b>				
MUESTRA 3	1	3/4	155	1.55				
	3/4	1/2	4272	42.72	936	839	10.36	4.43
	1/2	3/8	2113	21.13	489	349	28.63	6.05
	3/8	#4	3460	34.60	532	425	20.11	6.96
				<b>10000</b>				

Fuente: Elaboración propia con hojas de cálculo

Estos ensayos proporcionan una evaluación integral del comportamiento del agregado grueso artificial de arcilla cristalizada bajo condiciones de uso realistas. Al asegurar que el agregado cumple con los estándares de resistencia al desgaste, durabilidad y baja absorción, se contribuye significativamente a la construcción de pavimentos asfálticos más resistentes, duraderos y de alto rendimiento, adaptados ajustes a las exigencias y demandas del tránsito y las diferentes condiciones climáticas. Se presenta en la siguiente tabla 13 las propiedades resumen del agregado artificial.

**Tabla 13: Caracterización resumen – agregado grueso artificial de arcilla cristalizada**

<b>CARACTERIZACIÓN DE AGREGADO GRUESO</b>						
<b>ENSAYO</b>	<b>NORMA</b>	<b>REQUERIMIENTO</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>RESULTADO PROMEDIO</b>	<b>OBSERVACIÓN</b>
<b>PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN</b>	MTCE 206	1% máx.	%	0.95	0.97	CUMPLE
			%	1.01		
			%	0.96		
<b>ABRASIÓN LOS ANGELES (L.A.) AL DESGASTE</b>	MTCE 207	35% máx.	%	41.64	43.04	NO CUMPLE
			%	43.36		
			%	44.12		
<b>DURABILIDAD AL SULFATO DE SODIO Y SULFATO DE MAGNESIO</b>	MTC E 209	15% máx.	%	17.74	17.22	NO CUMPLE
			%	16.47		
			%	17.44		

*Fuente: Elaboración propia con hojas de cálculo*

## 4.2. Diseño Marshall – Caracterización granulométrica materiales

El ensayo de análisis granulométrico es una herramienta esencial en la caracterización de los materiales utilizados en el diseño de mezclas bituminosas, especialmente conforme el método Marshall, como es el caso del diseño de mezcla tipo MAC 2. Este análisis nos permite conocer la distribución granulométrica de las partículas del agregado, lo cual es fundamental para garantizar que la mezcla presenta las propiedades deseadas de estabilidad, durabilidad, y trabajabilidad. La importancia de este ensayo se destaca al considerar los diferentes materiales involucrados.

### 4.2.1. Granulometría de agregado grueso artificial cristalizado – Tamaño ½”

El agregado artificial de arcilla cristalizada, producido con dimensión máximo nominal de media pulgada 1/2" (12.7 mm), actúa como el componente grueso de la mezcla asfáltica. Su granulometría es crítica para garantizar que el agregado proporcione una estructura esquelética fuerte, capaz de soportar y resistir las cargas del paso tránsito sin presentar deformaciones. El análisis granulométrico asegura que las partículas del agregado grueso estén distribuidas de manera que se maximice el entrelazamiento y el contacto entre partículas, lo cual es esencial para la estabilidad y la capacidad de carga del pavimento. Además, una granulometría adecuada minimiza la formación de vacíos en la mezcla, lo que reduce la permeabilidad y la susceptibilidad al daño por agua. Presentando en la siguiente tabla 14 los resultados del análisis granulométrico realizado al agregado artificial de arcilla cristalizada.

**Tabla 14: Ensayo granulométrico – Agregado grueso artificial de arcilla cristalizada ½”**

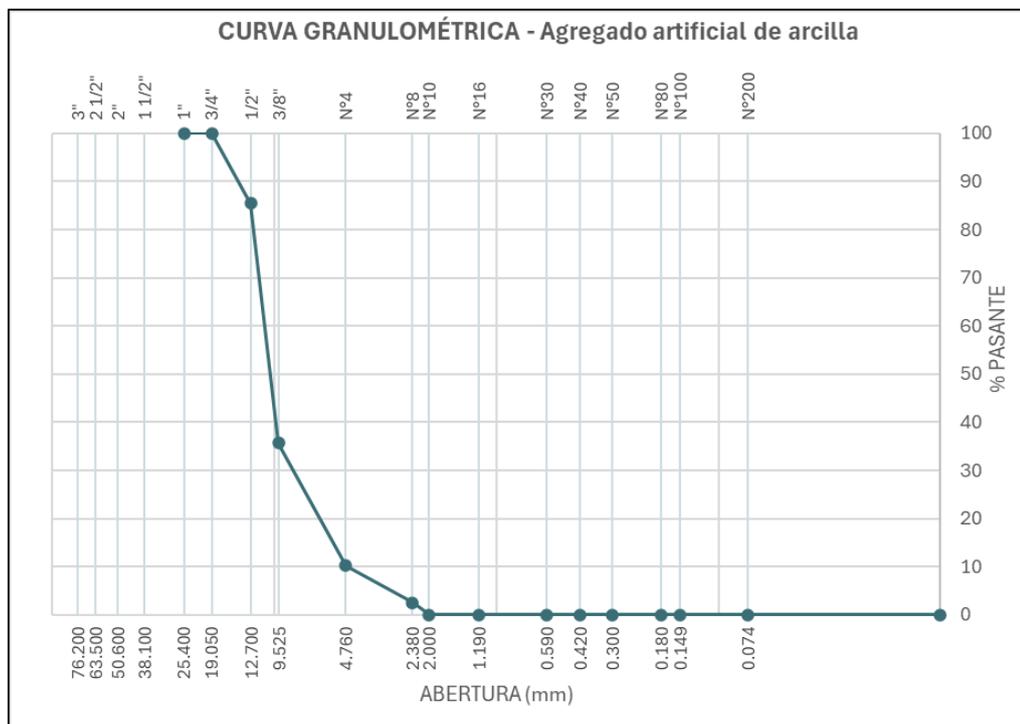
ENSAYO GRANULOMÉTRICO DEL AGREGADO GRUESO				
Agregado artificial de arcilla				
N° Tamiz	Peso retenido (gr)	Retenido (%)	Acumulado (%)	Pasante (%)
1"	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2"	436.50	14.55	14.55	85.45
3/8"	1494.90	49.83	64.38	35.62
N°4	761.40	25.38	89.76	10.24
N°8	232.20	7.74	97.50	2.50
N°10	75.00	2.50	100.00	0.00
N°16	0.00	0.00	100.00	0.00
N°30	0.00	0.00	100.00	0.00
N°40	0.00	0.00	100.00	0.00

N°50	0.00	0.00	100.00	0.00
N°80	0.00	0.00	100.00	0.00
N°100	0.00	0.00	100.00	0.00
N°200	0.00	0.00	100.00	0.00
Fondo	0.00	0.00	100.00	0.00
SUMA	3000.00	100.00		

*Fuente: Elaborado propia con hojas de cálculo*

El comportamiento gráfico del agregado grueso artificial elaborado a partir de arcilla cristalizada presentó la siguiente curva generada en la figura 6, donde se aprecia un porcentaje reducido de material que pasa en particulares más finos.

**Figura 6: Curva granulométrica – Agregado grueso artificial de arcilla cristalizada ½”**



*Fuente: Elaboración propia con hojas de cálculo*

#### 4.2.2. Granulometría de agregado fino natural – Tamaño N°4

La arena natural, con clasificada de tamaño nominal TMN N°4 (4.75 mm), contribuye de manera clave como parte de la fracción fina en la mezcla asfáltica. El análisis granulométrico de la arena natural es importante para asegurar que su distribución de partículas se ajuste a los requerimientos establecidos por la metodología Marshall. Una distribución adecuada permite una mejor compactación de la mezcla, optimiza la adherencia entre el asfalto y las partículas del agregado, y contribuye a un balance adecuado entre la rigidez y la flexibilidad del pavimento. Además, una correcta granulometría en la arena natural previene problemas como la segregación de materiales durante la mezcla y la colocación. Los resultados obtenidos del análisis de granulometría realizado al agregado fino natural, se detalla en la tabla 15 que se presenta a continuación.

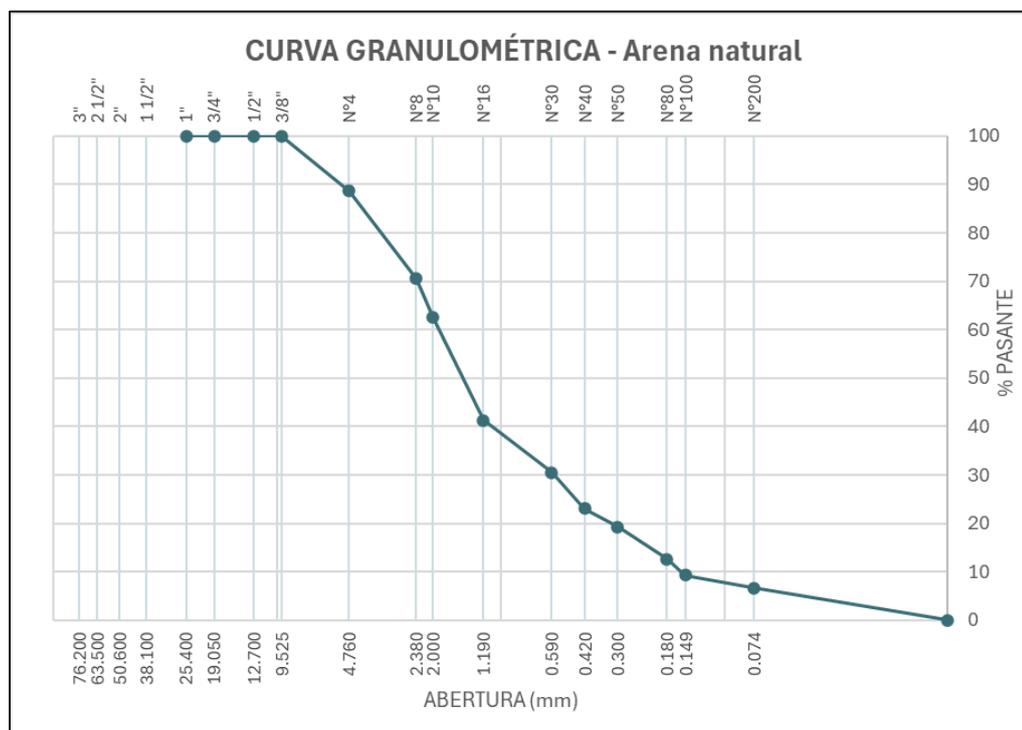
**Tabla 15: Ensayo granulométrico – Agregado fino natural N°4**

<b>ENSAYO GRANULOMÉTRICO DEL AGREGADO FINO - Arena natural</b>				
<b>N° Tamiz</b>	<b>Peso retenido</b>	<b>Retenido</b>	<b>Acumulado</b>	<b>Pasante</b>
	<b>(gr)</b>	<b>(%)</b>	<b>(%)</b>	<b>(%)</b>
1"	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2"	0.00	0.00	0.00	100.00
3/8"	0.00	0.00	0.00	100.00
N°4	170.25	11.35	11.35	88.65
N°8	271.20	18.08	29.43	70.57
N°10	120.60	8.04	37.47	62.53
N°16	319.35	21.29	58.76	41.24
N°30	161.25	10.75	69.51	30.49
N°40	111.15	7.41	76.92	23.08
N°50	57.75	3.85	80.77	19.23
N°80	99.60	6.64	87.41	12.59
N°100	50.10	3.34	90.75	9.25
N°200	39.60	2.64	93.39	6.61
Fondo	99.15	6.61	100.00	0.00
SUMA	1500.00	100.00		

*Fuente: Elaboración propia con hojas de cálculo*

Se pudo observar la distribución granulométrica mediante gráfico del agregado fino natural y se presentó la siguiente curva generada en la figura 7, donde se observa que el agregado tiene una composición balanceada en su contenido inter particular.

**Figura 7: Curva granulométrica – Agregado fino natural N°4**



*Fuente: Elaboración propia con hojas de cálculo*

#### **4.2.3. Granulometría de agregado fino triturado – Tamaño N°4**

La arena triturada, también seleccionada con un tamaño máximo nominal TMN N°4, se añade a la mezcla de asfalto para mejorar la textura y la resistencia mecánica del pavimento. A diferencia de la arena natural, que suele tener partículas más redondeadas, la arena triturada posee partículas angulares que contribuyen a un mayor entrelazamiento entre los agregados, lo que incrementa la estabilidad de la mezcla. El análisis granulométrico de la arena triturada es esencial para asegurar que su distribución de partículas complemente adecuadamente la arena natural y el agregado grueso, evitando la formación de huecos excesivos o una densidad insuficiente en la mezcla, lo que podría comprometer su durabilidad y resistencia a la deformación.

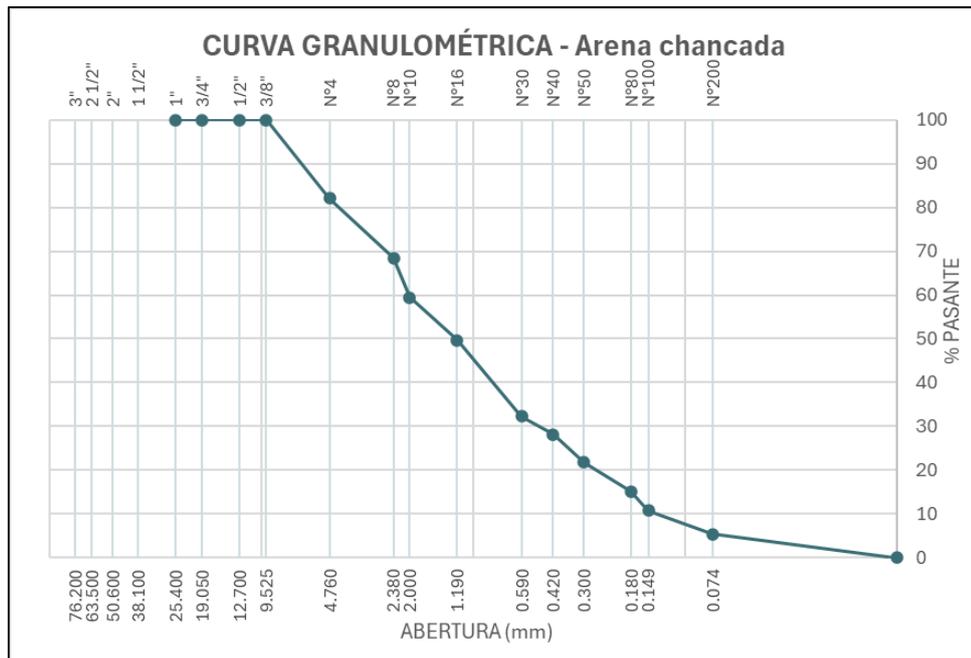
**Tabla 16: Ensayo granulométrico – Agregado fino triturado N°4**

<b>ENSAYO GRANULOMÉTRICO DEL AGREGADO FINO - Arena chancada</b>				
<b>N° Tamiz</b>	<b>Peso retenido</b>	<b>Retenido</b>	<b>Acumulado</b>	<b>Pasante</b>
	<b>(gr)</b>	<b>(%)</b>	<b>(%)</b>	<b>(%)</b>
1"	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2"	0.00	0.00	0.00	100.00
3/8"	0.00	0.00	0.00	100.00
N°4	268.20	17.88	17.88	82.12
N°8	204.60	13.64	31.52	68.48
N°10	135.60	9.04	40.56	59.44
N°16	145.80	9.72	50.28	49.72
N°30	262.35	17.49	67.77	32.23
N°40	61.20	4.08	71.85	28.15
N°50	94.80	6.32	78.17	21.83
N°80	99.30	6.62	84.79	15.21
N°100	66.90	4.46	89.25	10.75
N°200	79.65	5.31	94.56	5.44
Fondo	81.60	5.44	100.00	0.00
SUMA	1500.00	100.00		

*Fuente: Elaboración propia con hojas de cálculo Excel*

La distribución en forma de gráfico del agregado fino triturado presento la siguiente curva generada en la figura 8, donde se observa que el agregado tiene una composición balaceada en su contenido inter particular.

**Figura 8: Curva granulométrica – Agregado fino árido triturado N°4**



*Fuente: Elaborada propia con hojas de cálculo*

#### 4.2.4. Granulometría del filler Cal hidratada – Tamaño N°200

El filler, como la cal hidratada, es un polvo fino que se utiliza para llenar los vacíos entre las partículas más grandes de la combinación de los Áridos, mejorando la densidad y cohesión interna de la mezcla bituminosa. A pesar de su bajo porcentaje en la mezcla, su influencia es significativa. El análisis granulométrico garantiza que el filler tenga la finura adecuada, permitiendo que se disperse de manera uniforme en la mezcla y se integre eficientemente con el asfalto, formando una matriz densa y resistente. Esto es esencial para lograr una mezcla que no solo tenga una alta estabilidad, sino también una durabilidad prolongada, reduciendo la susceptibilidad a la deformación bajo cargas repetidas.

**Tabla 17: Ensayo granulométrico – Filler Cal hidratada N°200.**

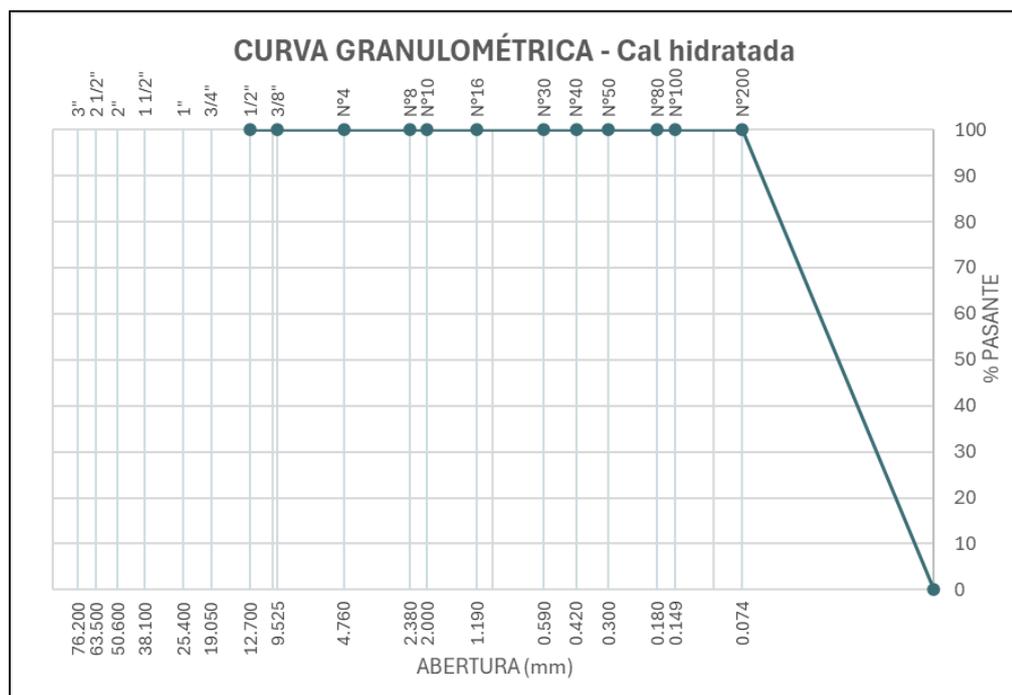
ENSAYO GRANULOMÉTRICO DEL FILLER - Cal hidratada				
N° Tamiz	Peso retenido (gr)	Retenido (%)	Acumulado (%)	Pasante (%)
N°100	0.00	0.00	0.00	100.00
N°200	0.00	0.00	0.00	100.00
Fondo	250.00	100.00	100.00	0.00
SUMA	250.00	100.00		

*Fuente: Elaboración propia con hojas de cálculo*

El comportamiento gráfico del filler se presentó la siguiente curva generada en la figura 9. El ensayo por tamizado granulométrico para el material filler de cal hidratada con tamaño máximo nominal N°200 es un proceso vital en el diseño de mezclas asfálticas bajo la metodología Marshall, tipo MAC 2. Este análisis no solo asegura que el filler contribuya de manera efectiva a la cohesión, estabilidad y durabilidad de la mezcla, sino que también permite optimizar la trabajabilidad y compactación durante su aplicación.

La cal hidratada, cuando es adecuadamente granulada y finamente distribuida, actúa como un componente que mejora la cohesión interna de la mezcla de asfalto. Un análisis granulométrico detallado permite asegurar que el filler esté compuesto por partículas suficientemente finas para rellenar los intersticios entre los agregados, mejorando así la densidad y disminuyendo la cantidad de porcentaje de vacíos en la mezcla. Este aumento en la cohesión interna se traduce en una mezcla más estable, capaz de resistir mejor las deformaciones permanentes, como el ahuellamiento, que son comunes en pavimentos sometidos a cargas pesadas y tráfico intenso.

**Figura 9: Curva granulométrica – Filler Cal hidratada N°200.**



*Fuente: Elaboración propia con hojas de cálculo*

### 4.3. Diseño Marshall – Combinación de agregados MAC/02

En el diseño de mezclas bituminosa utilizando en enfoque Marshall, la correcta selección y mezcla de agregados, así como la determinación de la curva granulométrica ideal, son aspectos fundamentales que inciden directamente en la característica y propiedad final de la carpeta bituminosa, como su estabilidad, durabilidad y resistencia a la Abrasión. Para una mezcla tipo

MAC 2, que se utiliza en pavimentos que requieren alta resistencia y durabilidad, estos elementos adquieren una importancia crucial.

La mezcla de agregados en unas mezclas bituminosas no consiste solo en combinar los áridos de materiales (fino, grueso y filler) de diferentes tamaños; sino que es un proceso detallado y cuidadosamente controlado que busca optimizar la distribución de partículas para cumplir con los objetivos de desempeño específicos del pavimento. En el diseño MAC 2, se utilizan diferentes clases de agregados, como la arena de origen natural, arena procesada por trituración, y agregados gruesos, cada uno de los componentes influyen en las características y en su comportamiento mecánico de la mezcla final. La correcta proporción y selección de estos Áridos es importante para garantizar que el diseño asfáltico debe ser suficientemente resistente para soportar la deformación permanente y la durabilidad necesaria para resistir el tráfico intenso y las condiciones del medio ambiente, que se detalla en la siguiente tabla 18.

**Tabla 18: Mezcla de agregados teórico – Combinación granular.**

<b>Mezcla teórica de agregados para asfalto</b>					
<b>Diseño:</b>		<b>MAC-2</b>			
<b>Fecha:</b>					
<b>Material:</b>		<b>Mezcla teórica de agregados para asfalto</b>			
<b>Cantera:</b>		<b>PILCOMAYO</b>			
<b>Tamiz</b>		<b>PIEDRAS</b>		<b>ARENAS</b>	
<b>pulg.</b>	<b>mm</b>	<b>Agregado grueso de Arcilla</b>	<b>Arena natural</b>	<b>Arena chancada</b>	<b>Cal hidratada</b>
<b>Porcentajes</b>		<b>ARCILLA</b>	<b>NATURAL</b>	<b>CHANCADA</b>	<b>FILLER</b>
		33.0%	31.0%	35.0%	1.0%
1"	25.405	100.00	100.00	100.00	100.00
3/4"	19.055	100.00	100.00	100.00	100.00
1/2"	12.700	85.45	100.00	100.00	100.00
3/8"	9.525	35.62	100.00	100.00	100.00
N°4	4.750	10.24	88.65	82.12	100.00
N°8	2.550	2.50	70.57	68.48	100.00
N°10	2.000	0.00	62.53	59.44	100.00
N°16	1.185	0.00	41.24	49.72	100.00
N°30	0.600	0.00	30.49	32.23	100.00
N°40	0.425	0.00	23.08	28.15	100.00

N°50	0.295	0.00	19.23	21.83	100.00
N°80	0.175	0.00	12.59	15.21	100.00
N°100	0.148	0.00	9.25	10.75	100.00
N°200	0.072	0.00	6.61	5.44	100.00
<N°200	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00

*Fuente: Elaboración propia con hojas de cálculo*

La mezcla de agregados y la curva granulométrica deben cumplir con las normativas y especificaciones establecidas para garantizar la calidad del pavimento. Estas normativas aseguran que la mezcla bituminosa tendrá las características requeridas para la resistencia de las condiciones de servicio previstas, como la carga del tráfico, las variaciones climáticas y el desgaste por abrasión. En un diseño MAC 2, cumplir con estos requisitos es primordial para garantizar la longevidad del pavimento y su capacidad para mantener un rendimiento adecuado durante toda su vida útil. La curva granulométrica ideal permite predecir cómo se comportará la mezcla en condiciones reales, lo que facilita el diseño de pavimentos que no solo cumplen con las especificaciones, sino que también exceden las expectativas en términos de durabilidad y resistencia por lo que se propone en la tabla 19 los resultados en combinación granular.

**Tabla 19: Mezcla de agregados teórico – Porcentajes resultantes en mezcla.**

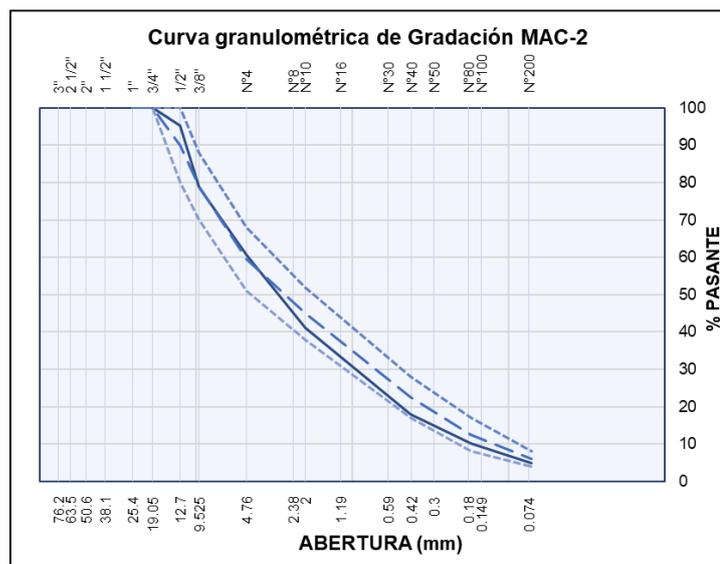
<b>Mezcla teórica de agregados para asfalto</b>						
<b>Diseño]:</b>		<b>MAC-2</b>				
<b>Fecha:</b>						
<b>Material:</b>		<b>Mezcla teórica de agregados para asfalto</b>				
<b>Cantera:</b>		<b>PILCOMAYO</b>				
<b>Tamiz</b>		<b>MEZCLA</b>	<b>Especificaciones para</b>			<b>Tamaño</b>
<b>pulg.</b>	<b>mm</b>		<b>MAC - 2</b>		<b>máximo</b>	
			<b>MTC</b>		<b>1/2"</b>	
	<b>Porcentajes</b>	<b>100.0%</b>	<b>Lím. Inf.</b>	<b>Lím. Sup.</b>	<b>Curva ideal</b>	
1"	25.405	100.00	100	-	100	100
3/4"	19.055	100.00	100	-	100	100
1/2"	12.700	95.20	80	-	100	90
3/8"	9.525	78.75	70	-	88	79
N°4	4.750	60.60	51	-	68	60

N°8	2.550	47.67				
N°10	2.000	41.19	38	-	52	45
N°16	1.185	31.19				
N°30	0.600	21.73				
N°40	0.425	18.01	17	-	28	23
N°50	0.295	14.60				
N°80	0.175	10.23	8	-	17	13
N°100	0.148	7.63				
N°200	0.072	4.95	4	-	8	6
<N°200	0.01	0.00				

*Fuente: Elaboración propia con hojas de cálculo*

La mezcla de agregados en una mezcla bituminosa no es simplemente una mezcla de áridos de diferentes tamaños (agregado grueso, fino y filler); es un proceso cuidadosamente controlado que busca optimizar la distribución de partículas para cumplir con los objetivos de desempeño específicos del pavimento, como se presenta en la siguiente figura 10. En el diseño MAC 2, se utilizan diferentes tipos de agregados, como arena natural, arena triturada, y agregados gruesos, cada uno con características que contribuyen directamente las características mecánicas de la mezcla final. La correcta proporción y selección de estos materiales(áridos) es esencial para garantizar que la mezcla de asfalto en caliente sea suficientemente resistente para soportar las cargas del el tránsito y la durabilidad necesaria frente las condiciones ambientales desfavorables.

**Figura 10: Curva combinación granulométrica – MAC/02.**



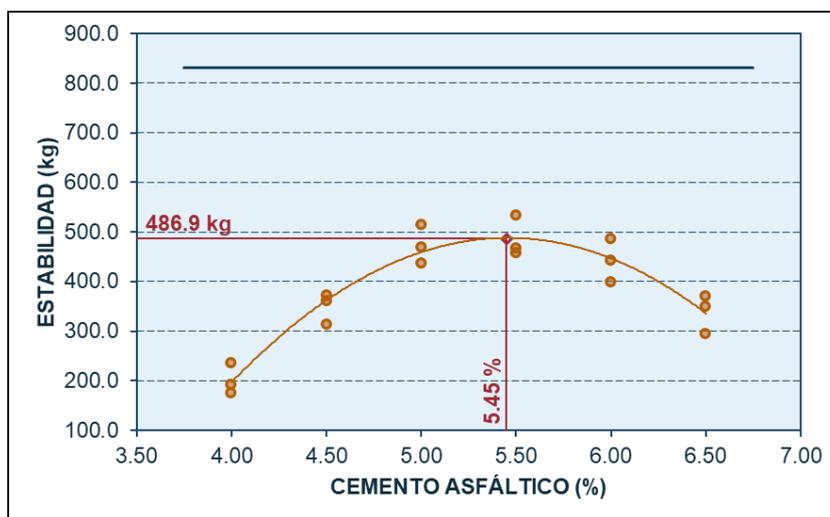
*Fuente: Elaboración propia con hojas de cálculo*

#### 4.4. Diseño Marshall – Propiedades óptimo contenido asfáltico

En el diseño de mezclas bituminosas basados en el método Marshall, la determinación del óptimo contenido de aglutinante asfáltico es un paso crucial que afecta o varía directamente las propiedades volumétricas y mecánicas del pavimento. En este estudio se ha determinado el OCA de diseño según establecidas para el tipo MAC -2, este contenido óptimo de asfalto del 5.45% ha sido identificado como el que mejor equilibra los requisitos de calidad las propiedades volumétricas y mecánicas: estabilidad, fluencia (flujo), porcentaje de volumen de vacíos de  $V_a$ , VMA (porcentaje de Vacíos en el Agregado Mineral), VLLA (Vacíos llenados de cemento asfáltico), y peso unitario. Este valor es crítico porque logra satisfacer los criterios técnicos necesarios para un desempeño adecuado del pavimento, especialmente en aplicaciones de tráfico medio, asegurando durabilidad y resistencia a lo largo del tiempo.

La estabilidad es una de las características mecánicas más relevante en una mezcla de asfalto, ya que determina la capacidad estructural de la carpeta de rodadura para resistir y las deformaciones permanentes o plásticas bajo cargas repetidas de los vehículos. El óptimo contenido de aglutinante asfáltico OCA 5.45% se ha determinado como ideal para maximizar la estabilidad bajo los requerimientos de diseño MAC.2, como se detalla en la siguiente figura 11.

**Figura 11: Estabilidad diseño mezcla patrón – Óptimo contenido asfáltico.**

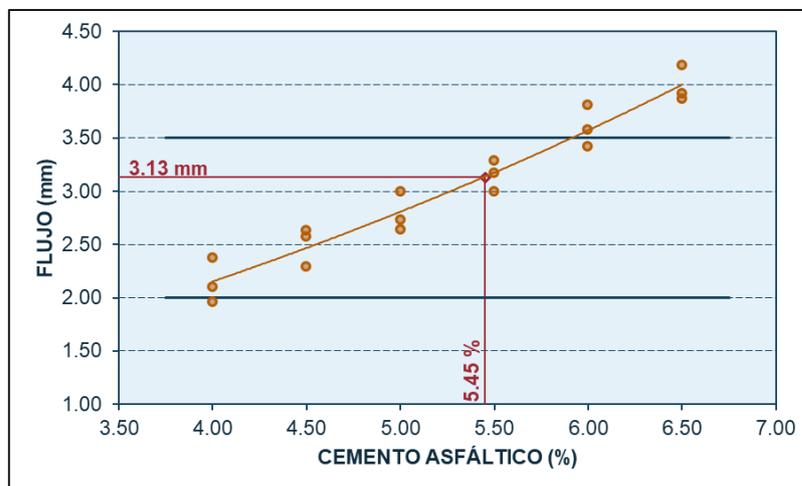


*Fuente: Elaboración propia con hojas de cálculo*

El flujo en la metodología Marshall hace referencia a la deformación experimentada por la muestra (briqueta) antes de alcanzar el punto de falla, lo cual está relacionado con la flexibilidad de la mezcla asfáltica. Un contenido óptimo de asfalto del 5.45% proporciona un equilibrio

adecuado entre rigidez y flexibilidad. Esto es crucial para el diseño de tipo (MAC- 2), se muestra en la siguiente figura 12.

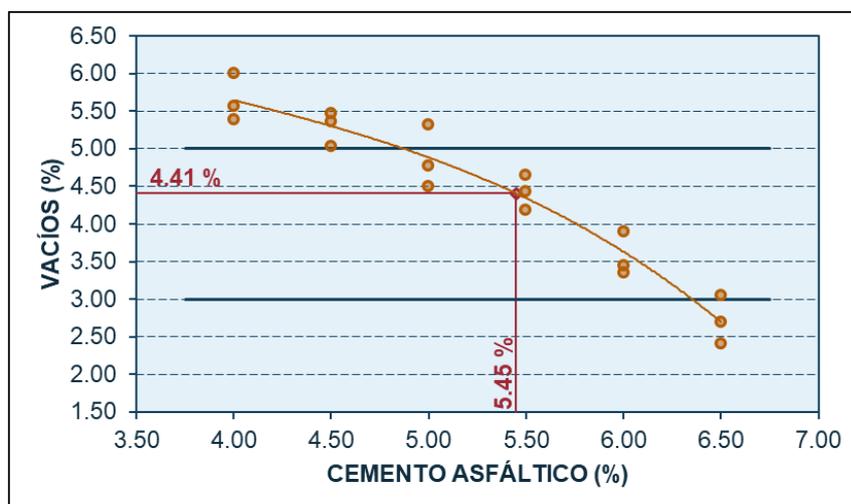
**Figura 12: Flujo diseño mezcla patrón – Óptimo contenido asfáltico.**



*Fuente: Elaboración propia con hojas de cálculo*

Los vacíos ( $V_a\%$ ) en la mezcla bituminosa compactada es un indicador de la compactad y la durabilidad del pavimento. Con un contenido de ligante asfáltico del 5.45%, se logra un % de vacíos óptimo que garantiza suficiente espacio para la expansión térmica y la penetración de asfalto en los agregados, sin dejar demasiados vacíos que podrían comprometer la resistencia del pavimento. Este equilibrio es esencial para prevenir problemas como la oxidación prematura del asfalto y la infiltración de agua, ambos factores que podrían reducir el período de uso de la pavimentación, como se presenta en la siguiente figura 13.

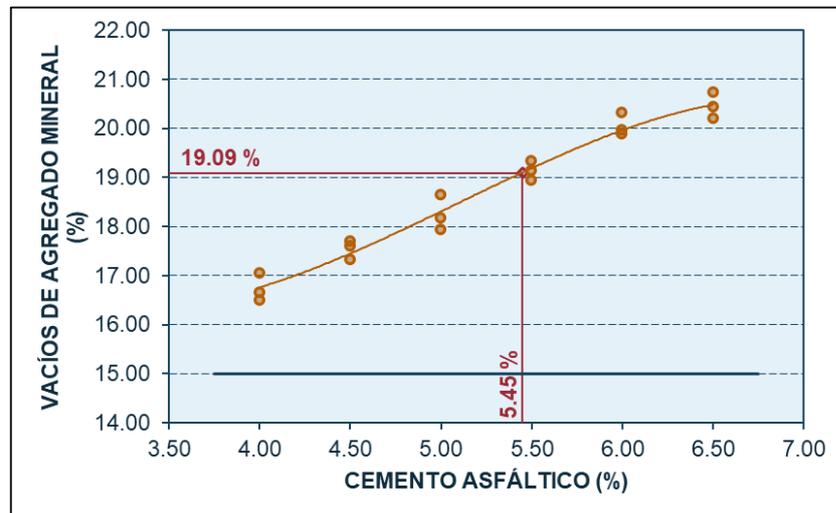
**Figura 13: Vacíos diseño mezcla patrón – Óptimo contenido asfáltico.**



*Fuente: Elaboración propia con hojas de cálculo*

Los VMA representan el espacio intergranular en el agregado que está disponible para ser llenado por el asfalto. Un contenido de asfalto del 5.45% asegura que los VMA se mantengan dentro de un rango óptimo, como se presenta en la siguiente figura 14.

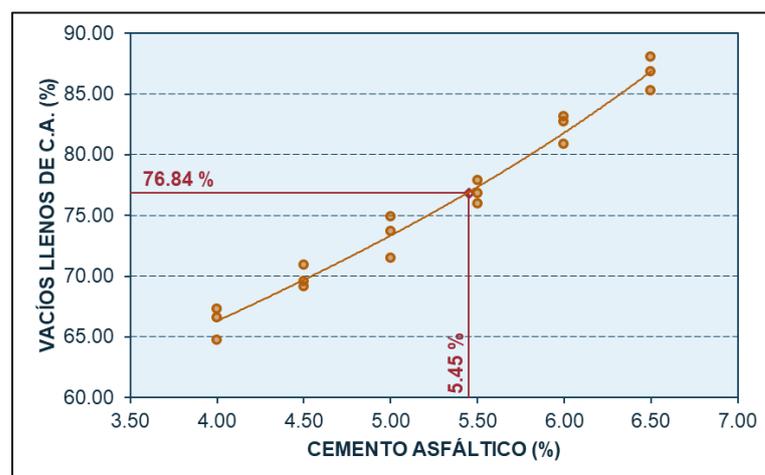
**Figura 14: VMA diseño mezcla patrón – Óptimo contenido asfáltico (OCA).**



*Fuente: Elaboración propia con hojas de cálculo*

Los VLLA son el porcentaje de vacíos en el agregado mineral que han sido llenados con asfalto. Un contenido óptimo de asfalto del 5.45% logra llenar los vacíos de manera suficiente, proporcionando una mezcla compacta y bien sellada. Esto es vital para la impermeabilidad del pavimento, reduciendo la posibilidad de daños por infiltración de agua y mejorando la resistencia al desgaste por fatiga, como se presenta en la siguiente figura 15.

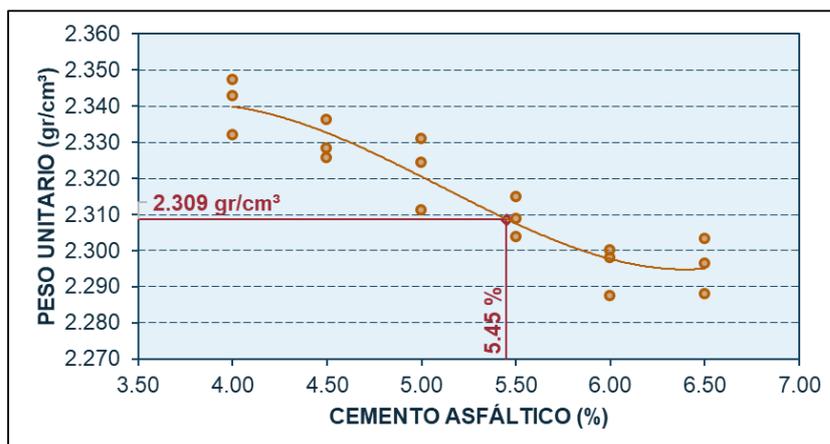
**Figura 15: VLLA diseño mezcla patrón – Óptimo contenido asfáltico.**



*Fuente: Elaboración propia con hojas de cálculo*

El peso unitario o peso volumétrico de la mezcla de asfalto es una referencia clave que indica su densidad y el grado de compactación. Con un contenido de asfalto del 5.45%, el peso unitario se optimiza, lo que significa que la mezcla ha alcanzado una densidad apropiada, como se presenta en la figura 16.

**Figura 16: Peso Unitario diseño mezcla patrón – Óptimo contenido asfáltico.**



*Fuente: Elaboración propia con hojas de cálculo*

Un contenido óptimo de asfalto del 5.45% es esencial para cumplir con las exigencias técnicas para el diseño de mezcla bituminosa de tipo (MAC-2), bajo la aplicación del método de Marshall. Este valor asegura que la mezcla asfáltica logre un balance ideal entre estabilidad, flexibilidad, compactación, y durabilidad, lo que es crucial para el desempeño a largo plazo del pavimento, los siguientes resultados de las propiedades se presenta. En la tabla 20.

**Tabla 20: Propiedades de mezcla – Óptimo contenido asfáltico**

ÓPTIMO CONTENIDO DE ASFALTO		
Cemento Asfáltico en peso de la mezcla	5.45	%
Peso unitario	2.309	gr/cm <sup>3</sup>
Vacíos	4.41	%
Vacíos de agregado mineral	19.09	%
Vacíos llenos con cemento asfáltico	76.84	%
Flujo	3.13	mm
Estabilidad	486.9	kg

*Fuente: Elaborada propia con hojas de cálculo*

#### 4.5. OE1 – Óxido de calcio en densidad y volumetría

Dentro de la investigación sobre el diseño de pavimentos flexible, las características y propiedades volumétricas de una mezcla juegan un papel fundamental en la evaluación de su desempeño a largo plazo. Estas propiedades incluyen el porcentaje de volumen de vacíos% de mezcla compactada ( $V_a$ ), los vacíos llenados con cemento asfáltico (VLLA), los vacíos en el agregado mineral (%VMA), y la densidad de la mezcla bituminosa. Cuando se incorpora óxido de calcio en el agregado artificial grueso de TMN (1/2”), como en las muestras al 0%, 6%, 12%, 18% y 24% (peso en función del agregado artificial), se observan variaciones significativas en estas propiedades volumétricas, lo que afecta directamente la calidad y durabilidad del pavimento.

El porcentaje de espacios vacíos en una mezcla de asfalto es un parámetro crítico para su durabilidad, ya que los vacíos permiten la expansión térmica y la acomodación de la mezcla bajo carga. Por otro lado, un exceso de vacíos puede perjudicar la resistencia del pavimento a la fatiga y la infiltración de agua, lo que lleva a la degradación prematura. En las mezclas al incorporar óxido de calcio al agregado artificial, se observa una tendencia a la disminución los vacíos ( $V_a$ ) conforme se va añadiendo un mayor % de contenido de óxido de calcio a la partícula artificial. Por ejemplo, al 0%, la mezcla presenta un porcentaje de vacíos estándar; sin embargo, al 18% y 24% de óxido de calcio, los vacíos se reducen significativamente. Esta reducción indica que el óxido de calcio mejora la compactación de la mezcla, logrando un pavimento más denso y menos permeable, lo cual es beneficioso para aumentar la durabilidad y resistencia. Presentado los resultados en la tabla 21 sobre el contenido de vacíos(% $V_a$ ) de aire según las diferentes proporciones de porcentajes de óxido de calcio añadido al agregado artificial.

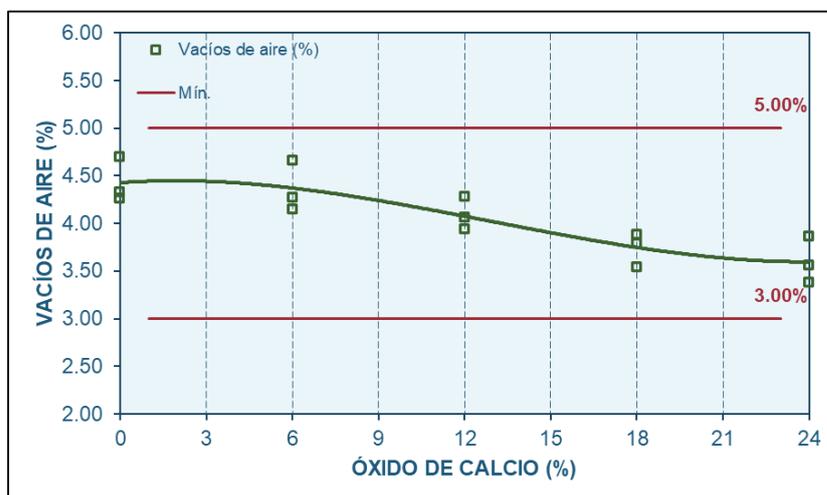
**Tabla 20: Porcentaje de vacíos ( $V_a$ )– Con variación en óxido de calcio.**

% DE VACÍOS DE AIRE ( $V_a$ ) EN MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS DENSAS Y ABIERTAS - MTC E 505						
Propiedad	Und.	Incorporación de óxido de calcio en el agregado grueso artificial (%)				
		0	6	12	18	24
(1) Vacíos de aire	(%)	4.26	4.66	4.06	3.79	3.56
(2) Vacíos de aire	(%)	4.70	4.15	4.28	3.54	3.86
(3) Vacíos de aire	(%)	4.33	4.27	3.94	3.88	3.38

*Fuente: Elaboración propia con hojas de cálculo*

Presentando el comportamiento gráfico en la siguiente figura 17 para el contenido de vacíos en función a los distintos porcentajes en óxido de calcio adicionado. Presentando un descenso en los contenidos de aire.

**Figura 17: Vacíos en mezcla Experimental – Contenidos en óxido de calcio.**



*Fuente: Elaboración propia con hojas de cálculo*

El VMA es el espacio intergranular dentro del agregado mineral disponible para ser llenado por el asfalto. Mantener un VMA adecuado es esencial para asegurar que la mezcla tenga suficiente asfalto para cubrir los agregados, proporcionando cohesión y resistencia. La incorporación de óxido de calcio en el agregado artificial, en los porcentajes mencionados, provoca una ligera reducción en el VMA en la mezcla. Esta reducción puede interpretarse como una mejora en la capacidad de los agregados para acomodarse de manera más compacta, disminuyendo los espacios vacíos dentro del agregado mineral. Si bien es importante que el VMA no se reduzca demasiado para evitar una insuficiencia de asfalto en la mezcla, la ligera reducción observada sugiere que el óxido de calcio contribuye a una mayor densidad de la mezcla sin comprometer la calidad del recubrimiento asfáltico. Presentado los resultados logrados de ensayos en la tabla 22 sobre el contenido de volumen de vacíos (%VMA) de agregado mineral en función a los % de óxido de calcio.

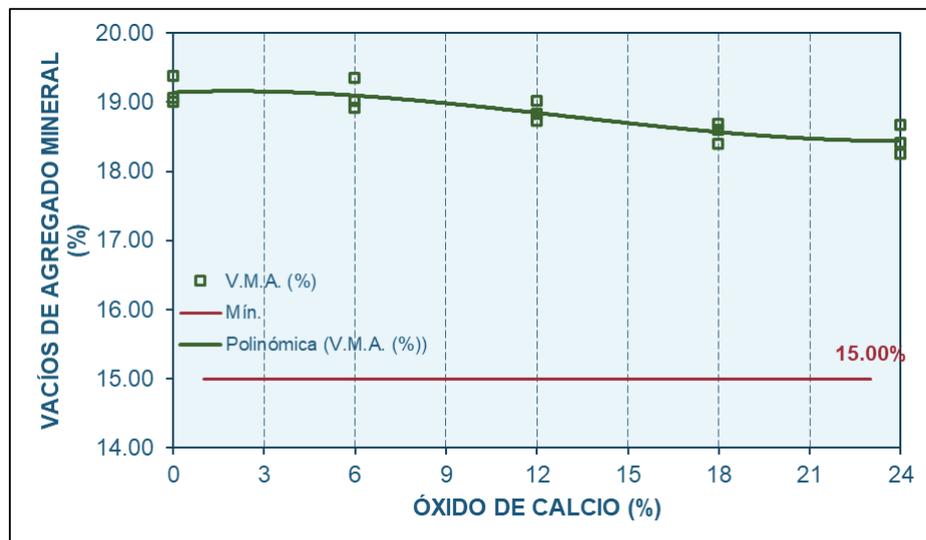
**Tabla 21: Porcentaje de %VMA – Con variación en óxido de calcio.**

<b>% DE VACÍOS DE AIRE(VMA) EN MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS DENSAS Y ABIERTAS - MTC E 505</b>						
<b>Propiedad</b>	<b>Und.</b>	<b>Incorporación de óxido de calcio en el agregado</b>				
		<b>Grueso artificial (%)</b>				
		0	6	12	18	24
(1) Vacíos de agregado mineral(VMA)	(%)	19.00	19.34	18.83	18.60	18.41
(2) Vacíos de agregado mineral(VMA)	(%)	19.37	18.91	19.02	18.39	18.66
(3) Vacíos de agregado mineral(VMA)	(%)	19.06	19.01	18.73	18.68	18.25

*Fuente: Elaboración propia con hojas de cálculo*

Presentando el comportamiento gráfico en la siguiente figura 18 para el contenido de VMA en función a los distintos porcentajes en óxido de calcio adicionado. Presentando un ligero aumento en los contenidos de VMA.

**Figura 18: VMA en mezcla Experimental – Contenidos en óxido de calcio.**



*Fuente: Elaboración propia con hojas de cálculo*

El VLLA corresponde el porcentaje de vacíos que están presentes en el agregado mineral que han sido efectivamente ocupadas por el cemento asfáltico. Un alto VLLA es indicativo de una mezcla que está bien sellada y tiene una buena sujeción entre los agregados y el aglutinante asfalto, lo cual es crucial para la resistencia del pavimento a la penetración de agua y su

durabilidad general. En las mezclas de asfalto que, al añadir óxido de calcio en el agregado grueso artificial, se aprecia el incremento en el VLLA a medida que se va subiendo el contenido de óxido de calcio. Este aumento es un indicativo positivo, ya que significa que el óxido de calcio adicionado en el agregado artificial presenta una mejora la capacidad del asfalto para cubrir todos los vacíos en el agregado mineral. Cuando el óxido de calcio alcanza el 18% y 24%, el VLLA alcanza niveles óptimos, lo que sugiere que la mezcla tendrá una mejor resistencia a la deformación plástica, resistencia a la acción del agua y una mayor durabilidad, especialmente en condiciones de tráfico y clima adverso. Presentado los resultados en la tabla 23 sobre el contenido de vacíos llenados de asfalto en función de la variación % de óxido de calcio.

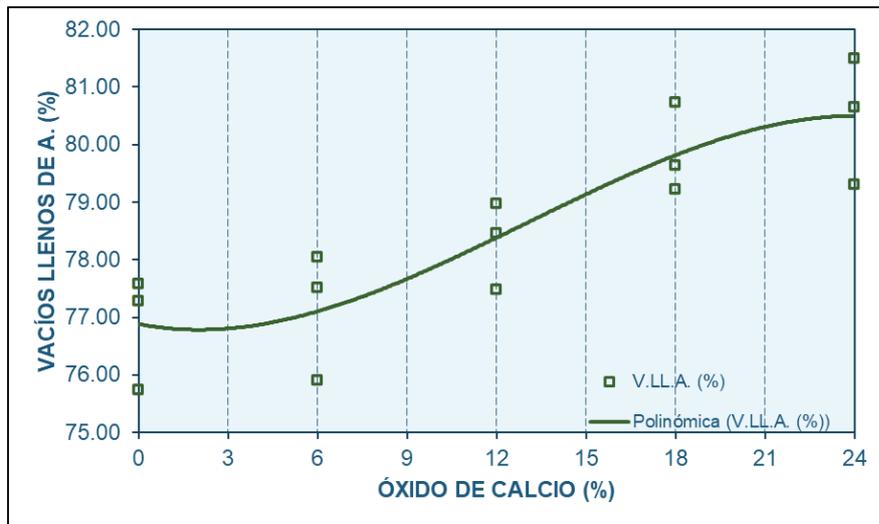
**Tabla 22: Porcentaje de VLLA – Con variación en óxido de calcio.**

<b>% DE VLLA EN MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS DENSAS Y ABIERTAS - MTC E 505</b>						
<b>Propiedad</b>	<b>Und.</b>	<b>Incorporación de óxido de calcio en el agregado grueso artificial (%)</b>				
		0	6	12	18	24
		(1) Vacíos llenos de asfalto	(%)	77.59	75.90	78.46
(2) Vacíos llenos de asfalto	(%)	75.74	78.05	77.49	80.74	79.31
(3) Vacíos llenos de asfalto	(%)	77.28	77.52	78.98	79.23	81.50

*Fuente: Elaboración propia con hojas de cálculo*

Presentando el comportamiento gráfico en la siguiente figura 19 para el contenido de VLLA en función a los distintos porcentajes en óxido de calcio adicionado en el agregado grueso artificial. Presentando un aumento en los contenidos de VLLA. Presentando un aumento en los contenidos de VLLA.

**Figura 19: VLLA en mezcla Experimental – Contenidos en óxido de calcio.**



*Fuente: Elaboración propia con hojas de cálculo*

El peso unitario de una mezcla de asfalto es un indicador de la densidad, y está directamente en relación de la cantidad de compacidad y estabilidad de la mezcla. Un peso unitario más alto generalmente resulta una mezcla más densa y, por lo tanto, es lo suficientemente resistente para resistir las cargas del tránsito sin presentar deformaciones. En las mezclas que fueron añadidas óxido de calcio al agregado grueso artificial, se puede observar un ligero aumento en el peso unitario, particularmente en las muestras al 18% y 24%. Este aumento nos da a conocer que al adicionar óxido de calcio no solo reduce los vacíos y mejora la densidad de la mezclado asfalto, sino que también contribuye a una mayor estabilidad del pavimento. Un mayor peso unitario es beneficioso ya que aumenta la estabilidad frente a las tensiones causadas por el tránsito y además presenta resistencia la deformación.

**Tabla 23: Peso unitario – Con variación en óxido de calcio.**

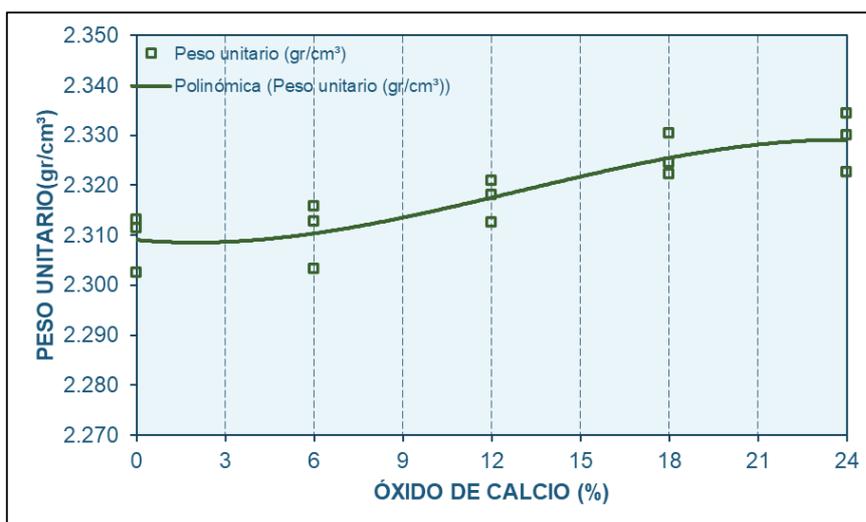
PESO UNITARIO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS DENSAS Y ABIERTAS - MTC E 505						
Propiedad	Und.	Incorporación de óxido de calcio en el agregado grueso artificial (%)				
		0	6	12	18	24
(1) Peso Unitario	(gr/cm <sup>3</sup> )	2.313	2.303	2.318	2.325	2.330
(2) Peso Unitario	(gr/cm <sup>3</sup> )	2.302	2.316	2.313	2.330	2.323

(3) Peso Unitario	(gr/cm <sup>3</sup> )	2.311	2.313	2.321	2.322	2.334
-------------------	-----------------------	-------	-------	-------	-------	-------

*Fuente: Elaboración propia con hojas de cálculo*

Presentando el comportamiento gráfico en la siguiente figura 20 para el peso unitario en base a la variación de contenido % de óxido de calcio adicionado. Presentando un aumento en los contenidos de peso unitario. Presentando un aumento en los contenidos de peso unitario.

**Figura 20: Peso unitario en mezcla Experimental – Contenidos en óxido de calcio.**



*Fuente: Elaborado propia con hojas de cálculo*

La adición de óxido de calcio en el agregado grueso artificial tiene un impacto significativo en sus propiedades volumétricas en mezclas asfálticas. La reducción de vacíos, junto con la ligera disminución del VMA, el aumento del VLLA y el incremento del peso unitario, sugieren que el óxido de calcio contribuye a la creación de una mezcla de asfalto más densa y resistente. Estas mejoras son cruciales para prolongar la duración de la capa de rodadura, la estabilidad a la deformación, y su capacidad resistir las tensiones bajo la influencia de cargas causadas por el tráfico y clima. Las observaciones en las muestras al 18% y 24% de óxido de calcio son particularmente prometedoras, indicando que estos niveles de adición podrían ser óptimos para aplicaciones en pavimentos sujetos a tráfico medio y pesado.

#### **4.6. OE2 – Óxido de calcio en estabilidad y flujo**

En el estudio de diseño de mezclas bituminosas, las características volumétricas y propiedades mecánicas de la mezcla de asfalto aportan un rol importante en la evaluación de su funcionalidad para garantizar un pavimento con vida útil prolongada. Estas propiedades incluyen la estabilidad y fluencia. Cuando se incorpora óxido de calcio en el agregado grueso

artificial, como en las muestras al 0%, 6%, 12%, 18% y 24%, se observan variaciones significativas en estas propiedades mecánicas de mezcla bituminosa, lo que influye específicamente en la resistencia ante cargas y a deformaciones del pavimento.

La propiedad mecánica respecto a la estabilidad en una mezcla de asfalto es primordial para garantizar la resistencia frente a las cargas vehiculares y los factores de cambios de temperatura ambientales. Asegurando la durabilidad de la superficie de rodadura y prevenir deformaciones como ahuellamiento y hendiduras, lo que mantiene un buen desempeño. En las mezclas realizadas con agregado artificial cristalizado con óxido de calcio, se observa una tendencia al aumento de estabilidad a medida que se va adicionando un mayor % de óxido de calcio. Por ejemplo, al 0%, la mezcla presenta una estabilidad por debajo del mínimo de la norma; sin embargo, al 18% y 24% de óxido de calcio en el agregado artificial, la estabilidad aumenta significativamente. Este aumento indica que el óxido de calcio refuerza la capacidad de resistencia del asfalto, logrando un pavimento resistente frente a cargas de nivel de tráfico medio. Presentado los resultados en la tabla 25 sobre la estabilidad respecto a la variación % de óxido de calcio.

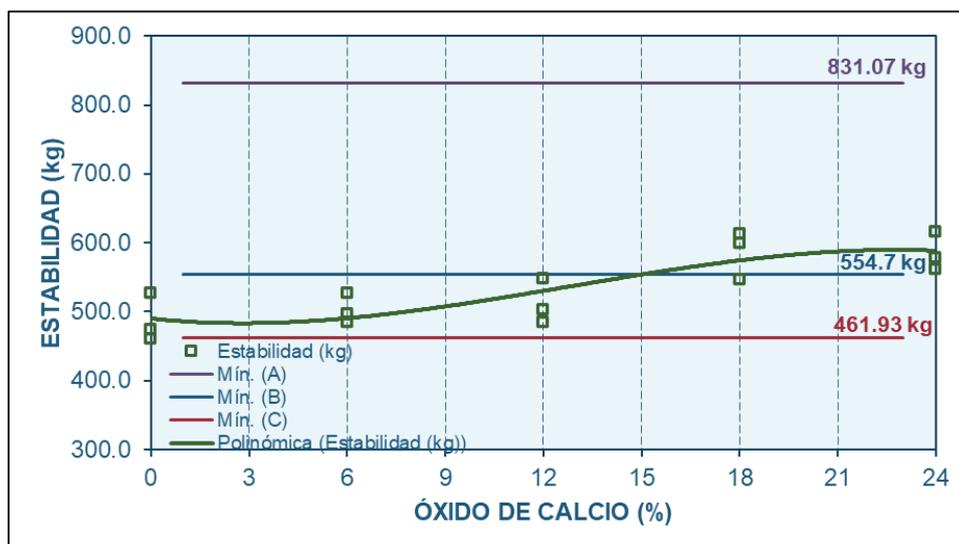
**Tabla 24: Estabilidad – Con variación en óxido de calcio.**

<b>ESTABILIDAD MEDIANTE RESISTENCIA DE MEZCLAS BITUMINOSAS EMPLEANDO EL APARATO MARSHALL - MTC E 504</b>						
<b>Propiedad</b>	<b>Und.</b>	<b>Incorporación de óxido de calcio en el agregado grueso artificial (%)</b>				
		<b>0</b>	<b>6</b>	<b>12</b>	<b>18</b>	<b>24</b>
(1) Estabilidad	(kg)	460.2	485.3	484.9	546.5	616.2
(2) Estabilidad	(kg)	527.6	526.9	502.9	613.4	562.1
(3) Estabilidad	(kg)	473.6	496.3	548.0	600.1	577.7

*Fuente: Elaboración propia con hojas de cálculo*

Presentando el comportamiento gráfico en la siguiente figura 21 para la estabilidad en función a los distintos porcentajes en óxido de calcio adicionado. Presentando un aumento en los resultados de estabilidad.

**Figura 21: Estabilidad Experimental – Contenidos en óxido de calcio.**



*Fuente: Elaboración propia con hojas de cálculo*

El flujo es un análisis esencial para evaluar la deformación plástica bajo cargas repetidas. Un flujo controlado asegura que la mezcla asfáltica mantenga sus propiedades estructurales y funcionales previniendo deformaciones. La incorporación de óxido de calcio en el agregado artificial, en los porcentajes mencionados, provoca una ligera reducción en el flujo de la mezcla. Esta reducción puede interpretarse como una mejora en la capacidad de los agregados para soportar deformaciones ante cargas, permitiendo que la mezcla se deforme de manera plástica y recupere su estado inicial. Si bien es importante que el flujo no se reduzca demasiado para evitar formación de grietas, la ligera reducción observada sugiere que el óxido de calcio contribuye a una mayor resistencia a la deformación, teniendo así que al 24% de incorporación de óxido de calcio en el agregado artificial el flujo de la mezcla de asfalto es menor al mínimo indicado lo cual no beneficia. Presentado los resultados en la tabla 26 sobre el flujo ante los diferentes % de óxido de calcio.

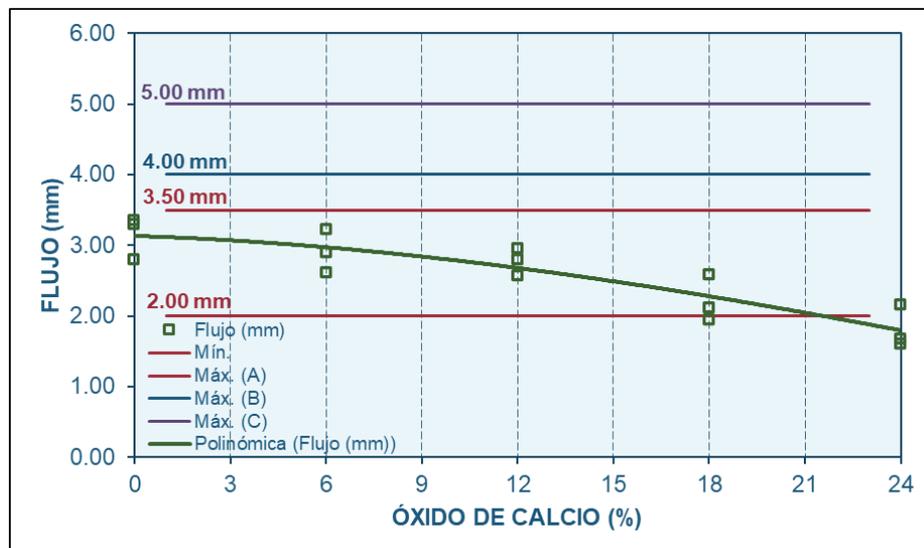
**Tabla 25: Flujo – Con variación en óxido de calcio.**

		Incorporación de óxido de calcio en el agregado artificial (%)				
Propiedad	Und.	0	6	12	18	24
(1) Flujo	(mm)	3.30	3.22	2.80	2.11	2.15
(2) Flujo	(mm)	2.79	2.61	2.95	2.58	1.68
(3) Flujo	(mm)	3.35	2.89	2.57	1.95	1.60

*Fuente: Elaboración propia con hojas de cálculo*

Presentando el comportamiento gráfico en la siguiente figura 22 para el flujo en función a los distintos porcentajes en óxido de calcio adicionado. Presentando un descenso en los resultados de flujo.

**Figura 22: Flujo Experimental – Contenidos en óxido de calcio.**



*Fuente: Elaboración propia con hojas de cálculo*

#### 4.7. OE3 – Óxido de calcio en resistencia retenida

En la investigación de pavimentos asfálticos, la evaluación de ensayo de resistencia sometida a compresión de la mezcla compacta es importante, ya que nos ayuda a evaluar la capacidad de resistencia frente a cargas mecánicas y resistencia al deterioro por humedad. Cuando se incorpora óxido de calcio en el agregado grueso artificial de TMN de ½” para las mezclas asfálticas, como en las muestras al 0%, 6%, 12%, 18% y 24%, se observan variaciones significativas en la resistencia retenida de la mezcla, lo que perjudica directamente la durabilidad y estabilidad del pavimento bajo condiciones de saturación.

La resistencia retenida es una medida de la capacidad del material para mantener su resistencia a la compresión después de haber sido sometido a condiciones de inmersión en agua. Una alta resistencia retenida es señal de que el pavimento tiene una buena resistencia a la deformación y al fallo después de exposición a condiciones húmedas, lo cual es crucial para asegurar el buen desempeño del pavimento bajo condiciones ambientales adversas. En las mezclas con adición de óxido de calcio en el agregado grueso artificial, se evidencia una elevación en la resistencia retenida conforme que se eleva el contenido de óxido de calcio. Este aumento es un indicativo positivo, ya que significa que el óxido de calcio presenta una mejora significativa en la resistencia a compresión ante condiciones de saturación de la mezcla. Al añadir el 24% de óxido de calcio al agregado artificial, la resistencia retenida alcanza altos niveles, lo que sugiere que la mezcla tendrá una mayor resistencia a la compresión cuando se añade mayor % de óxido de calcio. Presentado los datos en forma detallada en la tabla 27 sobre la resistencia retenida en función a los % de óxido de calcio.

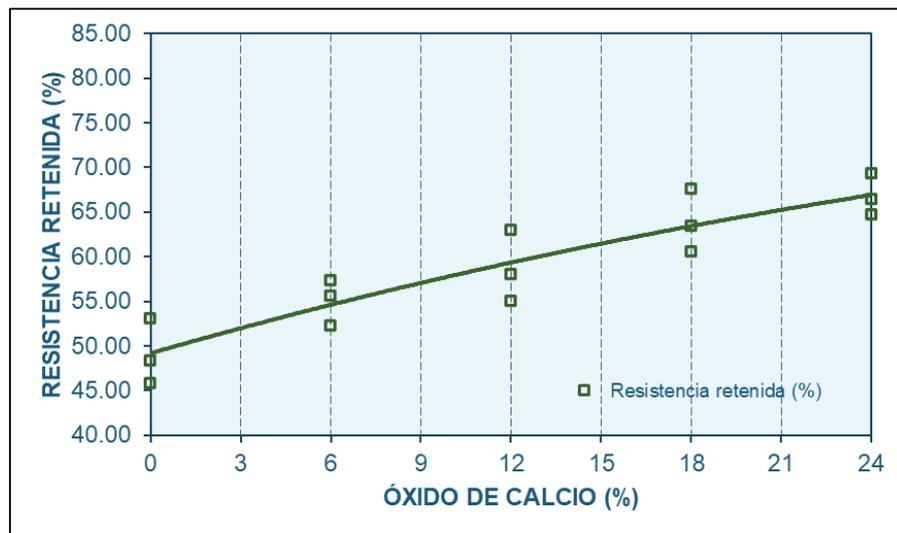
**Tabla 26: Resistencia retenida – Con variación en óxido de calcio**

<b>RESISTENCIA RETENIDA MEDIANTE EFECTO DEL AGUA EN LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE MEZCLAS BITUMINOSAS COMPACTADAS - MTC E 518</b>						
<b>Propiedad</b>	<b>Und.</b>	<b>Incorporación de óxido de calcio en el agregado grueso artificial (%)</b>				
		<b>0</b>	<b>6</b>	<b>12</b>	<b>18</b>	<b>24</b>
(1) Resistencia retenida	(%)	48.36	52.26	55.02	63.46	69.29
(2) Resistencia retenida	(%)	53.06	55.65	62.99	60.58	64.70
(3) Resistencia retenida	(%)	45.83	57.33	57.98	67.62	66.41

Fuente: Elaboración propia con hojas de cálculo

Presentando el comportamiento gráfico en la siguiente figura 23 para la resistencia retenida en función a los distintos porcentajes en óxido de calcio adicionado. Presentando un aumento en los resultados de las pruebas de tracción indirecta o resistencia retenida%.

**Figura 23: Resistencia retenida Experimental – Contenidos en óxido de calcio.**



Fuente: Elaboración propia con hojas de cálculo

#### 4.8. OG – Óxido de calcio en propiedades físicas y mecánicas

La evaluación de las mezclas de asfalto en caliente diseñadas tras la incorporación de agregado grueso artificial de arcilla cristalizada reforzada con óxido de calcio y la influencia en las características físicas y las propiedades mecánicas de mezclas bituminosas, se analizará en función del tipo de tráfico para el que se elaborarán las briquetas. Procediendo así con presentar los resultados de las pruebas de ensayos como: flujo(mm), el desempeño mecánico de estabilidad (kg), y propiedades físicas de vacíos al realizar el diseño a 50 golpes de compactación (tráfico medio), y al realizar el diseño a 35 golpes de compactación (tráfico bajo). Estos diseños se realizaron para un óptimo de óxido de calcio en el agregado grueso artificial, optando por el 18%, ya que tras analizar los resultados anteriores se pudo observar que al 24% el flujo era menor al mínimo permitido en la norma, mientras que al 18% todos los resultados fueron óptimos. Además, para determinar las propiedades a los distintos niveles de tráfico se ha variado el contenido de porcentaje de aglutinante asfáltico empleado en la mezcla.

Como se mencionó anteriormente la respuesta mecánica de estabilidad en una mezcla asfáltica es fundamental para garantizar la resistencia frente a las cargas vehiculares y las condiciones ambientales. En las mezclas diseñadas a tráfico medio se añadieron el óptimo contenido de

óxido de calcio de 18% al agregado artificial (1/2”), variando el % del contenido de ligante, se evidencia una tendencia del aumento de la estabilidad a medida que se va aumentando el ligante asfáltico hasta alcanzar un 5.5%, para el 6% al 6.5% la estabilidad desciende de nuevo. Del 4% al 4.5%, la mezcla presenta una estabilidad menor al nivel aceptable de la norma de 554.7 kg; sin embargo, al 5.5%, la estabilidad aumenta significativamente hasta sobrepasar el mínimo. Este aumento indica que al 5.5% de cemento asfáltico se alcanza a mejorar la capacidad de resistencia de la mezcla, logrando un pavimento resistente a cargas de tráfico medio. Presentado los resultados en la tabla 28 sobre la estabilidad ante distintas proporciones de proporción de betún asfáltico para el diseño de tráfico nivel medio.

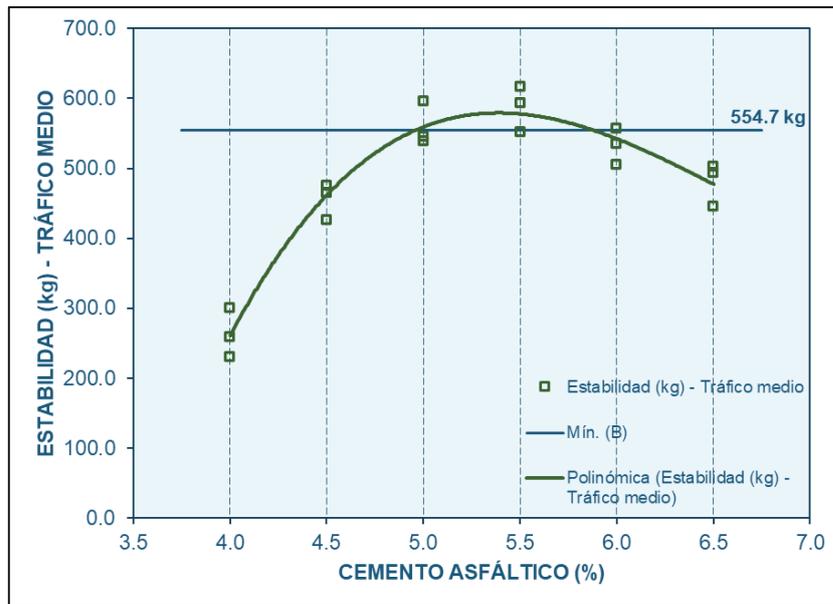
**Tabla 27: Estabilidad – Contenidos de cemento asfáltico (Tráfico medio)**

<b>ESTABILIDAD MEDIANTE RESISTENCIA DE MEZCLAS BITUMINOSAS EMPLEANDO EL APARATO MARSHALL - MTC E 504</b>							
<b>Cemento asfáltico (%) - Empleando 18% de óxido de calcio en el agregado grueso artificial (TRÁFICO MEDIO)</b>							
<b>Propiedad</b>	<b>Und.</b>	<b>4.0</b>	<b>4.5</b>	<b>5.0</b>	<b>5.5</b>	<b>6.0</b>	<b>6.5</b>
(1) Estabilidad	(kg)	259.0	426.1	539.2	551.8	534.6	502.1
(2) Estabilidad	(kg)	300.0	465.5	596.1	593.5	504.8	446.2
(3) Estabilidad	(kg)	229.9	475.0	546.0	616.2	557.1	493.0

*Fuente: Elaboración propia con hojas de cálculo*

Presentando el comportamiento gráfico del diseño realizado para tráfico medio, en la siguiente figura 20 para la estabilidad en función a los distintos porcentajes en cemento asfáltico empleado. Presentando un aumento en los resultados de resistencia (estabilidad) para el 5.5% de aglutinante asfalto, con una máxima estabilidad alcanzada de 616.2 kg, comprobando que es superior al mínimo de la norma de 554.7 kg.

**Figura 24: Estabilidad – Contenidos de cemento asfáltico (Tráfico medio).**



*Fuente: Elaboración propia con hojas de cálculo*

En las mezclas diseñadas para tráfico bajo con la incorporación del óptimo de 18% de óxido calcio en el agregado grueso artificial y variando el cemento asfáltico, se observa una tendencia al incremento de la resistencia (estabilidad) conforme que el cemento asfáltico sigue aumentando hasta alcanzar un 5.5%, para el 6% al 6.5% la estabilidad desciende de nuevo. Del 4% al 4.4%, la mezcla presenta una estabilidad inferior al mínimo de la norma de 461.93 kg; sin embargo, al 5.5%, la estabilidad aumenta significativamente hasta sobrepasar el mínimo. Este aumento indica que al 5.5% de cemento asfáltico alcanza una capacidad superior de la mezcla bituminosa para resistir cargas, obteniendo que en el rango del 5.5% al 6.5% también se cumple con mantener resultados de estabilidad mayores al mínimo, logrando un pavimento resistente a cargas de tráfico bajo. Presentado en la tabla 29 sobre la estabilidad ante distintas dosis de ligante asfalto para el diseño a tráfico bajo.

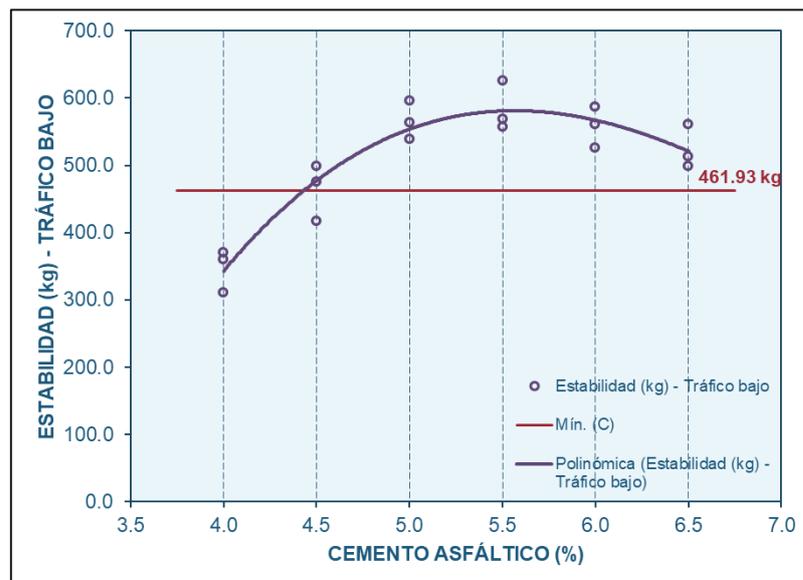
**Tabla 28: Estabilidad – Contenidos de cemento asfáltico (Tráfico bajo)**

ESTABILIDAD MEDIANTE RESISTENCIA DE MEZCLAS BITUMINOSAS							
EMPLEANDO EL APARATO MARSHALL - MTC E 504							
Cemento asfáltico (%) - Empleando 18% de óxido de calcio							
Propiedad	Und.	en el agregado grueso artificial					
		(TRÁFICO BAJO)					
		4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5
(1) Estabilidad	(kg)	311.4	498.3	563.8	568.6	586.6	561.3
(2) Estabilidad	(kg)	359.5	474.9	595.5	626.0	561.3	513.5
(3) Estabilidad	(kg)	370.5	417.4	538.5	557.1	525.5	498.2

*Fuente: Elaboración propia con hojas de cálculo*

Presentando el comportamiento gráfico del diseño realizado para tráfico bajo, en la siguiente figura 25 para la estabilidad en función a los distintos porcentajes en cemento asfáltico empleado. Presentando un aumento en los valores de estabilidad mecánica para el 5.5% de contenido asfáltico, con una máxima estabilidad alcanzada de 626.0 kg, comprobando que es superior al mínimo de la norma de 461.93 kg.

**Figura 25: Estabilidad– Contenidos de cemento asfáltico (Tráfico bajo).**



*Fuente: Elaboración propia con hojas de cálculo*

Como se mencionó anteriormente el flujo es un análisis esencial para evaluar la deformación plástica bajo cargas repetidas. En las mezclas diseñadas a tráfico medio con el óptimo de 18% de óxido de calcio en el agregado artificial realizando la variación el ligante asfáltico, se puede ver la tendencia al aumento de flujo de manera que se va incrementado el contenido de ligante asfalto hasta llegar un 6.5%. Del 4% al 5%, la mezcla presenta un flujo por debajo del mínimo de la norma de 2 mm. A partir del 5% al 6.5% de cemento asfáltico se llega a lograr una mejora en la capacidad de la mezcla para resistir deformaciones permanentes, logrando un pavimento capaz de resistir las deformaciones causadas por fatiga por el tráfico medio. Presentado los resultados en la tabla 30 sobre el flujo ante distintos % de ligante asfalto para el diseño de tráfico medio.

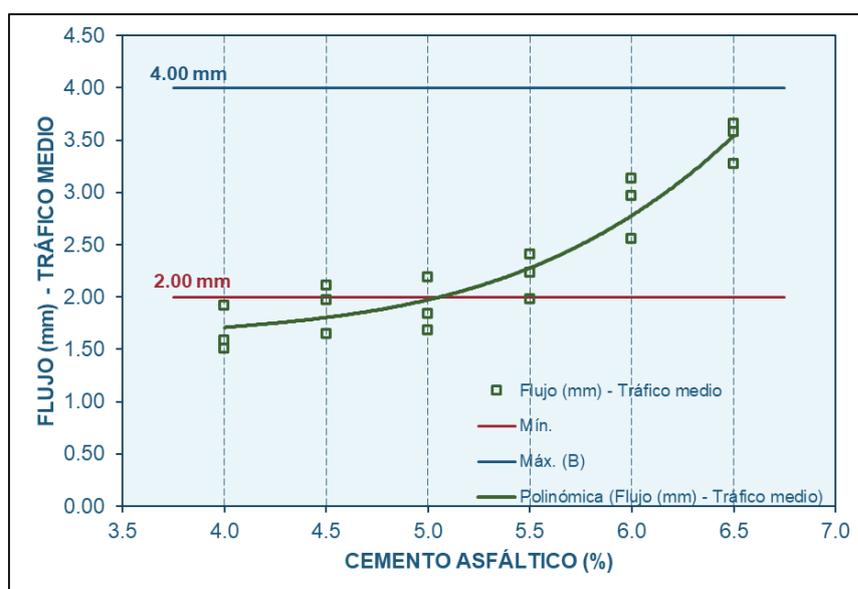
**Tabla 29: Flujo – Contenidos de cemento asfáltico (Tráfico medio)**

<b>FLUJO MEDIANTE RESISTENCIA DE MEZCLAS BITUMINOSAS</b>							
<b>EMPLEANDO EL APARATO MARSHALL - MTC E 504</b>							
<b>Cemento asfáltico (%) - Empleando 18% de óxido de calcio</b>							
<b>Propiedad</b>	<b>Und.</b>	<b>en el agregado grueso artificial</b>					
		<b>(TRÁFICO MEDIO)</b>					
		4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5
(1) Flujo	(mm)	1.51	2.11	1.68	1.98	2.56	3.58
(2) Flujo	(mm)	1.92	1.97	1.84	2.23	3.13	3.66
(3) Flujo	(mm)	1.59	1.65	2.19	2.41	2.97	3.27

*Fuente: Elaboración propia con hojas de cálculo*

Presentando el comportamiento gráfico del diseño realizado para tráfico medio, en la siguiente figura 26 para el flujo en función a los distintos porcentajes en cemento asfáltico empleado. Presentando un aumento en los resultados de flujo para el 6.5% de contenido de ligante asfalto, presento un máximo valor de flujo alcanzado de 3.66 mm, comprobando que se encuentra en un nivel más alto al mínimo de la norma de 2 mm.

**Figura 26: Flujo – Contenidos de cemento asfáltico (Tráfico medio).**



*Fuente: Elaboración propia con hojas de cálculo*

En las mezclas diseñadas para tráfico bajo, adicionando el óptimo de 18% de óxido de calcio en el agregado artificial y variando el % de aglutinante asfáltico, se puede observar que el flujo tiende a incrementarse a medida que va aumentando la cantidad del contenido asfáltico hasta alcanzar 6.5%. Del 4% al 5.5%, la mezcla presenta un flujo por debajo del mínimo de la norma de 2 mm. A partir del 5.5% al 6.5% de cemento asfáltico presenta la mejora de la resistencia de la mezcla frente a la deformación, logrando un pavimento resistente inducidas por tráfico bajo. Presentado los resultados en la tabla 31 sobre el flujo ante la variación de % de cemento asfáltico para el nivel de tráfico bajo.

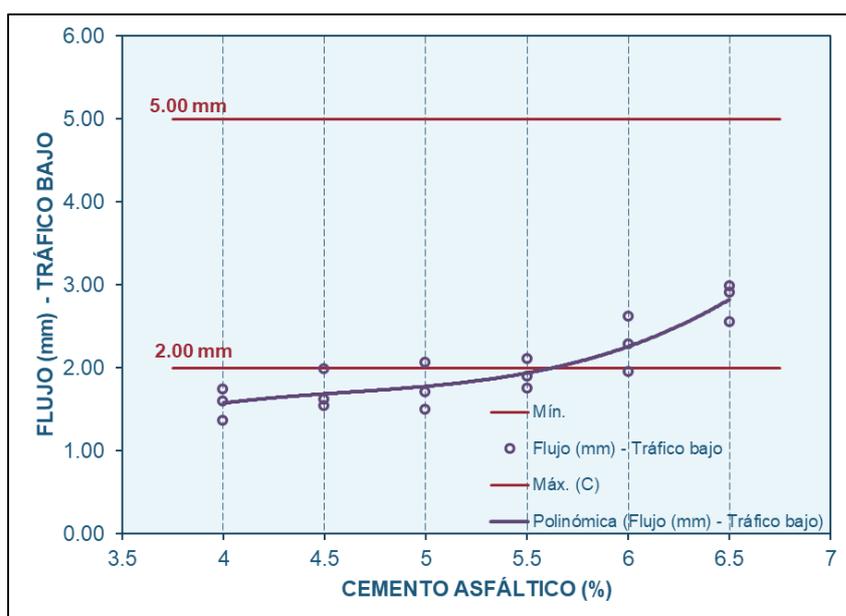
**Tabla 30: Flujo – Contenidos de cemento asfáltico (Tráfico bajo).**

FLUJO MEDIANTE RESISTENCIA DE MEZCLAS BITUMINOSAS EMPLEANDO EL APARATO MARSHALL - MTC E 504							
Cemento asfáltico (%) - Empleando 18% de óxido de calcio en el agregado artificial (TRÁFICO BAJO)							
Propiedad	Und.	Cemento asfáltico (%)					
		4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5
(1) Flujo	(mm)	1.60	1.99	1.71	2.11	1.95	2.91
(2) Flujo	(mm)	1.36	1.62	1.50	1.75	2.62	2.55
(3) Flujo	(mm)	1.74	1.54	2.06	1.90	2.29	2.99

*Fuente: Elaboración propia con hojas de cálculo*

Presentando el comportamiento gráfico del diseño realizado para tráfico bajo, en la siguiente figura 27 para el flujo en función a los distintos porcentajes en cemento asfáltico empleado. Presentando un aumento en los resultados de flujo para el 6.5% de contenido asfáltico, alcanzando un máximo valor de flujo de 2.99 mm, comprobando que es está por encima de la norma de 2 mm.

**Figura 27: Flujo – Contenidos de cemento asfáltico (Tráfico bajo).**



*Fuente: Elaboración propia con hojas de cálculo*

Como se mencionó anteriormente el porcentaje de vacíos en una mezcla bituminosa es crucial para su durabilidad, ya que los vacíos permiten la expansión térmica y la acomodación de la mezcla bajo carga. En las mezclas diseñadas a tráfico medio con el óptimo de 18% de óxido de calcio adicionadas al material grueso artificial ½” y con la variación del aglutinante asfáltico, se evidencia una tendencia descendente de los vacíos (%Va) conforme que se va elevando el % de contenido asfáltico hasta alcanzar un 6.5%. Así mismo con un porcentaje de aglutinante asfáltico de 4% al 4.65%, la mezcla presenta un volumen de vacíos (% Va) por encima del máximo de la Norma de 5%; y con la variación de porcentaje 6.3% al 6.5% del aglutinante asfáltico, resulta el volumen de vacíos (%Va) por debajo del mínimo de 3%. En el rango de 4.65% a 6.3% de cemento asfáltico se alcanza a mejorar la compactación de la mezcla, logrando un pavimento más denso y menos permeable bajo cargas del nivel de tráfico medio. Presentado los resultados en la tabla 32 sobre el porcentaje de vacíos ante distintos porcentajes de cemento asfáltico para el diseño a tráfico medio.

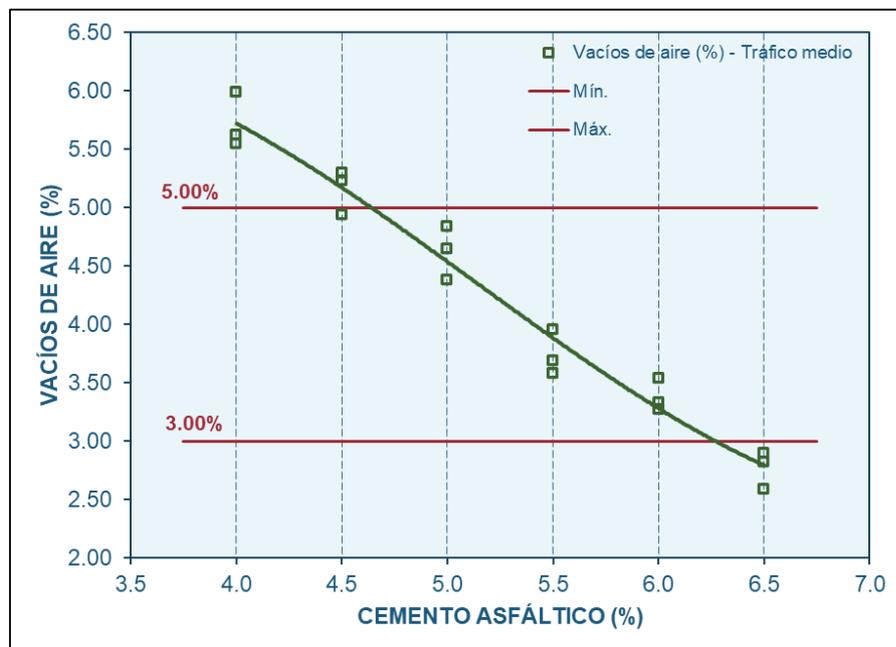
**Tabla 31: Porcentaje de vacíos (Va) – Contenidos de cemento asfáltico (Tráfico medio)**

VACÍOS DE AIRE EN MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS (%Va) DENSAS Y ABIERTAS - MTC E 505							
Cemento asfáltico (%) - Empleando 18% de óxido de calcio en agregado grueso artificial (TRÁFICO MEDIO)							
Propiedad	Und.	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5
(1) Vacíos de aire	(%)	5.55	4.94	4.65	3.69	3.33	2.82
(2) Vacíos de aire	(%)	5.62	5.23	4.38	3.96	3.54	2.90
(3) Vacíos de aire	(%)	5.99	5.30	4.84	3.58	3.27	2.59

*Fuente: Elaboración propia con hojas de cálculo*

Presentando el comportamiento gráfico del diseño realizado para tráfico medio, en la siguiente figura 28, volumen de vacíos de la mezcla compactada (Va) en función a los distintos porcentajes en cemento asfáltico empleado. Presentando un descenso de vacíos (%Va) para el rango de 4.65% a 6.3% de contenido asfalto, con un mínimo de vacíos (%va) dentro de la Normativa de 3.27%.

**Figura 28: Vacíos – Contenidos de cemento asfáltico (Tráfico medio).**



*Fuente: Elaboración propia con hojas de cálculo*

En las mezclas diseñadas a tráfico bajo, con la incorporación del 18% de óxido de calcio en el agregado grueso artificial y variando el cemento asfáltico, se observa una tendencia

descendente del % de vacíos conforme que se va incrementando el cemento asfáltico hasta alcanzar un 6.5%. Del 4% al 4.55% del aglutinante asfáltico, la mezcla presenta valores de vacíos (Va) por encima del máximo de las especificaciones de la Norma de 5%, y del 6.35% al 6.5% de cemento asfalto presenta un porcentaje de vacíos por debajo del mínimo de 3%. En el rango de 4.55% a 6.35% de cemento asfáltico se alcanza a mejorar la compactación de la mezcla, logrando un pavimento más denso y menos permeable por tráfico bajo. Presentado los resultados en la tabla 33 sobre el porcentaje de vacíos ante las proporciones del cemento asfalto para el nivel de diseño para tráfico bajo.

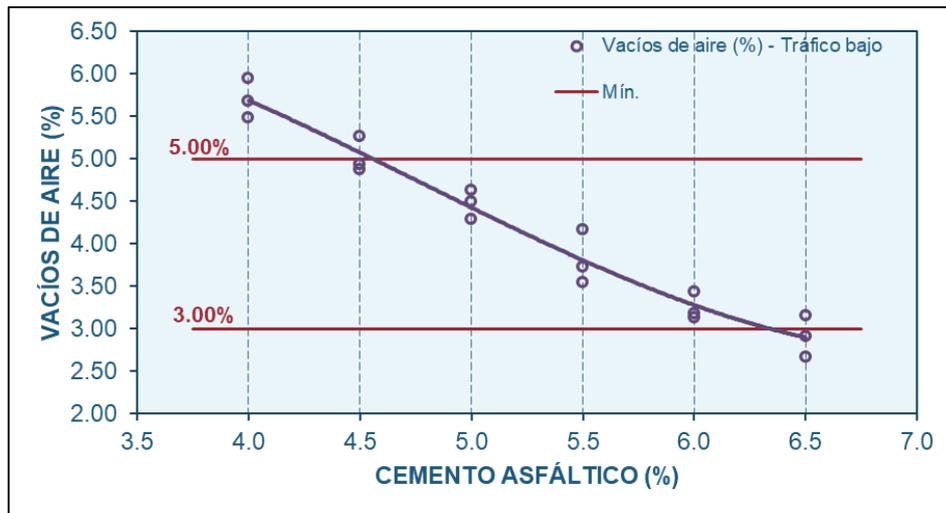
**Tabla 32: Porcentaje de vacíos – Contenidos de cemento asfáltico (Tráfico bajo).**

<b>VACÍOS DE AIRE EN MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS (Va) DENSAS Y ABIERTAS - MTC E 505</b>							
<b>Cemento asfáltico (%) - Empleando 18% de óxido de calcio</b>							
<b>Propiedad</b>	<b>und.</b>	<b>en el agregado grueso artificial</b>					
		<b>(TRÁFICO BAJO)</b>					
		4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5
(1) Vacíos de aire	(%)	5.68	4.93	4.50	4.17	3.18	2.91
(2) Vacíos de aire	(%)	5.95	4.88	4.29	3.55	3.43	2.67
(3) Vacíos de aire	(%)	5.49	5.26	4.63	3.73	3.13	3.15

*Fuente: Elaboración propia con hojas de cálculo*

Presentando el comportamiento gráfico del diseño realizado para tráfico bajo, en la siguiente figura 29 para el porcentaje de vacíos en función a los distintos porcentajes en cemento asfáltico empleado. Mostrando un descenso en los valores de volumen de vacíos (%Va) de 3.13% para el rango de 4.55% a 6.35% de ligante asfáltico.

**Figura 29: Vacíos – Contenidos de cemento asfáltico (Tráfico bajo).**



*Fuente: Elaboración propia con hojas de cálculo*

#### 4.9. Discusión de resultados

Según los resultados obtenidos, se evidencia que al incorporar óxido de calcio de 18% en el agregado grueso artificial de arcilla cristalizada para una mezcla asfáltica compactada para una intensidad de tráfico medio, los porcentajes de vacíos de aire ( $V_a\%$ ) de la mezcla se mantienen para el rango de 4.65% a 6.3% de ligante asfáltico, mientras que para el caso de un nivel de tránsito bajo los valores de vacíos de aire (%) se mantienen para el rango de 4.55% a 6.35% de cemento asfáltico. Llegando a obtenerse resultados dentro de las especificaciones de calidad de una mezcla de asfalto en base al Manual de Carreteras “MTC EG-2013”, de manera similar, en contraste con (10), de acuerdo con los resultados de su estudio, propuso un diseño de mezcla asfáltica de forma convencional donde se incorporó ignimbrita como sustituto al agregado mineral fino. La ignimbrita se añadió en porcentajes de 3%, 1% y 0.5%, y fue utilizada una distribución granulométrica en la fracción que pasa por la malla N°80 a fondo, llegando a concluir que al añadir 0.5% de Ignimbrita presenta mejoras las características físicas y volumétricas del asfalto. Por consiguiente, se concluye que al diseñar mezclas asfálticas con reemplazo de agregado no convencional mejora significativamente las características volumétricas y las propiedades mecánicas de mezclas asfálticas permitiendo mantener una densidad óptima, crucial para la resistencia al desgaste y a la fatiga.

De acuerdo con los resultados de pruebas mecánicas, evidencian que al adicionar de 18% óxido de calcio al agregado grueso de arcilla cristalizada, para tráfico de nivel medio se observa una tendencia de incremento de estabilidad de 616.2 kg en la medida en que se va incrementando el ligante asfáltico hasta alcanzar un 5.5% y un aumento de flujo con un máximo alcanzado de

3.66 mm para el 6.5% de cemento asfáltico. Y para un nivel de tráfico bajo llega una estabilidad máxima de 626,0 kg con un óptimo contenido de ligante asfalto de 5,5% y con flujo alcanzado de 2.99 mm para el 6.5% de cemento asfáltico, cumpliendo con los requerimientos y requisitos técnicos del “MTC EG-2013”. Así mismo se constata con (9) conforme a los resultados obtenidos en su investigación, lo cual se basa en elaborar de diseño de mezclas asfálticas adicionando cenizas de algas marinas. Concluye que con un patrón ideal de 5% de C.A resulta una gran estabilidad de 1880 kg, además presenta una fluencia de 3.8mm, una densidad de 2.339 gr/cm<sup>3</sup>. Con ello se confirma que las mezclas modificadas proporcionan mayor rigidez reduciendo la susceptibilidad a deformaciones permanentes.

Según los resultados obtenidas de las pruebas de ensayo de inmersión-compresión, en la tabla 27; se evidencia que la incorporación el 24% de óxido de calcio en agregados artificiales de arcilla cristalizada, aumenta en la resistencia retenida de 65%, lo cual indica mejora de la resistencia bajo condiciones de humedad de las mezclas de asfalto, de igual forma en contraste con (12) según los resultados de su investigación de diseño de mezcla Bituminosa, se basó en modificar el betún puro con tres contenidos de Nano óxido de zinc ZnO y Nano óxido de grafeno reducido (RGO) (0,2 %, 0,4 % y 0,6 % en peso de ligante asfáltico) mostrando que un aumento en el porcentaje de Nano ZnO y RGO conduce a un elevación de la estabilidad mecánicas (Marshall), la resistencia a la capacidad de tracción medida de forma indirecta, la tensión acumulada, la resistencia frente a la pérdida de adherencia o al desprendimiento. Por lo tanto, las mezclas modificadas con óxido de calcio en el agregado grueso de arcilla cristalizada tienen una mayor capacidad para mantener su integridad estructural después de la exposición al agua, lo que es crucial para la durabilidad del pavimento en climas húmedos o con frecuentes cambios de temperatura.

#### **4.10. Análisis estadístico**

En esta investigación, se optó por el empleo del análisis de varianza (ANOVA) para evaluar el impacto de la incorporación de óxido de calcio en los agregados gruesos artificiales de arcilla cristalizada en las características y propiedades de las mezclas bituminosas, ya que ANOVA es ideal para comparar las medias de múltiples grupos, en este caso, diferentes concentraciones del óxido de calcio en el agregado grueso y del cemento asfáltico. Este método permite identificar diferencias significativas entre las características volumétricas y mecánicas de la mezcla de asfalto con distintas concentraciones de óxido de calcio en el agregado artificial TMN(1/”2) y de cemento de ligante asfáltico, y controlar la variabilidad inherente a los datos.

#### 4.10.1. Vacíos de aire al adicionar óxido de calcio

El análisis de varianza por ANOVA se realizará examinando las relaciones entre las variables de estudio planteadas, la variable dependiente “vacíos de aire” y la variable independiente “reforzamiento con óxido de calcio”.

##### 4.10.1.1. Prueba de normalidad

Se realizó un estudio estadístico para identificar el comportamiento de la distribución de los valores obtenidos del ensayo de vacíos, para ello se realizó a cabo la prueba de normalidad de los resultados de (%Va) vacíos de aire en la mezcla bituminosa diseñada con agregados artificiales de arcilla reforzadas con diferentes % de óxido de calcio. En el siguiente cuadro se presentan los resultados de la prueba, donde según los valores de las significancias se podrá inferir si es aceptada o rechazada la hipótesis nula formulada.

Hipótesis nula: Los datos de vacíos de aire de la mezcla de asfalto diseñada con agregados grueso-artificiales de arcilla reforzadas con diferentes proporciones de % de óxido de calcio pertenecen a una distribución normal.

**Tabla 33: Prueba de normalidad de vacíos de aire ante la variación de óxido de calcio.**

	Óxido de calcio (%)	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Vacíos de aire (%)	0	,331	3	.	,866	3	,284
	6	,299	3	.	,915	3	,433
	12	,243	3	.	,972	3	,679
	18	,286	3	.	,931	3	,493
	24	,232	3	.	,980	3	,726

a. Corrección de significación de Lilliefors

*Fuente: Elaborado propia con software SPSS*

En el cuadro se puede apreciar que los resultados de significancias dado por Shapiro-Wilk figuran superiores a  $\alpha=0.05$ , por ello se dará por aceptada la hipótesis nula planteada y se infiere que los valores de vacíos de aire de la mezcla diseñada siguen perteneciendo a una distribución normal.

#### 4.10.1.2. Prueba ANOVA

Para evaluar las medias de los datos de % de volumen de vacíos de aire (Va) de la mezcla diseñada con agregados gruesos artificiales de arcilla reforzadas con diferentes % de óxido de calcio se emplea la prueba ANOVA. En el siguiente cuadro se dan a conocer los valores resultantes de la prueba, donde según el valor de la significancia se podrá inferir si la hipótesis nula planteada es aceptada o rechazada.

Hipótesis nula: Los datos de vacíos de aire de la mezcla de asfalto diseñada con áridos gruesos artificiales de arcilla reforzadas con diferentes cantidades de óxido de calcio presentan valores de medias iguales.

**Tabla 34: Prueba ANOVA de vacíos de aire ante variación de óxido de calcio**

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	1,629	4	,407	8,257	,003
Dentro de grupos	,493	10	,049		
Total	2,122	14			

*Fuente: Elaborada propia con software SPSS*

Según lo mostrado en el cuadro, se evidencia que el resultado de significancia es 0.003 menor a  $\alpha=0.05$ , por tanto, se rechaza la hipótesis nula planteada y se infiere que los datos obtenidos de vacíos de aire de la mezcla diseñada presentan valores de medias diferentes.

#### 4.10.1.3. Prueba post hoc Duncan

Al encontrar que los datos de volumen vacíos de aire (Va) en mezclas de asfalto presenta medias diferentes, se opta por usar la prueba post hoc Duncan para comparar estas medias. En el siguiente cuadro se puede ver que existe diferencias estadísticamente significativas entre las medias en los subconjuntos de 24% y 18% de óxido de calcio, 18% y 12%, y el subconjunto de 12%, 6% y 0%. Donde se puede observar que las medias en cada subconjunto presentan significancias de 0.468, 0.078 y 0.106 respectivamente, superiores a la significancia  $\alpha=0.05$ .

**Tabla 35: Prueba post hoc Duncan de vacíos de aire ante distintas proporciones de óxido de calcio**

Óxido de calcio (%)	N	Subconjunto para alfa = 0.05		
		1	2	3
24	3	3,6000		
18	3	3,7367	3,7367	
12	3		4,0933	4,0933
6	3			4,3600
0	3			4,4300
Sig.		,468	,078	,106

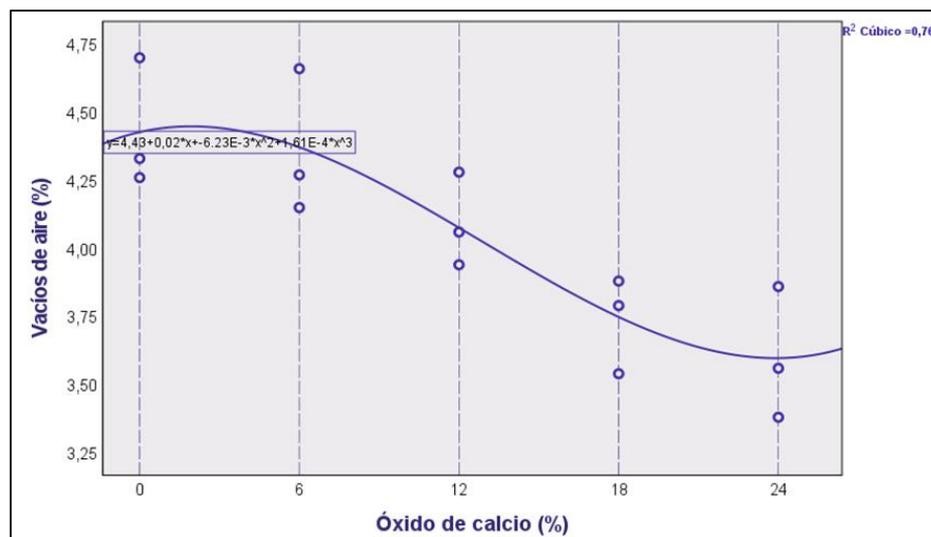
Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

*Fuente: Elaborado propia con software SPSS*

#### 4.10.1.4. Gráfico de dispersión

El gráfico de dispersión muestra la correlación entre las variables analizadas, además de poder ver cómo están distribuidos los datos de los vacíos de aire (%va) del diseño del mezclado asfalto. Según lo representado en el gráfico, se evidencia que la tendencia es descendente con un coeficiente de determinación  $R^2$  es de 0.767, esto nos indica que el 76.7% de los vacíos de aire están influenciados debido a la incorporación de óxido calcio en el agregado grueso artificiales de la mezcla diseñada, indicando una correlación media entre los vacíos de aire resultantes y el óxido de calcio adicionado.

**Figura 30: Gráfico de dispersión de vacíos de aire ante variación de óxido de calcio.**



*Fuente: Elaboración propia con software SPSS*

#### 4.10.2. Peso unitario al Añadir óxido calcio

El análisis de varianza por ANOVA se llevará a cabo los análisis de relación entre las variables del estudio planteadas, la variable dependiente “peso unitario” y la variable independiente “agregado grueso por la arcilla cristalizada reforzado con oxido de calcio”.

##### 4.10.2.1. Prueba de normalidad

Para hallar la distribución de los valores registrados del ensayo de vacíos ( $V_a$ ) se llevó a cabo una prueba de normalidad de los valores correspondientes al peso unitario en la mezcla asfáltica diseñada con agregados gruesos artificiales de arcilla reforzadas con varias % de óxido de calcio. En el siguiente cuadro se presentan los resultados de la prueba, donde según los valores de las significancias se podrá inferir si la hipótesis nula planteada esto es aceptada o rechazada.

Hipótesis nula: Los datos de peso unitario del mezclado asfáltica diseñada con agregados gruesos artificiales de arcilla reforzadas con diferentes % de óxido calcio pertenecen a una distribución normal.

**Tabla 36: Prueba de normalidad de peso unitario ante variación de óxido de calcio.**

	Óxido de calcio (%)	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Peso unitario (gr/cm <sup>3</sup> )	0	,321	3	.	,881	3	,328
	6	,301	3	.	,912	3	,424
	12	,232	3	.	,980	3	,726
	18	,232	3	.	,980	3	,726
	24	,238	3	.	,976	3	,702

a. Corrección de significación de Lilliefors

*Fuente: Elaboración propia con software SPSS*

En el cuadro mostrado, se evidencia que los resultados de significancias según Shapiro-Wilk muestran superiores a  $\alpha=0.05$ , por tanto, se aceptará la hipótesis nula planteada y se deduce que los valores del peso unitario de la mezcla diseñada corresponden a una distribución normal.

##### 4.10.2.2. Prueba ANOVA

Para evaluar las medias de los datos de porcentaje de peso unitario de la mezcla diseñada con agregados gruesos artificiales de arcilla reforzadas con diferentes contenidos de óxido de calcio se emplea la prueba ANOVA. En el cuadro se muestran los valores hallados de las pruebas, donde según el valor de la significancia se podrá inferir si la hipótesis nula propuesta se aceptada o descartada(rechazada).

Hipótesis nula: Los datos de peso unitario de la mezcla asfáltica diseñada a base de agregados artificiales de arcilla reforzada con diferentes contenidos de óxido calcio presentan valores de medias iguales.

**Tabla 37: Prueba ANOVA de peso unitario ante variación de óxido de calcio.**

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	,001	4	,000	8,334	,003
Dentro de grupos	,000	10	,000		
Total	,001	14			

*Fuente: Elaboración propia con software SPSS*

En el cuadro se puede ver que el resultado de significancia es 0.003 evidenciando menor a  $\alpha=0.05$ , en consecuencia, se rechaza la hipótesis nula planteada y se infiere que los valores de peso unitario de la mezcla diseñada presentan valores de medias diferentes.

#### 4.10.2.3. Prueba post hoc Duncan

Al encontrar que los datos de peso unitario presentan medias diferentes, se opta por usar la prueba post hoc Duncan para comparar estas medias. En el siguiente cuadro se evidencia que hay diferencias significativas entre las medias en los subconjuntos de 0%, 6% y 12% de óxido de calcio, 12% y 18%, y el subconjunto de 18% y 24%. Donde se puede observar que las medias en cada subconjunto presentan significancias de 0.088, 0.087 y 0.465 respectivamente, superiores a la significancia  $\alpha=0.05$ .

**Tabla 38: Prueba post hoc Duncan de peso unitario ante variación de óxido de calcio**

Óxido de calcio (%)	N	Subconjunto para alfa = 0.05		
		1	2	3
0	3	2,30867		
6	3	2,31067		
12	3	2,31733	2,31733	
18	3		2,32567	2,32567
24	3			2,32900
Sig.		,088	,087	,465

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

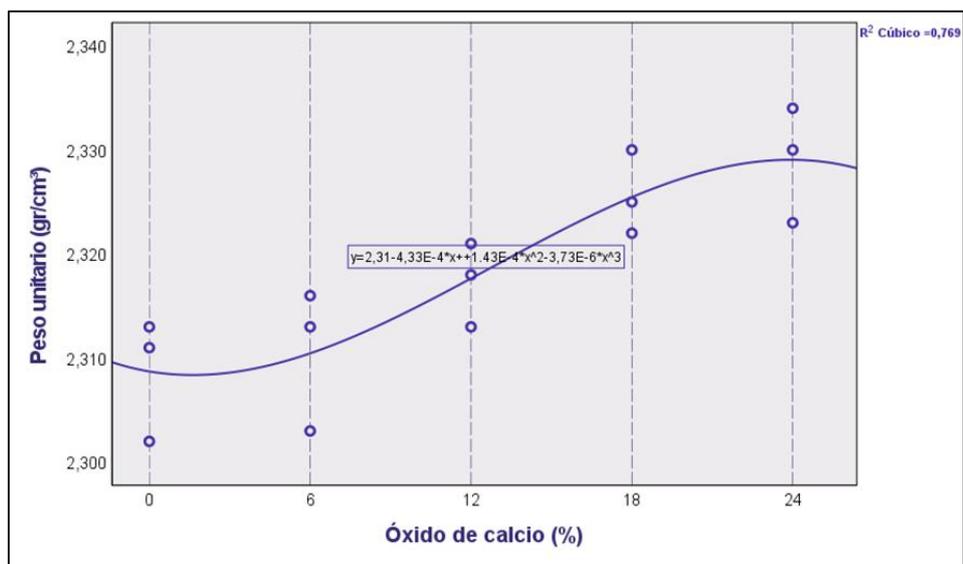
*Fuente: Elaborada propia con software SPSS*

#### 4.10.2.4. Gráfico de dispersión

El gráfico de dispersión muestra la relación entre las variables de estudio, además de poder ver cómo están distribuidos los valores de peso volumétrico(unitario) de la mezcla bituminosa

diseñada. En el gráfico se evidencia que la tendencia es ascendente con un coeficiente de determinación  $R^2$  es de 0.769, por lo que nos da a conocer que el 76.9% del peso unitario están influenciados con el agregado grueso por la arcilla cristalizada reforzado con oxido de calcio a la mezcla diseñada, indicando una correlación media entre el peso unitario resultante y el óxido de calcio adicionado.

**Figura 31: Gráfico de dispersión de peso unitario ante variación de óxido de calcio.**



*Fuente: Elaboración propia con software SPSS*

#### 4.10.3. Estabilidad al incorporar óxido de calcio al AG

El análisis de varianza por ANOVA se hará la examinación de relación que existe entre las variables de estudio planteadas, la variable dependiente “estabilidad” y la variable independiente “agregado grueso por la arcilla cristalizada reforzado con oxido de calcio”.

##### 4.10.3.1. Prueba de normalidad

Para el propósito de conocer la distribución de los valores obtenidos del ensayo mecánico Marshall se efectuó la verificación de la prueba de normalidad de los resultados de la estabilidad en la mezcla bituminosa diseñada con agregados gruesos artificiales de arcilla reforzadas en proporciones diferentes de óxido calcio. En el cuadro se detallan los datos de la prueba, donde según los valores de las significancias se podrá inferir si corresponde a rechazar o aceptar la hipótesis nula establecida.

Hipótesis nula: Los datos de estabilidad de la mezcla asfáltica diseñada con agregados gruesos artificiales de arcilla reforzadas con diferentes proporciones de óxido de calcio pertenecen a una distribución normal.

**Tabla 39: Prueba de normalidad de estabilidad ante variación de óxido de calcio.**

	Óxido de calcio (%)	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Estabilidad (kg)	0	,314	3	.	,892	3	,361
	6	,286	3	.	,931	3	,493
	12	,276	3	.	,942	3	,536
	18	,314	3	.	,892	3	,361
	24	,275	3	.	,944	3	,542

a. Corrección de significación de Lilliefors

*Fuente: Elaborada propia con software SPSS*

En el cuadro se aprecia que los resultados de significancias por Shapiro-Wilk son superiores a  $\alpha=0.05$ , por lo que se aceptará la hipótesis nula planteada y se infiere que los datos de estabilidad de la mezcla diseñada corresponden a una distribución normal.

#### 4.10.3.2. Prueba ANOVA

Para evaluar las medias de los valores relacionados con estabilidad de la mezcla de asfalto diseñada con agregados gruesos artificiales de arcilla reforzadas con diversas variaciones de óxido calcio se emplea la prueba ANOVA. En el siguiente cuadro se dan a conocer los resultados de la prueba, donde según el valor de la significancia se podrá inferir si esto es aceptada o rechazada la hipótesis nula planteada.

Hipótesis nula: Los datos de estabilidad de la mezcla bituminosa diseñada con agregados gruesos artificiales de arcilla reforzadas con diferentes dosis en % de óxido de calcio presentan valores de medias iguales.

**Tabla 40: Prueba ANOVA de estabilidad ante variación de óxido de calcio.**

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	27181,891	4	6795,473	7,043	,006
Dentro de grupos	9647,913	10	964,791		
Total	36829,804	14			

*Fuente: Elaboración propia con software SPSS*

En la tabla se aprecia que los valores de significancia es 0.006 mucho menor a  $\alpha=0.05$ , por tanto, debe rechazarse la hipótesis nula planteada y se infiere que los valores de estabilidad de la mezcla diseñada presentan valores de medias diferentes.

#### 4.10.3.3. Prueba post hoc Duncan

Al encontrar que los datos de estabilidad presentan medias diferentes, se opta por usar la prueba post hoc Duncan para comparar estas medias. En el siguiente cuadro se puede ver que presentan algunas diferencias significativas entre las medias en los subconjuntos de 0%, 6% y 12% de óxido de calcio, y el subconjunto de 24% y 18%. Donde se puede observar que las medias en cada subconjunto presentan significancias de 0.373 y 0.959 respectivamente, superiores a la significancia  $\alpha=0.05$ .

**Tabla 41: Prueba post hoc Duncan de estabilidad ante variación de óxido de calcio.**

Óxido de calcio (%)	N	Subconjunto para alfa = 0.05	
		1	2
0	3	487,133	
6	3	502,833	
12	3	511,933	
24	3		585,333
18	3		586,667
Sig.		,373	,959

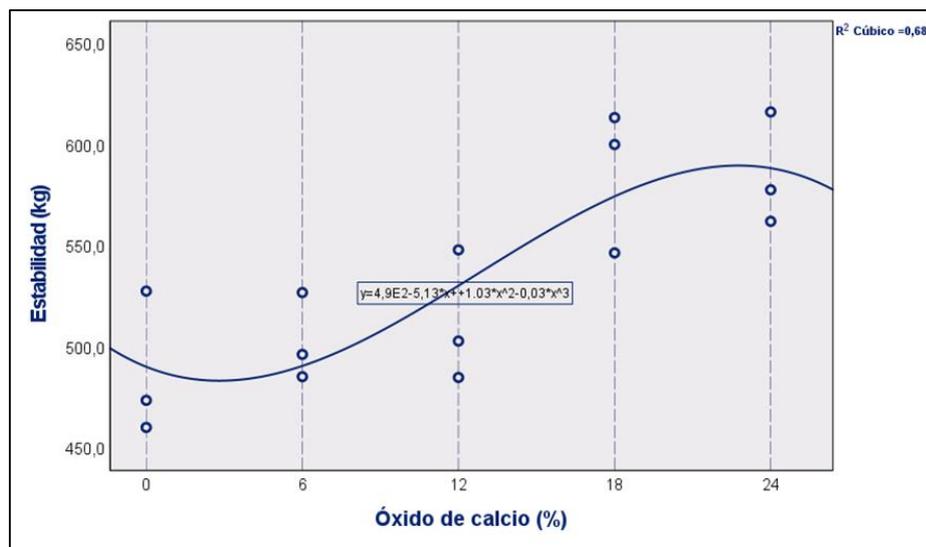
Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

*Fuente: Elaborado propia con software SPSS*

#### 4.10.3.4. Gráfico de dispersión

En el gráfico de dispersión muestra la relación entre las variables de estudio, además de poder ver cómo están distribuidos los datos de estabilidad de la mezcla diseñada. En el gráfico se evidencia que la tendencia es ascendente con un coeficiente de determinación  $R^2$  es de 0.685, lo que no da de indicar que el 68.5% de la estabilidad están influenciados por la incorporación de óxido de calcio a los agregados gruesos artificiales de arcilla a la mezcla diseñada, indicando una correlación media entre la estabilidad resultante y el óxido de calcio adicionado.

**Figura 32: Gráfico de dispersión de estabilidad ante variación de óxido de calcio.**



*Fuente: Elaborada propia con software SPSS*

#### **4.10.4. Flujo al incorporar óxido de calcio al AG**

El análisis de varianza por ANOVA se llevará a cabo la examinación entre las variables de estudio planteadas, la variable dependiente “flujo” y la variable independiente “agregado grueso por la arcilla cristalizada reforzado con oxido de calcio”

##### **4.10.4.1. Prueba de normalidad**

A fin de estimar la distribución de los resultados obtenidos de las pruebas Marshall se procedió a realizar la prueba de normalidad de los valores del flujo (fluencia) en la mezcla de asfalto diseñada con agregados gruesos artificiales de arcilla reforzadas con diferentes contenidos de óxido calcio. Los resultados de la prueba están expuestos en el cuadro en seguida, donde según los valores de las significancias se podrá inferir si la hipótesis nula planteada debe ser aceptable o rechazada.

Hipótesis nula: Los datos de flujo de la mezcla asfáltica diseñada con agregados gruesos artificiales de arcilla reforzadas con variaciones de óxido de calcio pertenecen a una distribución normal.

**Tabla 42: Prueba de normalidad de flujo ante variación de óxido de calcio**

	Óxido de calcio (%)	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Flujo (mm)	0	,356	3	.	,816	3	,154
	6	,188	3	.	,998	3	,910
	12	,222	3	.	,985	3	,769
	18	,290	3	.	,925	3	,471
	24	,336	3	.	,856	3	,258

a. Corrección de significación de Lilliefors

*Fuente: Elaboración propia con software SPSS*

En el cuadro se evidencia que los resultados de significancias dadas Shapiro-Wilk son superiores a  $\alpha=0.05$ , en consecuencia, se aceptará la hipótesis nula planteada y se infiere que los datos de la fluencia de la mezcla diseñada corresponden a una distribución normal.

#### 4.10.4.2. Prueba ANOVA

Para analizar las medias de los valores del flujo obtenidas de la mezcla diseñada con agregados gruesos artificiales de arcilla reforzadas con diferentes proporciones de óxido de calcio se emplea la prueba ANOVA. En el cuadro se dan a conocer los resultados encontrados de la prueba, donde según el valor de la significancia se podrá inferir si será rechazada o será aceptada la hipótesis nula planteada.

Hipótesis nula: Los datos de la fluencia de la mezcla asfáltica diseñada con agregados artificiales de arcilla reforzadas con diferentes variaciones %óxido de calcio, presentan valores de medias iguales.

**Tabla 43: Prueba ANOVA de flujo ante variación de óxido de calcio.**

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	3,576	4	,894	10,607	,001
Dentro de grupos	,843	10	,084		
Total	4,419	14			

*Fuente: Elaboración propia con software SPSS*

En el cuadro se puede notar que el resultado de significancia es 0.001 inferior a  $\alpha=0.05$ , por consiguiente, es rechazada la hipótesis nula planteada y se infiere que los resultados de flujo de la mezcla diseñada presentan valores de medias diferentes.

#### 4.10.4.3. Prueba post hoc Duncan

Al encontrar que los datos de flujo presentan medias diferentes, se opta por usar la prueba post hoc Duncan para comparar estas medias. En el siguiente cuadro se puede ver que hay

diferencias significativas entre las medias en los subconjuntos de 24% y 18% de óxido de calcio, y el subconjunto de 12%, 6% y 0%. Donde se puede observar que las medias en cada subconjunto presentan significancias de 0.120 y 0.163 respectivamente, superiores a la significancia  $\alpha=0.05$ .

**Tabla 44: Prueba post hoc Duncan de flujo ante variación de óxido de calcio**

Óxido de calcio (%)	N	Subconjunto para alfa = 0.05	
		1	2
24	3	1,8100	
18	3	2,2133	
12	3		2,7733
6	3		2,9067
0	3		3,1467
Sig.		,120	,163

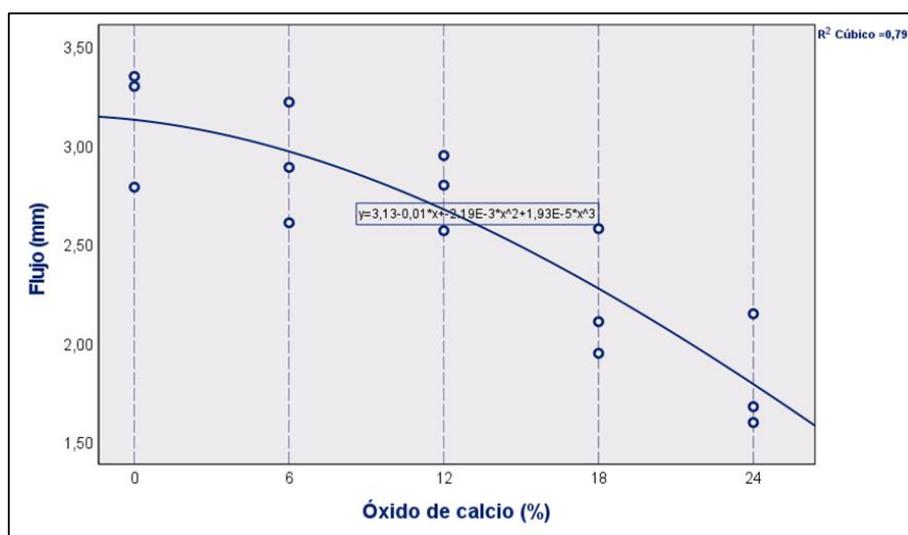
Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

*Fuente: Elaborada propia con software SPSS*

#### 4.10.4.4. Gráfico de dispersión

El gráfico de dispersión muestra la relación entre las variables de estudio, además de poder ver cómo están distribuidos los datos de flujo de la mezcla diseñada. En el gráfico se evidencia que la tendencia es descendente con un coeficiente de determinación  $R^2$  es de 0.797, esto señala que el 79.7% del flujo están influenciados por la inclusión de óxido calcio a los áridos gruesos artificiales de arcilla a la mezcla diseñada, indicando una correlación media entre el flujo resultante y el óxido de calcio adicionado.

**Figura 33: Gráfico de dispersión de flujo ante variación de óxido de calcio.**



*Fuente: Elaboración propia con software SPSS*

#### 4.10.5. Resistencia retenida al añadir óxido de calcio al AG

El análisis de varianza por ANOVA, se realizará un examen sobre la relación entre las variables de estudio planteadas, la variable dependiente “resistencia retenida” y la variable independiente “agregado grueso por la arcilla cristalizada reforzado con oxido de calcio”.

##### 4.10.5.1. Prueba de normalidad

Para encontrar la distribución de los datos obtenidos de la prueba de ensayo Inmersión-compresión se efectuó la prueba de normalidad de los valores de resistencia retenida en la mezcla asfáltica diseñada con agregados gruesos artificiales de arcilla reforzadas con proporciones de óxido calcio. En el cuadro se detallan los resultados de la prueba, donde según los valores de las significancias se podrá inferir la aceptación o el rechazo de la hipótesis nula planteada.

Hipótesis nula: Los datos de resistencia retenida de la mezcla bituminosa diseñada con agregados gruesos artificiales de arcilla reforzadas con diferentes proporciones de óxido de calcio pertenecen a una distribución normal.

**Tabla 45: Prueba de normalidad de resistencia retenida según la variación de óxido de calcio**

	Óxido de calcio (%)	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Resistencia retenida (%)	0	,245	3	.	,971	3	,672
	6	,254	3	.	,963	3	,633
	12	,234	3	.	,978	3	,718
	18	,215	3	.	,989	3	,800
	24	,233	3	.	,979	3	,721

a. Corrección de significación de Lilliefors

*Fuente: Elaboración propia con software SPSS*

En el cuadro se evidencia que los resultados de significancias según Shapiro-Wilk son superiores a  $\alpha=0.05$ , por tanto, se aceptará la hipótesis nula planteada y se infiere que los datos de ensayo (resistencia retenida) de la mezcla diseñada son pertenecidas a una distribución normal.

##### 4.10.5.2. Prueba ANOVA

Para evaluar las medias de los datos de resistencia retenida de la mezcla diseñada con agregados gruesos artificiales de arcilla reforzadas con varias proporciones de óxido de calcio se aplica el análisis de varianza ANOVA. En el siguiente cuadro se muestran los resultados de la prueba,

donde según el valor de la significancia se podrá inferir si deber ser rechazada se aceptada la hipótesis nula planteada.

Hipótesis nula: Los datos de resistencia retenida de la mezcla asfáltica diseñada con agregados gruesos artificiales de arcilla reforzadas con diferentes dosis de óxido de calcio presentan valores de medias iguales.

**Tabla 46: Prueba ANOVA de resistencia retenida ante variación de óxido de calcio**

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	594,292	4	148,573	13,689	<.001
Dentro de grupos	108,538	10	10,854		
Total	702,830	14			

*Fuente: Elaboración propia con software SPSS*

En el cuadro se pueden apreciar que los resultados de significancia son menores a 0.001, evidentemente inferior a  $\alpha=0.05$ , por consiguiente, la hipótesis nula planteada y se infiere que los valores de resistencia retenida de la mezcla diseñada presentan valores de medias diferentes.

#### 4.10.5.3. Prueba post hoc Duncan

Al encontrar que los datos de resistencia retenida presentan medias diferentes, se opta por usar la prueba post hoc Duncan para comparar estas medias. En el siguiente cuadro se puede evidenciar que presentan diferencias significativas entre las medias en los subconjuntos de 0% de óxido de calcio, 6% y 12%, 12% y 18%, y el subconjunto de 18% y 24%. Donde se puede observar que las medias en cada subconjunto presentan significancias de 1.000, 0.212, 0.081 y 0.304 respectivamente, superiores a la significancia  $\alpha=0.05$ .

**Tabla 47: Prueba post hoc Duncan de resistencia retenida ante variación de óxido de calcio**

Óxido de calcio (%)	N	Subconjunto para alfa = 0.05			
		1	2	3	4
0	3	49,0833			
6	3		55,0800		
12	3		58,6633	58,6633	
18	3			63,8867	63,8867
24	3				66,8000
Sig.		1,000	,212	,081	,304

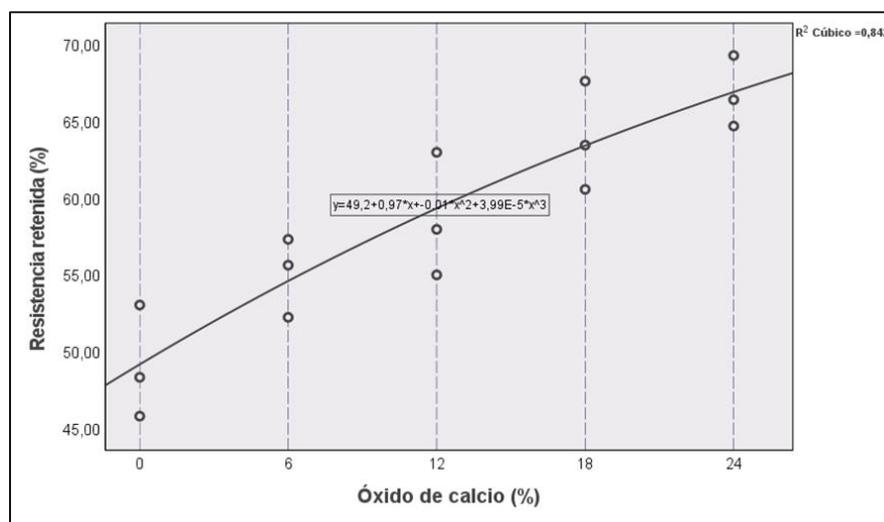
Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

*Fuente: Elaborada propia con software SPSS*

#### 4.10.5.4. Gráfico de dispersión

El gráfico de dispersión muestra la relación entre las variables de estudio, además de poder ver cómo están distribuidos los datos de resistencia retenida de la mezcla diseñada. En el gráfico se evidencia que la tendencia es ascendente con un coeficiente de determinación  $R^2$  es de 0.842, lo que nos indica que el 84.2% de la resistencia retenida están influenciados por la incorporación de óxido de calcio en los agregados artificiales de arcilla a la mezcla diseñada, indicando una correlación alta entre la resistencia retenida resultante y el óxido de calcio adicionado.

**Figura 34: Gráfico de dispersión de resistencia retenida ante variación de óxido de calcio.**



*Fuente: Elaboración propia con software SPSS*

#### 4.10.6. Estabilidad al variar el cemento asfáltico

El análisis de varianza por ANOVA se realizará examinando las relaciones entre las variables de estudio planteadas, la variable dependiente “estabilidad por tipo de tráfico” y la variable independiente “contenido de cemento asfáltico”.

##### 4.10.6.1. Prueba de normalidad

Para conocer cómo se distribuyen los datos de la prueba mecánica de ensayo de Marshall se desarrolló la prueba de normalidad de los resultados de estabilidad mecánica en la mezcla bituminosas, esto diseñadas con la óptima dosis de óxido de calcio encontrado variando el porcentaje de aglutinante asfáltico dependiendo del tipo de tráfico aplicado. A continuación, se expone los resultados de la prueba, donde según los valores de las significancias se podrá inferir si debe ser aceptado o rechazada la hipótesis nula formulada.

Hipótesis nula: Los resultados de estabilidad de la mezcla asfáltica diseñada con el óptimo de óxido de calcio variando el porcentaje de cemento asfáltico y aplicado para cada Nivel o tipo de tráfico pertenecen a una distribución normal.

**Tabla 48: Prueba de normalidad de estabilidad ante variación de cemento asfáltico**

	Cemento asfáltico (%)	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Estabilidad (kg) - Tráfico medio	4,00	,212	3	.	,990	3	,813
	4,50	,316	3	.	,889	3	,352
	5,00	,346	3	.	,838	3	,209
	5,50	,244	3	.	,972	3	,678
	6,00	,204	3	.	,994	3	,846
	6,50	,329	3	.	,868	3	,291
Estabilidad (kg) - Tráfico bajo	4,00	,320	3	.	,884	3	,336
	4,50	,274	3	.	,944	3	,544
	5,00	,196	3	.	,996	3	,876
	5,50	,327	3	.	,871	3	,299
	6,00	,212	3	.	,990	3	,811
	6,50	,296	3	.	,919	3	,448

a. Corrección de significación de Lilliefors

*Fuente: Elaborada propia con software SPSS*

En el cuadro mostrado se puede ver que los resultados de significancias por Shapiro-Wilk son superiores a  $\alpha=0.05$ , por ende, será aceptada la hipótesis nula planteada y se infiere que los valores de estabilidad de la mezcla diseñada por cada tipo de tráfico y al variar el porcentaje de cemento asfáltico corresponden a una distribución de tipo normal.

#### 4.10.6.2. Prueba ANOVA

Para evaluar las medias de los resultados de las pruebas de estabilidad de la mezcla diseñada con el óptimo de óxido de calcio en el agregado gruesos de arcilla cristalizada encontrado variando la proporción del cemento asfalto dependiendo del nivel de tráfico, se emplea la prueba ANOVA. En el cuadro, se exhiben los resultados dados de la prueba, donde según el valor de la significancia se podrá inferir si rechaza la hipótesis nula planteada debe ser rechazada o aceptada.

Hipótesis nula: Los datos de estabilidad de la mezcla asfáltica diseñada con el óptimo de óxido de calcio añadida al agregado grueso variando el porcentaje del ligante asfáltico y por cada tipo de tráfico presentan valores de medias iguales.

**Tabla 49: Prueba ANOVA de estabilidad ante variación de cemento asfáltico.**

		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Estabilidad (kg) - Tráfico medio	Entre grupos	205132,705	5	41026,541	44,489	<.001
	Dentro de grupos	11066,160	12	922,180		
	Total	216198,865	17			
Estabilidad (kg) - Tráfico bajo	Entre grupos	119143,403	5	23828,681	20,646	<.001
	Dentro de grupos	13849,907	12	1154,159		
	Total	132993,309	17			

*Fuente: Elaboración propia con software SPSS*

En el cuadro se puede ver que los resultados de significancia son menores a 0.001, evidentemente inferiores a  $\alpha=0.05$ , debido a esto, se rechaza la hipótesis nula planteada y se infiere que los resultados dados de ensayo de estabilidad de la mezcla diseñada con la variación del contenido de cemento asfáltico y en función del nivel de tráfico presentan valores de medias diferentes.

#### 4.10.6.3. Prueba post hoc Duncan

Al encontrar que los datos de estabilidad para un tráfico medio presentan medias diferentes, se opta por usar la prueba post hoc Duncan para comparar estas medias. En el siguiente cuadro se puede ver que presentan diferencias significativas en relación de las medias en los subconjuntos de 4% de cemento asfáltico, 4.5% y 6.5%, 6.5% y 6%, y el subconjunto de 6%, 5% y 5.5%. Donde se puede observar que las medias en cada subconjunto presentan significancias de 1.000, 0.335, 0.059 y 0.056 respectivamente, superiores a la significancia  $\alpha=0.05$ .

**Tabla 50: Prueba post hoc Duncan de estabilidad ante variación de cemento asfáltico para tráfico medio**

Cemento asfáltico (%)	N	Subconjunto para alfa = 0.05			
		1	2	3	4
4,00	3	262,967			
4,50	3		455,533		
6,50	3		480,433	480,433	
6,00	3			532,167	532,167
5,00	3				560,433
5,50	3				587,167
Sig.		1,000	,335	,059	,056

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

*Fuente: Elaborada propia con software SPSS*

Y al encontrar que los datos de estabilidad para un tráfico bajo también presentan medias diferentes, se opta por usar la prueba post hoc Duncan para comparar estas medias. En el siguiente cuadro se evidencian que existe diferencias significativas entre las medias en los subconjuntos de 4% de cemento asfáltico, 4.5%, y el subconjunto de 6.5%, 6%, 5% y 5.5%.

Donde se puede observar que las medias en cada subconjunto presentan significancias de 1.000, 1.000 y 0.069 respectivamente, superiores a la significancia  $\alpha=0.05$ .

**Tabla 51: Prueba post hoc Duncan de estabilidad ante variación de cemento asfáltico para tráfico bajo**

Cemento asfáltico (%)	N	Subconjunto para alfa = 0.05		
		1	2	3
4,00	3	347,133		
4,50	3		463,533	
6,50	3			524,333
6,00	3			557,800
5,00	3			565,933
5,50	3			583,900
Sig.		1,000	1,000	,069

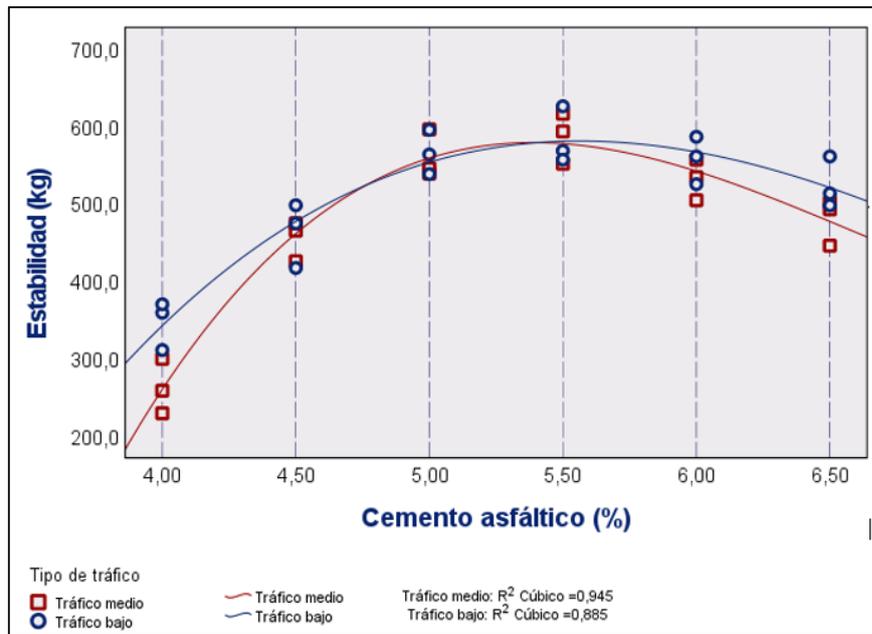
Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

*Fuente: Elaborado propia con software SPSS*

#### 4.10.6.4. Gráfico de dispersión

El gráfico de dispersión muestra la relación entre las variables de estudio, además de poder ver cómo están distribuidos los datos de estabilidad de la mezcla diseñada por cada tipo de tráfico. En el gráfico se evidencia que para los resultados de estabilidad a un tráfico medio la tendencia es ascendente no constante con un factor de determinación  $R^2$  de 0.945, de ello deduce que el 94.5% de la estabilidad están influenciados por el cemento asfáltico aplicado a la mezcla diseñada con agregados artificiales de arcilla, indicando una correlación muy alta entre la estabilidad resultante a un tráfico medio y el cemento asfáltico. También se evidencia que para los resultados de estabilidad a un tráfico bajo la tendencia es ascendente no constante con un factor de coeficiente de determinación  $R^2$  es de 0.885, esto nos de entender que el 88.5% de la estabilidad están influenciados por el cemento asfáltico aplicado a la mezcla diseñada con agregados artificiales de arcilla, indicando una correlación alta entre la estabilidad resultante a un tráfico bajo y el C.A.

**Figura 35: Gráfico de dispersión de estabilidad ante variación de cemento asfáltico.**



*Fuente: Elaboración propia con software SPSS*

#### 4.10.7. Flujo al variar el cemento asfáltico

El análisis de varianza por ANOVA se realizará examinando las relaciones entre las variables de estudio planteadas, la variable dependiente “flujo por tipo de tráfico” y la variable independiente “Contenido en % de cemento asfáltico”.

##### 4.10.7.1. Prueba de normalidad

Con fin de identificar de cómo se distribuyen los datos extraídos del ensayo Marshall, se realizó la verificación de la prueba de normalidad de los resultados obtenidos del flujo en la mezcla bituminosa diseñada con el óptimo de óxido de calcio encontrado variando el % de ligante de asfalto esto dependiendo del tipo de tráfico aplicado. En el cuadro siguiente se proporciona los resultados de la prueba, donde según los valores de las significancias se podrá inferir si corresponden a rechazar o a aceptar la hipótesis nula planteada.

Hipótesis nula: Los datos de la fluencia de la mezcla bituminosa diseñada con el óptimo de óxido de calcio adicionado al árido grueso variando el porcentaje de betún de asfalto y por cada nivel de tráfico, corresponden a una distribución normal.

**Tabla 52: Prueba de normalidad de flujo ante variación de cemento asfáltico.**

	Cemento asfáltico (%)	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Flujo (mm) - Tráfico medio	4,00	,316	3	.	,890	3	,354
	4,50	,267	3	.	,951	3	,576
	5,00	,263	3	.	,956	3	,595
	5,50	,210	3	.	,991	3	,821
	6,00	,278	3	.	,940	3	,526
	6,50	,312	3	.	,896	3	,373
Flujo (mm) - Tráfico bajo	4,00	,236	3	.	,977	3	,712
	4,50	,323	3	.	,878	3	,320
	5,00	,232	3	.	,980	3	,726
	5,50	,211	3	.	,991	3	,817
	6,00	,176	3	.	1,000	3	,984
	6,50	,321	3	.	,881	3	,328

a. Corrección de significación de Lilliefors

*Fuente: Elaborada propia con software SPSS*

En el cuadro se evidencia que los resultados de significancias por Shapiro-Wilk son superiores a  $\alpha=0.05$ , en consecuencia, se aceptará la hipótesis nula planteada y se infiere que los datos de flujo de la mezcla diseñada por cada tipo de tráfico y al variar el porcentaje de cemento asfáltico pertenecen a una distribución normal.

#### 4.10.7.2. Prueba ANOVA

Para seguir con la evaluación de las medias de los valores de la fluencia de la mezcla asfalto diseñada con el óptimo de óxido de calcio en el agregado grueso de arcilla cristalizada encontrado variando la proporción del ligante asfáltico dependiendo de cada categoría de Nivel tráfico, se emplea la prueba ANOVA. En el siguiente cuadro se dan a conocer los resultados obtenidas de la prueba, donde según el valor de la significancia se podrá inferir si esto debe ser aceptada o rechazada la hipótesis nula formulada.

Hipótesis nula: Los datos de la fluidez de la mezcla bituminosa diseñada con el óptimo de óxido de calcio en el agregado grueso de arcilla cristalizada variando la cantidad del ligante asfáltico y por el nivel de tipo de tráfico presentan valores de medias iguales.

**Tabla 53: Prueba ANOVA de flujo ante variación de cemento asfáltico.**

		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Flujo (mm) - Tráfico medio	Entre grupos	7,469	5	1,494	25,877	<.001
	Dentro de grupos	,693	12	,058		
	Total	8,162	17			
Flujo (mm) - Tráfico bajo	Entre grupos	3,246	5	,649	10,403	<.001
	Dentro de grupos	,749	12	,062		
	Total	3,995	17			

*Fuente: Elaboración propia con software SPSS*

En el cuadro se observa que los resultados de significancia son menores a 0.001, evidentemente inferiores a  $\alpha=0.05$ , por lo que se rechaza la hipótesis nula planteada y se infiere que los datos del flujo de la mezcla diseñada al variar la cantidad del ligante asfáltico y por cada tipo de tráfico presentan valores de medias diferentes.

#### 4.10.7.3. Prueba post hoc Duncan

Al encontrar que los datos de flujo para un tráfico medio presentan medias diferentes, se opta por usar la prueba post hoc Duncan para comparar estas medias. En el siguiente cuadro se puede apreciar que existe diferencias significativas en relación de las medias en los subconjuntos de 4%, 5% y 4.5% de cemento asfáltico, 5%, 4.5% y 5.5%, 6%, y el subconjunto de 6.5%. Donde se puede observar que las medias en cada subconjunto presentan significancias de 0.273, 0.167, 1.000 y 1.000 respectivamente, superiores a la significancia  $\alpha=0.05$ .

**Tabla 54: Prueba post hoc Duncan de flujo ante variación de cemento asfáltico para tráfico medio.**

Cemento asfáltico (%)	N	Subconjunto para alfa = 0.05			
		1	2	3	4
4,00	3	1,6733			
5,00	3	1,9033	1,9033		
4,50	3	1,9100	1,9100		
5,50	3		2,2067		
6,00	3			2,8867	
6,50	3				3,5033
Sig.		,273	,167	1,000	1,000

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

*Fuente: Elaboración propia con software SPSS*

Y al encontrar que los datos de flujo para un tráfico bajo también presentan medias diferentes, se opta por usar la prueba post hoc Duncan para comparar estas medias. En el siguiente cuadro se puede evidenciar que hay diferencias significativas entre las medias en los subconjuntos de 4%, 4.5%, 5% y 5.5% de cemento asfáltico, 5.5% y 6%, y el subconjunto de 6.5%. Donde se puede observar que las medias en cada subconjunto presentan significancias de 0.134, 0.097 y 1.000 respectivamente, superiores a la significancia  $\alpha=0.05$ .

**Tabla 55: Prueba post hoc Duncan de flujo ante variación de cemento asfáltico para tráfico bajo**

Cemento asfáltico (%)	N	Subconjunto para alfa = 0.05		
		1	2	3
4,00	3	1,5667		
4,50	3	1,7167		
5,00	3	1,7567		
5,50	3	1,9200	1,9200	
6,00	3		2,2867	
6,50	3			2,8167
Sig.		,134	,097	1,000

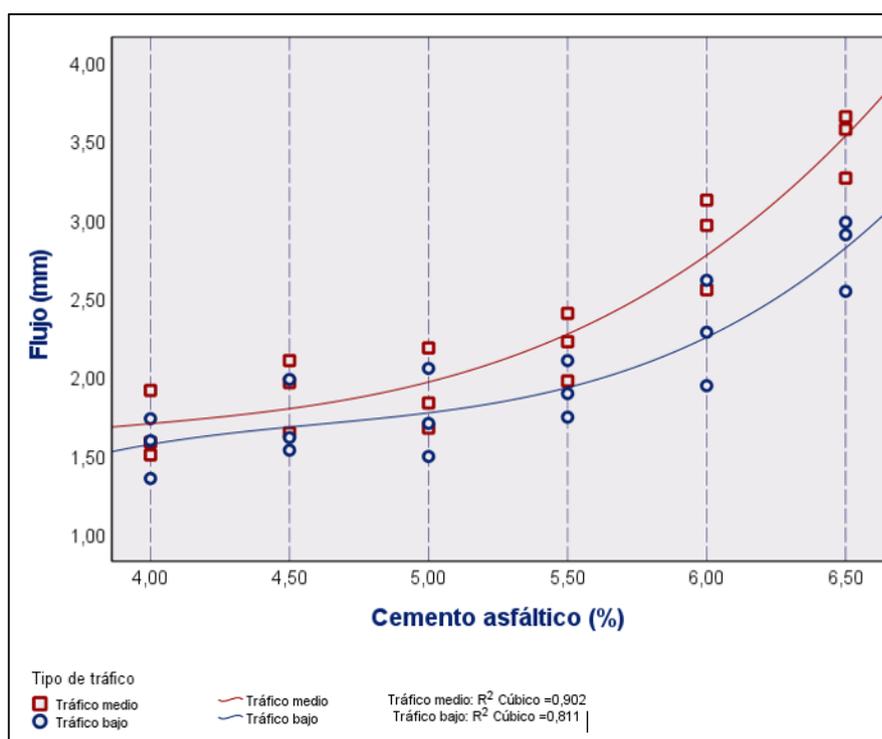
Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

*Fuente: Elaborada propia con software SPSS*

#### 4.10.7.4. Gráfico de dispersión

El gráfico de dispersión muestra la relación entre las variables de estudio, además de poder ver cómo están distribuidos los datos de flujo de la mezcla diseñada por cada tipo de tráfico. En el gráfico se evidencia que para los resultados de flujo a un tráfico medio la tendencia es ascendente con un coeficiente y factor de determinación  $R^2$  es de 0.902, lo que nos da de señalar que el 90.2% del flujo están influenciados por el cemento asfáltico aplicado a la mezcla diseñada con agregados gruesos artificiales de arcilla, indicando una correlación alta entre el flujo resultante a un tráfico medio y el cemento asfáltico. También se evidencia que para los resultados de flujo a un tráfico bajo la tendencia es ascendente con un factor de coeficiente de determinación  $R^2$  es de 0.811, lo que da a entender que el 81.1% del flujo están influenciados por el cemento asfáltico aplicado a la mezcla diseñada con agregados artificiales de arcilla, indicando una correlación media alta entre el flujo resultante a un tráfico bajo y el C. asfáltico.

**Figura 36: Gráfico de dispersión de flujo ante variación de cemento asfáltico.**



*Fuente: Elaboración propia con software SPSS*

#### 4.10.8. Vacíos de aire al variar el cemento asfáltico

El análisis de varianza por ANOVA se realizará examinando las relaciones entre las variables de estudio planteadas, la variable dependiente “vacíos de aire por tipo de tráfico” y la variable independiente “porcentaje de cemento asfáltico”.

##### 4.10.8.1. Prueba de normalidad

Para analizar de cómo se distribuyen los datos obtenidos del ensayo de Volumen de Vacíos ( $V_a$ ) se efectuó la prueba de normalidad de los resultados de espacios de vacíos de aire en la mezcla bituminosa diseñada con la cantidad óptima de óxido de calcio respecto a la variación del porcentaje de ligante asfalto dependiendo del tipo de tráfico aplicado. En la tabla siguiente se detallan los valores de la prueba, donde según los valores de las significancias se podrá inferir si debe ser rechazada o aceptada la hipótesis nula planteada.

Hipótesis nula: Los datos de vacíos de aire de la mezcla bituminosa diseñada con la cantidad óptima de óxido de calcio en el agregado grueso de arcilla variando el porcentaje de cemento asfáltico y por cada tipo de tráfico pertenecen a una distribución normal.

**Tabla 56: Prueba de normalidad de vacíos de aire ante variación de cemento asfáltico.**

	Cemento asfáltico (%)	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Vacíos de aire (%) - Tráfico medio	4,00	,331	3	.	,866	3	,284
	4,50	,316	3	.	,889	3	,352
	5,00	,213	3	.	,990	3	,809
	5,50	,274	3	.	,944	3	,545
	6,00	,304	3	.	,907	3	,407
	6,50	,289	3	.	,928	3	,480
Vacíos de aire (%) - Tráfico bajo	4,00	,213	3	.	,990	3	,809
	4,50	,341	3	.	,847	3	,232
	5,00	,228	3	.	,982	3	,742
	5,50	,274	3	.	,945	3	,546
	6,00	,328	3	.	,871	3	,298
	6,50	,175	3	.	1,000	3	1,000

a. Corrección de significación de Lilliefors

*Fuente: Elaborada propia con software SPSS*

En el cuadro se evidencia que los valores de significancias según Shapiro-Wilk son superiores a  $\alpha=0.05$ , por consiguiente, se aceptará la hipótesis nula planteada y se infiere que los datos de vacíos de aire de la mezcla diseñada por cada tipo de tráfico y al variar el porcentaje de cemento asfáltico corresponden a una distribución normal.

#### 4.10.8.2. Prueba ANOVA

Para evaluar las medias de los resultados de los espacios de vacíos de aire ( $V_a$ ) de mezcla de asfalto diseñada con la cantidad óptima de óxido de calcio en el agregado grueso de arcilla encontrado variando la proporción del cemento asfáltico dependiendo de cada intensidad del tráfico se emplea la prueba ANOVA. En el siguiente cuadro se dan a conocer los valores de la prueba, donde según el valor de la significancia se podrá inferir si la hipótesis nula planteada deber ser rechazado o aceptada.

Hipótesis nula: Los datos de vacíos de aire de la mezcla bituminosa diseñada con el óptimo de óxido de calcio variando el % de aglutinante asfáltico y por cada tipo de tráfico presentan valores de medias iguales.

**Tabla 57: Prueba ANOVA de vacíos de aire ante variación de cemento asfáltico**

		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Vacíos de aire (%) - Tráfico medio	Entre grupos	18,973	5	3,795	98,991	<.001
	Dentro de grupos	,460	12	,038		
	Total	19,433	17			
Vacíos de aire (%) - Tráfico bajo	Entre grupos	17,227	5	3,445	66,543	<.001
	Dentro de grupos	,621	12	,052		
	Total	17,849	17			

*Fuente: Elaboración propia con software SPSS*

En el cuadro se puede evidenciar que los resultados de significancia son menores a 0.001, evidentemente inferiores a  $\alpha=0.05$ , por consiguiente, se rechaza la hipótesis nula planteada y se infiere que los valores de vacíos de aire ( $V_a$ ) de la mezcla de asfalto diseñada al variar el contenido de asfáltico y según el tipo de tráfico presentan valores de medias diferentes.

#### 4.10.8.3. Prueba post hoc Duncan

Al encontrar que los datos de vacíos de aire para un tráfico medio presentan medias diferentes, se opta por usar la prueba post hoc Duncan para comparar estas medias. En el siguiente cuadro se puede evidenciar que presenta diferencias significativas entre las medias en los subconjuntos de 6.5% de cemento asfáltico, 6%, 5.5%, 5% y 4.5%, y el subconjunto de 4%. Donde se puede observar que las medias en cada subconjunto presentan significancias de 1.000, superiores a la significancia  $\alpha=0.05$ .

**Tabla 58: Prueba post hoc Duncan de vacíos de aire ante variación de cemento asfáltico para tráfico medio**

Cemento asfáltico (%)	N	Subconjunto para alfa = 0.05					
		1	2	3	4	5	6
6,50	3	2,7700					
6,00	3		3,3800				
5,50	3			3,7433			
5,00	3				4,6233		
4,50	3					5,1567	
4,00	3						5,7200
Sig.		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

*Fuente: Elaboración propia con software SPSS*

Y al encontrar que los datos de vacíos de aire para un tráfico bajo también presentan medias diferentes, se opta por usar la prueba post hoc Duncan para comparar estas medias. En el siguiente cuadro se aprecia que existe diferencias significativas en relación con las medias en los subconjuntos de 6.5% y 6% de cemento asfáltico, 5.5%, 5%, 4.5% y el subconjunto de 4%. Donde se puede observar que las medias en cada subconjunto presentan significancias de 0.095, 1.000, 1.000, 1.000 y 1.000 respectivamente, superiores a la significancia  $\alpha=0.05$ .

**Tabla 59: Prueba post hoc Duncan de vacíos de aire ante variación de cemento asfáltico para tráfico bajo**

Cemento asfáltico (%)	N	Subconjunto para alfa = 0.05				
		1	2	3	4	5
6,50	3	2,9100				
6,00	3	3,2467				
5,50	3		3,8167			
5,00	3			4,4733		
4,50	3				5,0233	
4,00	3					5,7067
Sig.		,095	1,000	1,000	1,000	1,000

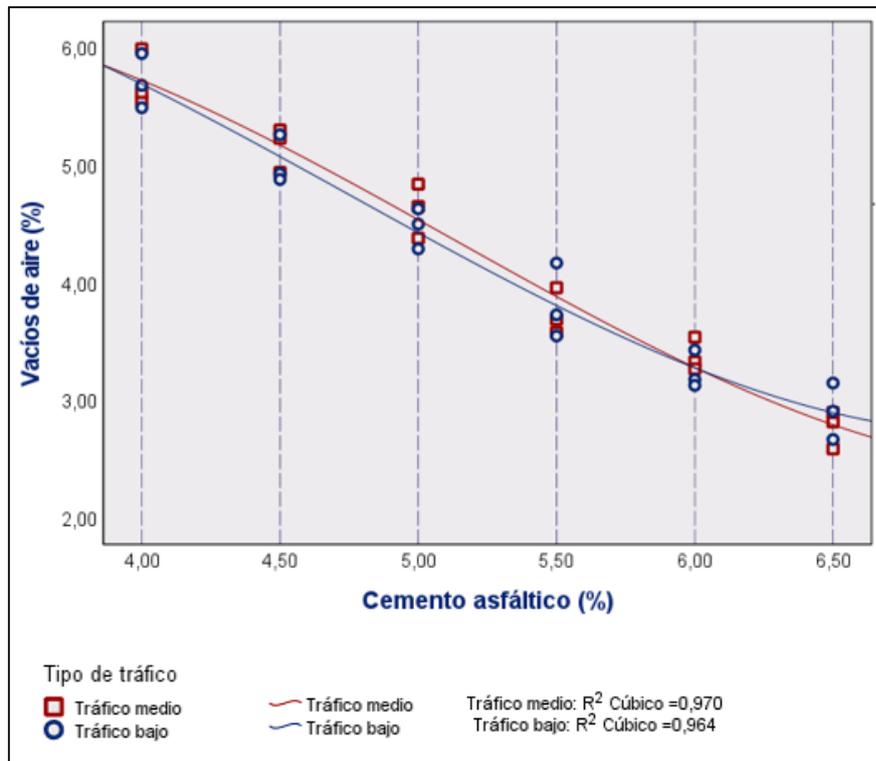
Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

*Fuente: Elaborada propia con software SPSS*

#### 4.10.8.4. Gráfico de dispersión

El gráfico de dispersión muestra la relación entre las variables de estudio, además de poder ver cómo están distribuidos los datos de volumen de vacíos de aire (%Va) de la mezcla diseñada para cada nivel o tipo de tráfico. En el gráfico se evidencia que para los resultados de vacíos de aire (Va) respecto a un tráfico de nivel medio la tendencia es descendente con un coeficiente de determinación  $R^2$  es de 0.970, lo que nos da entender que el 97% de los espacios de vacíos de aire (Va) están influenciados por el ligante asfáltico aplicado a la mezcla diseñada con agregados artificiales de arcilla, indicando una correlación muy alta entre los vacíos de aire resultantes a un tráfico medio y el cemento asfáltico. También se evidencia que para los resultados de vacíos de aire a un tráfico bajo la tendencia es descendente con un factor de coeficiente de determinación  $R^2$  es de 0.964, lo que establece que el 96.4% de los volúmenes de vacíos de aire están influenciados por el ligante de asfalto aplicado a la mezcla diseñada con agregados artificiales de arcilla, indicando una correlación muy alta entre los vacíos de aire resultantes a un tráfico bajo y el aglutinante asfáltico.

Figura 37: Gráfico de dispersión de vacíos de aire ante variación de cemento asfáltico.



Fuente: Elaboración propia con software SPSS

## CONCLUSIONES

La sustitución del agregado grueso por la arcilla cristalizada reforzada con óxido de calcio en mezclas bituminosas en caliente mejora significativamente sus propiedades como físicas y mecánicas de la mezcla asfálticas. Se determinó que con una dosificación óptima del 18% de óxido de calcio en el agregado grueso artificial incrementa la estabilidad en un 16.97%, reduce el flujo en un 29.66% y aumenta la resistencia a la inmersión-compresión en un 14.8%. Estos resultados indican que la mezcla modificada cumple con exigencias establecidas por la normativa para pavimentos de bajo y medio tráfico, demostrando así su viabilidad como una alternativa mejorada en diseños de mezclas de asfalto.

La evaluación del volumen de vacíos ( $V_a$ ) y la densidad en mezclas asfálticas que con la sustitución del agregado grueso por la arcilla cristalizada reforzada con óxido de calcio revela un comportamiento favorable. Se observó un descenso de hasta 18.74% en los vacíos de aire y un aumento de hasta 0.86% en el peso unitario. Además, se registró una disminución del 3.66% en el (VMA) correspondiente al volumen de vacíos en el agregado mineral y un incremento del 4.49% en el volumen de vacíos llenos de ligante asfáltico (VLLA). Estos cambios contribuyen a una estructura de mezcla más densa y resistente, lo que es fundamental para mejorar y asegurar una mayor resistencia garantizando la durabilidad y el desempeño del pavimento en servicio.

En cuanto al flujo y la estabilidad mecánica, con la adición de óxido de calcio al 18% en los agregados gruesos de arcilla cristalizada presenta un aumento significativo en la estabilidad de mezcla bituminosa, cumpliendo con los requisitos mínimos para tráfico medio. Al mismo tiempo, la reducción del flujo en un 29.66% evidencia una mayor rigidez en la mezcla, lo cual es beneficioso para minimizar deformaciones plásticas bajo cargas repetidas. Estos resultados confirman que el reforzamiento con óxido de calcio en el agregado grueso artificial no solo mejora la capacidad de carga de las mezclas asfálticas, sino que también las hace más resistentes al desgaste.

Finalmente, la resistencia retenida en las pruebas mecánicas bajo inmersión-compresión, es un indicador crucial de la durabilidad en presencia de agua, se ve significativamente mejorada con la sustitución del agregado grueso por la arcilla cristalizada reforzada con óxido en las mezclas asfálticas. El aumento de hasta 26.52% en la resistencia al 24% de óxido de calcio demuestra una mejora sustancial en la capacidad de la mezcla bituminosa para soportar y resistir los efectos degradantes del agua, lo cual favorece una vida útil más prolongada del pavimento en climas húmedos o con condiciones de alta humedad. Estos hallazgos subrayan la eficacia del

óxido de calcio como agente modificador en mezclas asfálticas, especialmente para mejorar su resistencia en entornos exigentes.

## RECOMENDACIONES

Investigación adicional sobre la durabilidad y la longevidad a largo del tiempo de las mezclas asfálticas con agregados gruesos de arcilla cristalizada reforzados con óxido de calcio: Se recomienda realizar y llevar a cabo estudios prolongadas que evalúen el desempeño y la durabilidad de estas mezclas de asfaltos bajo condiciones reales de tráfico y clima. La realización de pruebas de campo prolongadas permitiría validar las respuestas obtenidas en laboratorio y determinar la capacidad de estas mezclas para resistir el desgaste y la fatiga a lo largo de su vida útil, así como su comportamiento ante fenómenos como el agrietamiento y la formación de baches.

Evaluación de la factibilidad y viabilidad técnica, económica y ambiental del empleo de arcilla cristalizada y óxido de calcio en mezclas asfálticas: Para complementar la investigación, es fundamental realizar un análisis costo-beneficio y una evaluación del impacto ambiental de la producción y uso de agregados gruesos de arcilla cristalizada reforzados con óxido de calcio. Esto incluiría estudiar la viabilidad de escalar la producción de estos materiales y su impacto en la sostenibilidad del proyecto, considerando tanto los costos de producción como los beneficios potenciales en términos de reducción de mantenimiento y aumento de la durabilidad del pavimento.

Estudios sobre la interacción de la adición de óxido calcio con otras propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas: Es recomendable investigar cómo diferentes concentraciones de óxido calcio afectan en otras propiedades mecánicas más relevantes, como la resistencia a la capacidad de tensión, la durabilidad a la fisuración por fatiga y la estabilidad a altas temperaturas. Esto permitiría optimizar la dosificación de óxido de calcio para distintas aplicaciones de pavimentos, adaptándola a las condiciones específicas de tráfico y clima.

Investigación sobre la compatibilidad de agregados de arcilla cristalizada con otros modificadores de asfalto: Se sugiere realizar estudios que analicen la compatibilidad y sinergia de los agregados de arcilla cristalizada reforzados con óxido de calcio con otros aditivos o modificadores de asfalto, como polímeros o fibras. Esto podría conducir al desarrollo de mezclas asfálticas con propiedades aún más mejoradas, optimizando su rendimiento en diversas condiciones y aplicaciones, y ampliando el espectro de usos de estos materiales en la ingeniería vial.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. YIDETI, T. F., Y OTROS. *Packing theory-based framework for evaluating the resilient modulus of unbound granular materials*. 2013.
2. ASPHALT CONSUMPTION WORLDWIDE. s.l. : <http://www.informationbible.com/articleworldwide-consumption-and-manufacturing-of-asphalt-1446.html>, 2010.
3. SUTRAN. *Alerta del estado de vias*. Peru : s.n., 2018.
4. ZHANG, J., Y OTROS. *Prediction of dynamic modulus of asphalt mixture using micromechanical method with radial distribution functions*. 2019.
5. ARIAS, FIDIAS. *El Proyecto de Investigación: Introducción a la metodología*. Caracas : Episteme, 2012.
6. EGOAVIL MORALES, EDGARDO CALIN Y JIMENEZ ZUBIETA, JESSICA CAROLINE. *Óxido de calcio para mejorar las propiedades físicas y mecánicas del concreto estructural*. Lima, Peru : Universidad Ricardo Palma, 2021.
7. CORDOVA CARRILLO, ANGIE TATIANA. *Estabilización usando óxido de calcio para mejorar las propiedades físicas y mecánicas en la subrasante en la carretera Talara-Lobitos, Pariñas-Talara-Piura-2022*. Lima, Peru : Universidad Cesar Vallejo, 2022.
8. GARCIA JIBAJA, DARUIN EAR. *Propiedades físicas y mecánicas en mezclas de asfalto en caliente incorporando fibra de vidrio, Trujillo*. Trujillo, Perú : Universidad Cesar Vallejo, 2023.
9. MATTA ROMUALDO, JEFFERSON JOEL Y PEREZ ORE, JOSE LUIS. *Propiedades mecánicas y físicas de la mezcla asfáltica en caliente al adicionarle cenizas de algas marinas, Chimbote- Ancash-2019*. Chimbote, Peru : Universidad Cesar Vallejo, 2019.
10. MURILLO LUZA, THATIANA DEL PILAR. *Propiedades mecánicas de mezcla asfáltica en caliente modificado con residuos de ignimbrita para vías de alto tránsito, Arequipa 2021*. Lima, Peru : Universidad Cesar Vallejo, 2021.
11. AL-MISTAREHI, BARA, Y OTROS. *Los efectos de la adición de nanoarcilla y nanoóxido de zinc en la reología del cemento asfáltico*. s.l. : <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2021.03.010>, 2023.

12. MANSOUR FAKHRI, EHSAN SHAHRYARI. *Los efectos de la adición de nanoarcilla y nanoóxido de zinc en la reología del cemento asfáltico*. s.l. : Case Studies in Construction Materials,, 2021.
13. ZHANG, HUI, Y OTROS. *Óxido de calcio recubierto con una esponja de poliuretano reciclado para mejorar la resistencia al agua y a las heladas de la mezcla asfáltica a base de agua*. s.l. : [https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=4481421](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4481421), 2023.
14. GOUVEIA, BCS, Y OTROS. *Uso de óxido de calcio como carga activa para materiales bituminosos estabilizados*. s.l. : <https://doi.org/10.1080/14680629.2021.1881591>, 2021.
15. GUNARAN, DANNY, Y OTROS. *La influencia de la adición de piedra caliza e hidróxido de calcio en la mezcla de hormigón asfáltico*. 2022.
16. RONDÓN QUINTANA, HUGO ALEXANDER Y REYES LIZCANO, FREDY ALBERTO. *Pavimentos Materiales, construcción y diseño*. colombia : s.n., 2022.
17. RODRÍGUEZ MINEROS, CARMEN ELENA. *Evaluación y rehabilitación de pavimentos flexibles por el método del reciclaje*. Universidad de El Salvador : s.n., 2004.
18. FULLER, WB Y THOMPSON, SE. *The laws of proportioning concrete*. 1907.
19. SYUHADA, AHMAD. *Study of temperature loss of Hot Mix Asphalt during transportation*. s.l. : Material Science and Engineering, 2001.
20. GUARIN, A, Y OTROS. *Disruption factor of asphalt mixtures*. 2012.
21. LIRA, B, JELAGIN, D Y BIRGISSON, B. *Gradation-based framework for asphalt mixture*. 2012.
22. PADILLA RODRÍGUEZ, ALEJANDRO. *Mezclas asfálticas (capítulo 3)*. Lima : s.n., 2004.
23. MINAYA GONZÁLEZ, SILENE Y ORDÓÑEZ HUAMÁN, ABEL. *Diseño Moderno de Pavimentos Asfálticos*. Lima : SEGUNDA EDICIÓN, 2006.
24. GARNICA ANGUAS, PAUL, Y OTROS. *Caracterización geomecánica de mezclas asfálticas*. Mexico : s.n., 2005.
25. PETERSEN, J. C. *A Review of the Fundamentals of Asphalt Oxidation*. 2009.

26. LONGER LASTING ROADS. s.l. : [http://www.nserc-crsng.gc.ca/PartnersPartenaires/ImpactStory-Reussite\\_eng.asp?ID=1002](http://www.nserc-crsng.gc.ca/PartnersPartenaires/ImpactStory-Reussite_eng.asp?ID=1002), 2010.
27. READ, J. Y WHITEOAK, D. *The Shell Bitumen Handbook*. 2003.
28. NISSENBAUM, A. *Rev. Chem. Eng.* 1993.
29. ASTM. *Annual Book of ASTM Standards*,. 1998.
30. LIN, M., Y OTROS. *Effects of Asphaltenes on Asphalt Recycling and Aging*. 1995.
31. MTC. *Especificaciones Técnicas Generales para Construcción*. Lima : s.n., 2013.
32. GARNICA ANGUAS, PAUL, Y OTROS. *Aspectos del diseño volumétrico de mezclas asfálticas*. Mexico : Secretaría de comunicaciones y transportes instituto Mexicano del transporte, 2004.
33. DELGADO ALAMILLA, HORACIO. *Diseño de mezclas asfálticas densas en caliente en función del nivel de tránsito*. México : Secretaría de comunicaciones y transportes instituto mexicano del transporte, 2020.
34. BENITEZ MOLINA, CARLOS ALBERTO. *Ensayo inmersión compresión para diseño de mezclas en caliente sometidas a altas precipitaciones (Tesis tesis posgrado, Universidad del Centro del Perú)*. Repositorio institucional, Huancayo : 2019.
35. WESLEY, L. D. *Mekanika Tanah untuk Tanah Endapan & Residu*. 2010.
36. KUMALAWATI, A., TRI, M. W. Y MASTARAM, Y. *Analisis Pengaruh Penggunaan Abu Batu Apung Sebagai Pengganti Filler Untuk Campuran Aspal*. 2013.
37. ACHMAD, D. Y SUTJAHJO, K. D. *Dampak Penambahan Polimer Terhadap Karakteristik Beton Aspal*. 2011.
38. WANG, W., Y OTROS. *Surface free energy method for evaluating the effects of anti-stripping agents on the moisture damage to asphalt mixtures*,. 2020.
39. PI, Y., Y OTROS. *Strength and Micro-Mechanism Analysis of Cement-Emulsified Asphalt Cold Recycled Mixture, Materials*. 2019.
40. JIMENEZ PANEQUE, ROSA. *Metodologia de la investigacion*. 1998.
41. HERNADEZ SAMPIERI, ROBERTO. *Metodología de la investigación*. 2014.

42. TRICHIM, W. M. K. Y DONNELLY, J.P. *The Research Methods Knowledge Base*. 2008.

43. ANASTASI, A. Y URBINA, S. *Psychological Testing*. 1997.

## ANEXOS

### Anexo 1. Matriz de consistencia

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES	MÉTODO
<p>Problema General:</p> <p>¿Cuál es efecto de la sustitución del agregado grueso por la arcilla cristalizada reforzado con oxido de calcio en las propiedades físicas y mecánicas de mezclas asfálticas en caliente Huancayo, 2024?</p>	<p><b>Objetivo General:</b></p> <p>Evaluar el efecto de la sustitución del agregado grueso por la arcilla cristalizada reforzado con oxido de calcio en las propiedades físicas y mecánicas de mezclas asfálticas en caliente Huancayo, 2024</p>	<p><b>Hipótesis General:</b></p> <p>La sustitución del agregado grueso por la arcilla cristalizada reforzado con oxido de calcio mejora las propiedades físicas y mecánicas de mezclas asfálticas en caliente Huancayo, 2024</p>	<p>VI AGREGADO GRUESO POR LA ARCILLA CRISTALIZADA REFORZADO CON ÓXIDO DE CALCIO</p>	<p>D1 Modificación de mezcla asfáltica con oxido de calcio</p> <p>D2: Porcentaje de adición</p>	<p>I1: MTC E 501: Muestra de Mezcla asfáltico</p> <p>I2: Adición: 0%, 6%, 12%,18% y 24%</p>	<p>Método de la Investigación: Científico</p>
						<p>Tipo de investigación: Aplicada</p>
<p>Problema Especifico:</p> <p>¿Cuál es el efecto de la sustitución del agregado grueso por la arcilla cristalizada reforzado con oxido de calcio en la densidad y volumen de</p>	<p><b>Objetivo Especifico:</b></p> <p>Determinar el efecto de la sustitución del agregado grueso por la arcilla cristalizada reforzado con oxido de calcio en la densidad y volumen de</p>	<p><b>Hipótesis Especifico:</b></p> <p>La sustitución del agregado grueso por la arcilla cristalizada reforzado con oxido de calcio resultan optimas la densidad y aumenta</p>	<p>VD: PROPIEDADES</p>	<p>D1: Densidad y volumen de vacíos</p>	<p>I1: ASTM 2041</p>	<p>Nivel de Investigación: Explicativa</p>
						<p>Diseño de la investigación: Cuasiexperimental</p>

vacíos de mezclas asfálticas en caliente Huancayo, 2024?	vacíos de mezclas asfálticas en caliente Huancayo, 2024.	volumen de vacíos de mezclas asfálticas en caliente Huancayo 2024.	FÍSICAS Y MECÁNICAS.	D2: Estabilidad y flujo.	I2: MTC E 504	Población:
¿De qué manera varia la estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente con la sustitución del agregado grueso por la arcilla cristalizada reforzado con oxido de calcio Huancayo, 2024?	Evaluar la variación en la estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente con la sustitución del agregado grueso por la arcilla cristalizada reforzado con oxido de calcio Huancayo, 2024.	La sustitución del agregado grueso por la arcilla cristalizada reforzado con oxido de calcio Varia la estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente Huancayo, 2024.		D3: Inmersión compresión.	I3: MTC E 522	Mezcla asfáltico sin modificaciones y de la incorporación de los agregados artificial de arcilla cristalizada reforzado con oxido de calcio
¿En qué porcentaje varia la resistencia retenida en el ensayo de inmersión compresión de mezclas asfálticas en caliente con la sustitución del agregado grueso por la arcilla cristalizada reforzado con oxido de calcio Huancayo, 2024?	Determinar en qué porcentaje varia la resistencia retenida en el ensayo de inmersión compresión de mezclas asfálticas en caliente con la sustitución del agregado grueso por la arcilla cristalizada reforzado con oxido de calcio Huancayo, 2024.	La sustitución del agregado grueso por la arcilla cristalizada reforzado con oxido de calcio mejora la resistencia retenida en el ensayo de inmersión compresión de mezclas asfálticas en caliente Huancayo, 2024.				Muestra: 114 briquetas

## Anexo 2. Matriz de Operacionalización de variables

Variables	Definición conceptual	Dimensión	Indicadores	Instrumento	Escala
<b>VI: Agregado grueso por la arcilla cristalizada reforzado con óxido de calcio</b>	Comúnmente conocida como cal viva, es un material muy utilizado. Es un sólido blanco, cáustico y alcalino a temperatura ambiente. Como producto comercial, la cal suele contener también MgO, óxido de silicio (arena) y pequeñas cantidades de óxido de aluminio y óxido de hierro (4).	D1: Modificación de mezcla asfáltica con óxido de calcio	I1: MTC E 501: Muestra de Mezcla asfaltico	Ficha de recopilación de información	Razón
		D2: Porcentaje de adición	I2: Adición: 0%, 6%,12%; 18% y 24%		
<b>VD: Propiedades físicas y mecánicas</b>	Se debe planificar, fabricar y ponerle una porción de concreto asfáltico con la finalidad obtener las siguientes características deseadas de la mezclilla: Durabilidad, Estabilidad, Resistencia, Flexibilidad, etc. (5)	D1: Densidad y volumen de vacíos	I1: ASTM2041	Ficha de recopilación de información	Razón
		D2: Estabilidad y flujo.	I2: MTC E504		
		D3: Inmersión compresión.	I3: MTC E522		

### Anexo 3. Certificados de ensayo



<b>PROYECTO:</b>	EFEECTO DE LA INCORPORACIÓN DE AGREGADOS ARTIFICIAL DE ARCILLA CRISTALIZADA REFORZAMIENTO CON OXIDO DE CALCIO EN LA PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE HUANCAYO 2024
<b>CONSULTOR:</b>	BACH. DIONICIO YARINGAÑO, MAEL ROY / BACH. DIONICIO YARINGAÑO, GINO
<b>UBICACIÓN:</b>	HUANCAYO
<b>CANTERA:</b>	---
<b>MUESTRA:</b>	AGREGADO ARTIFICIAL DE ARCILLA
<b>FECHA:</b>	01/07/2024

**CARACTERIZACIÓN DE AGREGADO ARTIFICIAL DE ARCILLA**  
(MTC E 207)

**Material:**

Pasante de 3/4" y retenido en 1/2":	2500 gr.
Pasante de 1/2" y retenido en 3/8":	2500 gr.
Total muestra:	5000 gr.

ABRASION LOS ANGELES (L.A.) AL DESGASTE DE LOS AGREGADOS DE TAMAÑOS MENORES DE 37,5 MM (1 1/2") - MTC E 207				
	UND.	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
PESO INICIAL	gr.	5000.00	5000.00	5000.00
PESO FINAL	gr.	2918.00	2832.00	2794.00
DESGASTE	%	41.64	43.36	44.12
<b>DESGASTE PROMEDIO</b>	%	<b>43.04</b>		





<b>PROYECTO:</b>	EFECTO DE LA INCORPORACIÓN DE AGREGADOS ARTIFICIAL DE ARCILLA CRISTALIZADA REFORZAMIENTO CON OXIDO DE CALCIO EN LA PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE HUANCAYO 2024
<b>CONSULTOR:</b>	BACH. DIONICIO YARINGAÑO, MAEL ROY / BACH. DIONICIO YARINGAÑO, GINO
<b>UBICACIÓN:</b>	HUANCAYO
<b>CANTERA:</b>	---
<b>MUESTRA:</b>	AGREGADO ARTIFICIAL DE ARCILLA
<b>FECHA:</b>	01/07/2024

**CARACTERIZACIÓN DE AGREGADO ARTIFICIAL DE ARCILLA  
(MTC E 206)**

**Material:** 2000 gr.

PESO ESPECIFICO Y ABSORCION DE AGREGADOS GRUESOS - MTC E 206				
	UND.	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
PESO DE MUESTRA	gr.	2000	2000	2000
(B) PESO SATURADO SUPERFICIALMENTE SECO	gr.	2012	2005	1997
PESO DE CANASTILLA	gr.	917	917	917
PESO SUMERGIDO + CANASTILLA	gr.	2125	2096	2091
(C) PESO SUMERGIDO	gr.	1208	1179	1174
(A) PESO DE MUESTRA SECA	gr.	1993	1985	1978
PESO ESPECÍFICO DE MASA SECA	gr./cm <sup>3</sup>	2.479	2.403	2.403
PESO ESPECÍFICO DE MASA SATURADA CON SUPERFICIE SECA	gr./cm <sup>3</sup>	2.502	2.427	2.426
PESO ESPECÍFICO APARENTE	gr./cm <sup>3</sup>	2.539	2.463	2.460
<b>ABSORCIÓN DE AGUA</b>	%	<b>0.95</b>	<b>1.01</b>	<b>0.96</b>
<b>ABSORCIÓN DE AGUA PROMEDIO</b>	%	<b>0.97</b>		

  
 Ing. Gino Yaringaño  
 CIP 152927  
**ICCSAH S.A.C.**  
INGENIERÍA DE CALIDAD EN CONCRETO, SUELOS ASFALTO E HIDRÁULICA S.A.C.



INGENIERÍA DE CALIDAD EN CONCRETO, SUELOS ASFALTO E HIDRÁULICA S.A.C.

<b>PROYECTO:</b>	EFEECTO DE LA INCORPORACIÓN DE AGREGADOS ARTIFICIAL DE ARCILLA CRISTALIZADA REFORZAMIENTO CON OXIDO DE CALCIO EN LA PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE HUANCAYO 2024
<b>CONSULTOR:</b>	BACH. DIONICIO YARINGAÑO, MAEL ROY / BACH. DIONICIO YARINGAÑO, GINO
<b>UBICACIÓN:</b>	HUANCAYO
<b>CANTERA:</b>	---
<b>MUESTRA:</b>	AGREGADO ARTIFICIAL DE ARCILLA
<b>FECHA:</b>	01/07/2024

### CARACTERIZACIÓN DE AGREGADO ARTIFICIAL DE ARCILLA

(MTC E 209)

DURABILIDAD AL SULFATO DE MAGNESIO - MTC E 209								
	TAMIZ PASANTE	TAMIZ RETENIDO	PESO INICIAL	GRADACIÓN INICIAL	PESO DE FRACCIÓN	PESO RETENIDO TRAS ENSAYO	PÉRDIDA TOTAL	PÉRDIDAS CORREGIDAS
	(")	(")	(gr.)	(%)	(gr.)	(gr.)	(%)	(%)
MUESTRA 1	1	3/4	155	1.55				
	3/4	1/2	4272	42.72	912	822	9.87	4.22
	1/2	3/8	2113	21.13	475	339	28.63	6.05
	3/8	#4	3460	34.60	546	428	21.61	7.48
	<b>10000</b>							<b>17.74</b>
MUESTRA 2	1	3/4	155	1.55				
	3/4	1/2	4272	42.72	925	826	10.70	4.57
	1/2	3/8	2113	21.13	452	321	28.98	6.12
	3/8	#4	3460	34.60	557	464	16.70	5.78
	<b>10000</b>							<b>16.47</b>
MUESTRA 3	1	3/4	155	1.55				
	3/4	1/2	4272	42.72	936	839	10.36	4.43
	1/2	3/8	2113	21.13	489	349	28.63	6.05
	3/8	#4	3460	34.60	532	425	20.11	6.96
	<b>10000</b>							<b>17.44</b>

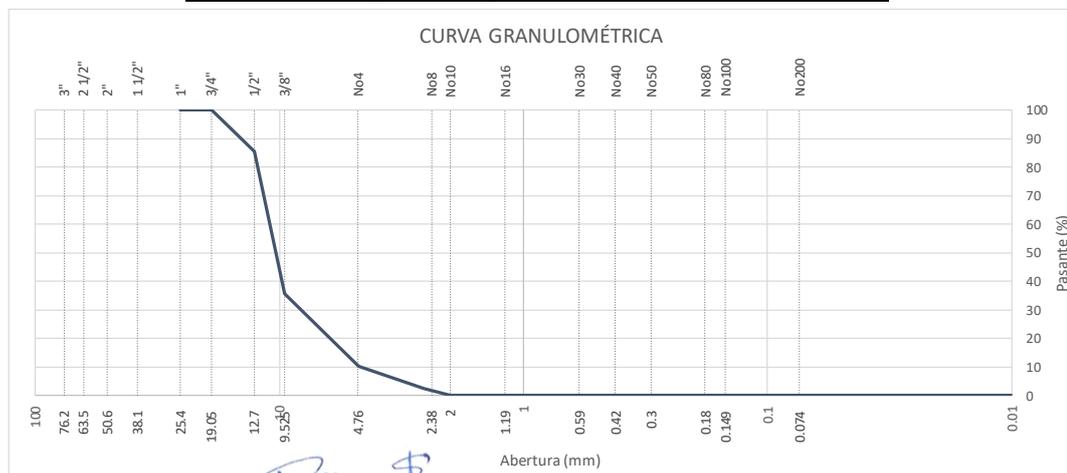
  
 Ing. Cris Aranda C. Espinoza  
 CIP- 62827  
  
 INGENIERÍA DE CALIDAD EN CONCRETO, SUELOS ASFALTO E HIDRÁULICA S.A.C.



<b>PROYECTO:</b>	EFEECTO DE LA INCORPORACIÓN DE AGREGADOS ARTIFICIAL DE ARCILLA CRISTALIZADA REFORZAMIENTO CON OXIDO DE CALCIO EN LA PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE HUANCAYO 2024
<b>CONSULTOR:</b>	BACH. DIONICIO YARINGAÑO, MAEL ROY / BACH. DIONICIO YARINGAÑO, GINO
<b>UBICACIÓN:</b>	HUANCAYO
<b>CANtera:</b>	---
<b>MUESTRA:</b>	AGREGADO ARTIFICIAL DE ARCILLA
<b>FECHA:</b>	01/07/2024

**ANALISIS GRANULOMETRICO DE AGREGADOS GRUESOS Y FINOS  
(MTC E 204)**

AGREGADO ARTIFICIAL DE ARCILLA					
Tamiz	mm	Peso (gr)	% Reten. Parcial	% Reten. Acumul.	% Pasante
3"	76.200				
2 1/2"	63.550				
2"	50.800				
1 1/2"	38.110				
1"	25.405	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	19.055	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2"	12.700	436.50	14.55	14.55	85.45
3/8"	9.525	1494.90	49.83	64.38	35.62
No4	4.750	761.40	25.38	89.76	10.24
No8	2.550	232.20	7.74	97.50	2.50
No10	2.000	75.00	2.50	100.00	0.00
No16	1.185	0.00	0.00	100.00	0.00
No30	0.600	0.00	0.00	100.00	0.00
No40	0.425	0.00	0.00	100.00	0.00
No50	0.295	0.00	0.00	100.00	0.00
No80	0.175	0.00	0.00	100.00	0.00
No100	0.148	0.00	0.00	100.00	0.00
No200	0.072	0.00	0.00	100.00	0.00
<N°200	0.010	0.00	0.00	100.00	0.00
<b>TOTAL MUESTRA =</b>		<b>3000.00</b>	<b>gr</b>		



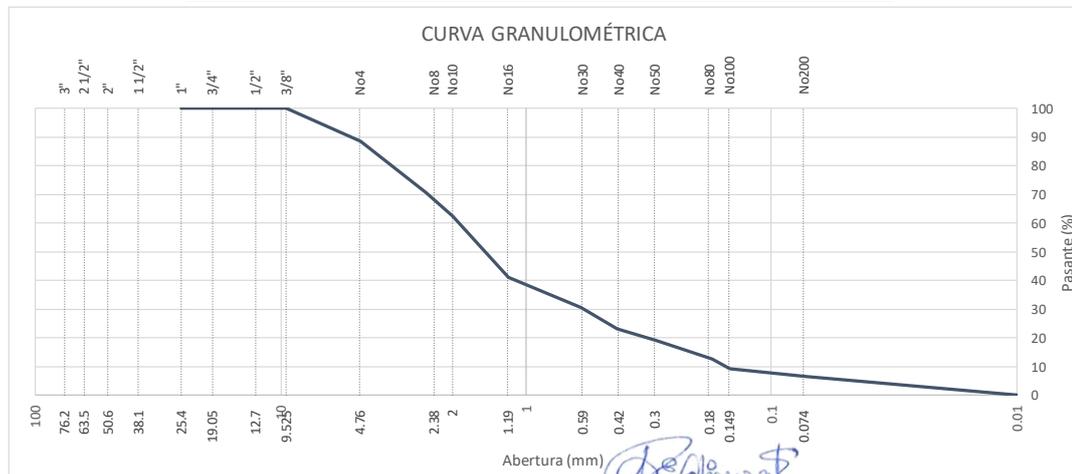
  
 Ing. Civil Agrícola, Esp. Inocua Espinoza  
 CIP 152927  
**ICCSAH S.A.C.**  
 INGENIERÍA DE CALIDAD EN CONCRETO, SUELOS ASFALTO E HIDRÁULICA S.A.C.

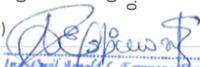


<b>PROYECTO:</b>	EFFECTO DE LA INCORPORACIÓN DE AGREGADOS ARTIFICIAL DE ARCILLA CRISTALIZADA REFORZAMIENTO CON OXIDO DE CALCIO EN LA PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE HUANCAYO 2024
<b>CONSULTOR:</b>	BACH. DIONICIO YARINGAÑO, MAEL ROY / BACH. DIONICIO YARINGAÑO, GINO
<b>UBICACIÓN:</b>	HUANCAYO
<b>CANtera:</b>	PILCOMAYO
<b>MUESTRA:</b>	ARENA ZARANDEADA
<b>FECHA:</b>	01/07/2024

**ANALISIS GRANULOMETRICO DE AGREGADOS GRUESOS Y FINOS**  
(MTC E 204)

ARENA NATURAL					
Tamiz	mm	Peso (gr)	% Reten. Parcial	% Reten. Acumul.	% Pasante
3"	76.200				
2 1/2"	63.550				
2"	50.800				
1 1/2"	38.110				
1"	25.405	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	19.055	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2"	12.700	0.00	0.00	0.00	100.00
3/8"	9.525	0.00	0.00	0.00	100.00
No4	4.750	170.25	11.35	11.35	88.65
No8	2.550	271.20	18.08	29.43	70.57
No10	2.000	120.60	8.04	37.47	62.53
No16	1.185	319.35	21.29	58.76	41.24
No30	0.600	161.25	10.75	69.51	30.49
No40	0.425	111.15	7.41	76.92	23.08
No50	0.295	57.75	3.85	80.77	19.23
No80	0.175	99.60	6.64	87.41	12.59
No100	0.148	50.10	3.34	90.75	9.25
No200	0.072	39.60	2.64	93.39	6.61
<N°200	0.010	99.15	6.61	100.00	0.00
<b>TOTAL MUESTRA =</b>		1500.00 gr			



  
 Ing. Civil Especialista en Control de Calidad  
 CIP 152927  
**ICCSAH**  
 INGENIERÍA DE CALIDAD EN CONCRETO, SUELOS ASFALTO E HIDRÁULICA S.A.C.

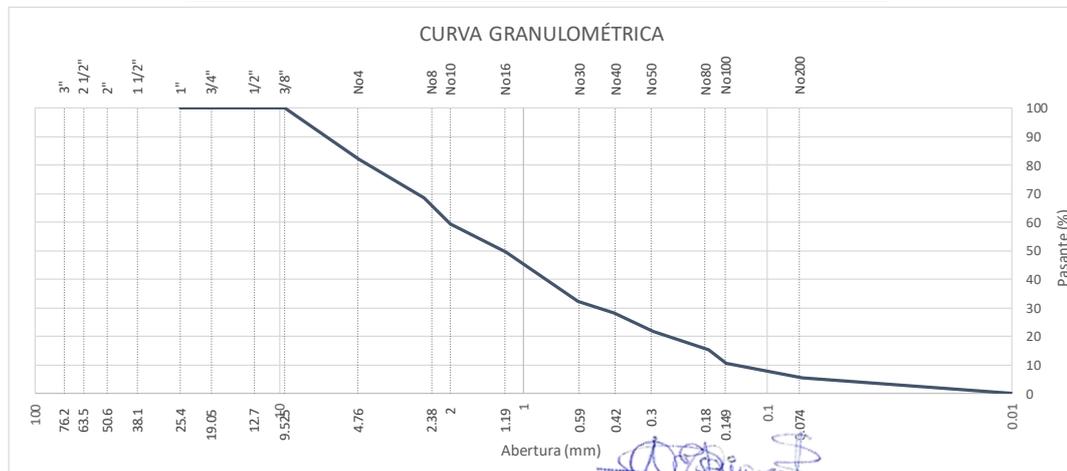


INGENIERÍA DE CALIDAD EN CONCRETO, SUELOS ASFALTO E HIDRÁULICA S.A.C.

<b>PROYECTO:</b>	EFECTO DE LA INCORPORACIÓN DE AGREGADOS ARTIFICIAL DE ARCILLA CRISTALIZADA REFORZAMIENTO CON OXIDO DE CALCIO EN LA PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE HUANCAYO 2024
<b>CONSULTOR:</b>	BACH. DIONICIO YARINGAÑO, MAEL ROY / BACH. DIONICIO YARINGAÑO, GINO
<b>UBICACIÓN:</b>	HUANCAYO
<b>CANTERA:</b>	PILCOMAYO
<b>MUESTRA:</b>	ARENA CHANCADA
<b>FECHA:</b>	01/07/2024

**ANALISIS GRANULOMETRICO DE AGREGADOS GRUESOS Y FINOS**  
(MTC E 204)

ARENA CHANCADA					
Tamiz	mm	Peso (gr)	% Reten. Parcial	% Reten. Acumul.	% Pasante
3"	76.200				
2 1/2"	63.550				
2"	50.800				
1 1/2"	38.110				
1"	25.405	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	19.055	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2"	12.700	0.00	0.00	0.00	100.00
3/8"	9.525	0.00	0.00	0.00	100.00
No4	4.750	268.20	17.88	17.88	82.12
No8	2.550	204.60	13.64	31.52	68.48
No10	2.000	135.60	9.04	40.56	59.44
No16	1.185	145.80	9.72	50.28	49.72
No30	0.600	262.35	17.49	67.77	32.23
No40	0.425	61.20	4.08	71.85	28.15
No50	0.295	94.80	6.32	78.17	21.83
No80	0.175	99.30	6.62	84.79	15.21
No100	0.148	66.90	4.46	89.25	10.75
No200	0.075	79.65	5.31	94.56	5.44
<N°200	0.010	81.60	5.44	100.00	0.00
<b>TOTAL MUESTRA =</b>		1500.00 gr			



  
 Ing. C. F. Espinoza Espinoza  
 CIP-46027  
**ICCSAH**  
 INGENIERÍA DE CALIDAD EN CONCRETO, SUELOS ASFALTO E HIDRÁULICA S.A.C.

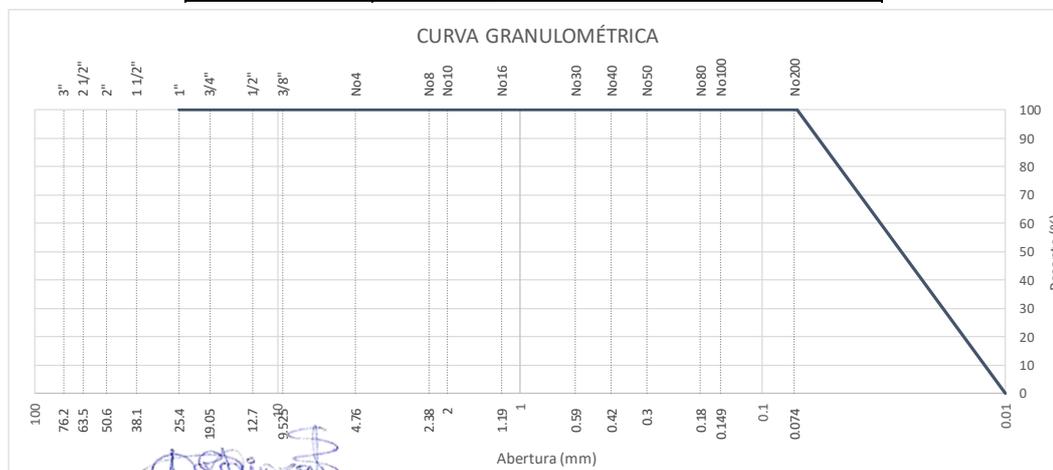


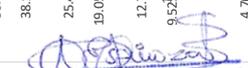
INGENIERÍA DE CALIDAD EN CONCRETO, SUELOS ASFALTO E HIDRÁULICA S.A.C.

<b>PROYECTO:</b>	EFFECTO DE LA INCORPORACIÓN DE AGREGADOS ARTIFICIAL DE ARCILLA CRISTALIZADA REFORZAMIENTO CON OXIDO DE CALCIO EN LA PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE HUANCAYO 2024
<b>CONSULTOR:</b>	BACH. DIONICIO YARINGAÑO, MAEL ROY / BACH. DIONICIO YARINGAÑO, GINO
<b>UBICACIÓN:</b>	HUANCAYO
<b>CANTERA:</b>	---
<b>MUESTRA:</b>	CAL HIDRATADA
<b>FECHA:</b>	01/07/2024

**ANALISIS GRANULOMETRICO DE AGREGADOS GROSOS Y FINOS**  
(MTC E 204)

FILLER: CAL HIDRATADA					
Tamiz	mm	Peso (gr)	% Reten. Parcial	% Reten. Acumul.	% Pasante
3"	76.200				
2 1/2"	63.550				
2"	50.800				
1 1/2"	38.110				
1"	25.405	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	19.055	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2"	12.700	0.00	0.00	0.00	100.00
3/8"	9.525	0.00	0.00	0.00	100.00
No4	4.750	0.00	0.00	0.00	100.00
No8	2.550	0.00	0.00	0.00	100.00
No10	2.000	0.00	0.00	0.00	100.00
No16	1.185	0.00	0.00	0.00	100.00
No30	0.600	0.00	0.00	0.00	100.00
No40	0.425	0.00	0.00	0.00	100.00
No50	0.295	0.00	0.00	0.00	100.00
No80	0.175	0.00	0.00	0.00	100.00
No100	0.148	0.00	0.00	0.00	100.00
No200	0.072	0.00	0.00	0.00	100.00
<N°200	0.010	350.00	100.00	100.00	0.00
<b>TOTAL MUESTRA =</b>		<b>350.00</b>	<b>gr</b>		



  
 Ing. Civil Aranda C. Espinoza Espinoza  
 CIP-42827  
  
 INGENIERÍA DE CALIDAD EN CONCRETO, SUELOS ASFALTO E HIDRÁULICA S.A.C.

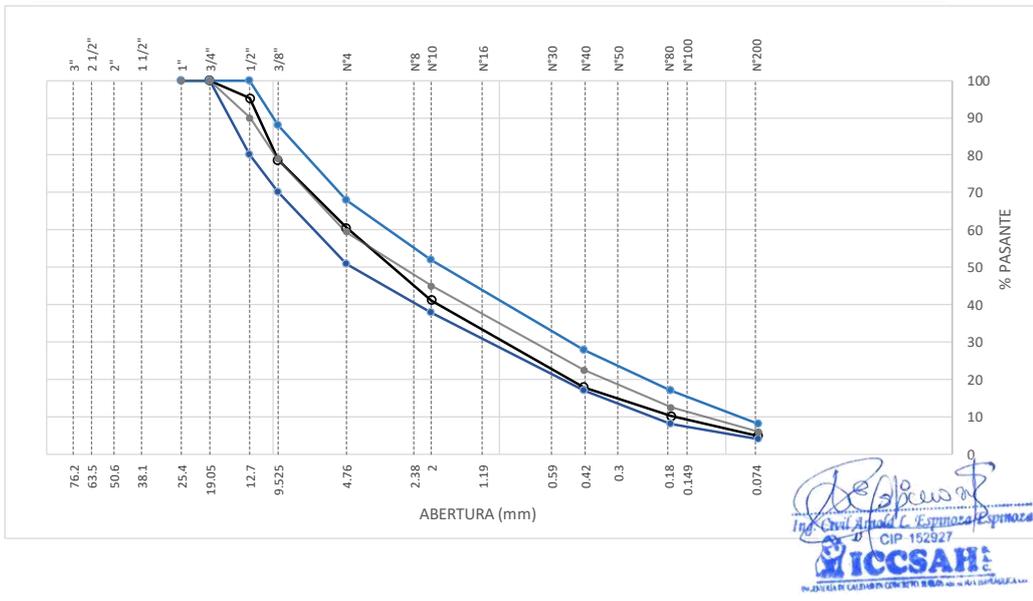


INGENIERÍA DE CALIDAD EN CONCRETO, SUELOS ASFALTO E HIDRÁULICA S.A.C.

<b>PROYECTO:</b>	EFFECTO DE LA INCORPORACIÓN DE AGREGADOS ARTIFICIAL DE ARCILLA CRISTALIZADA REFORZAMIENTO CON OXIDO DE CALCIO EN LA PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE HUANCAYO 2024
<b>CONSULTOR:</b>	BACH. DIONICIO YARINGAÑO, MAEL ROY / BACH. DIONICIO YARINGAÑO, GINO
<b>UBICACIÓN:</b>	HUANCAYO
<b>CANTERA:</b>	PILCOMAYO
<b>MUESTRA:</b>	DISEÑO MAC-2
<b>FECHA:</b>	01/07/2024

### COMBINACIÓN TEÓRICA DE AGREGADOS PARA ASFALTO MAC-2

Tamiz	mm	Porcentaje pasantes (%)				MEZCLA	Especificaciones	
		PIEDRAS	ARENAS				MAC-2	Tamaño máximo
Agregados:		Agregado artificial de arcilla	Arena Natural	Arena Chancada	Material propio	100%		1/2"
<b>Proporciones:</b>		<b>33%</b>	<b>31%</b>	<b>35%</b>	<b>1%</b>			
1"	25.405	100.00	100.00	100.00	100.00	<b>100.00</b>	100 - 100	100
3/4"	19.055	100.00	100.00	100.00	100.00	<b>100.00</b>	100 - 100	100
1/2"	12.700	85.45	100.00	100.00	100.00	<b>95.20</b>	80 - 100	90
3/8"	9.525	35.62	100.00	100.00	100.00	<b>78.75</b>	70 - 88	79
No4	4.750	10.24	88.65	82.12	100.00	<b>60.60</b>	51 - 68	60
No8	2.550	2.50	70.57	68.48	100.00	<b>47.67</b>		
No10	2.000	0.00	62.53	59.44	100.00	<b>41.19</b>	38 - 52	45
No16	1.185	0.00	41.24	49.72	100.00	<b>31.19</b>		
No30	0.600	0.00	30.49	32.23	100.00	<b>21.73</b>		
No40	0.425	0.00	23.08	28.15	100.00	<b>18.01</b>	17 - 28	23
No50	0.295	0.00	19.23	21.83	100.00	<b>14.60</b>		
No80	0.175	0.00	12.59	15.21	100.00	<b>10.23</b>	8 - 17	13
No100	0.148	0.00	9.25	10.75	100.00	<b>7.63</b>		
No200	0.072	0.00	6.61	5.44	100.00	<b>4.95</b>	4 - 8	6
< N°200		0.00	0.00	0.00	0.00	<b>0.00</b>		



<b>PROYECTO:</b>	EFEECTO DE LA INCORPORACIÓN DE AGREGADOS ARTIFICIAL DE ARCILLA CRISTALIZADA REFORZAMIENTO CON OXIDO DE CALCIO EN LA PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE HUANCAYO 2024
<b>CONSULTOR:</b>	BACH. DIONICIO YARINGAÑO, MAEL ROY / BACH. DIONICIO YARINGAÑO, GINO
<b>UBICACIÓN:</b>	HUANCAYO
<b>CANTERA:</b>	---
<b>MUESTRA:</b>	Bqt.1 / Bqt.2 / Bqt.3 - Cemento asfáltico 4.0%
<b>FECHA:</b>	04/07/2024

**RESISTENCIA DE MEZCLAS BITUMINOSAS POR MARSHALL PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS  
EN CALIENTE - 4.0% de Cemento asfáltico  
(MTC E 504)**

1	Número de probeta	Unidad	1	2	3	Promedio
2	Cemento Asfáltico en peso de la mezcla	%	4.00	4.00	4.00	<b>4.00</b>
3	Agregado grueso en peso de la mezcla > N° 4	%	31.68	31.68	31.68	
4	Agregado fino en peso de la mezcla < N° 4	%	63.36	63.36	63.36	
5	Filler en peso de la mezcla	%	0.96	0.96	0.96	
6	Peso específico del cemento asfáltico aparente	gr/cm <sup>3</sup>	1.014	1.014	1.014	
7	Peso específico del agregado grueso - Bulk	gr/cm <sup>3</sup>	2.657	2.657	2.657	
8	Peso específico del agregado fino - Bulk	gr/cm <sup>3</sup>	2.679	2.679	2.679	
9	Peso específico del filler - aparente	gr/cm <sup>3</sup>	---	---	---	---
10	Peso de la briqueta al aire	gr	1249.2	1248	1250.2	
11	Peso de la briqueta saturada	gr	1256.5	1254.7	1259.5	
12	Peso de la briqueta en agua	gr	724.3	722	723.4	
13	Volumen de briqueta + parafina	cm <sup>3</sup>	532.2	532.7	536.1	
14	Peso específico Bulk de la briqueta	gr/cm <sup>3</sup>	2.347	2.343	2.332	<b>2.341</b>
15	Peso específico máximo (RICE)	gr/cm <sup>3</sup>	2.481	2.481	2.481	
16	Porcentaje de vacíos	%	5.39	5.57	6.00	<b>5.66</b>
17	Peso específico Bulk del agregado total	gr/cm <sup>3</sup>	2.699	2.699	2.699	
18	Peso específico del agregado total	gr/cm <sup>3</sup>	2.640	2.640	2.640	
19	Porcentaje de vacíos del agregado mineral	%	16.50	16.66	17.04	<b>16.73</b>
20	Porcentaje de vacíos llenos con cemento asfáltico	%	67.32	66.56	64.76	<b>66.21</b>
21	Cemento asfáltico absorbido por el agregado total	%	-0.83	-0.83	-0.83	
22	Cemento asfáltico efectivo	%	4.79	4.79	4.79	
23	Estabilidad sin corregir	kg	226	165	182	
24	Factor de estabilidad		1.00	1.00	1.00	
25	Estabilidad corregida	kg	226.4	164.9	181.7	<b>191.0</b>
26	Flujo	mm	2.1	2.37	1.96	<b>2.14</b>
27	Relación Estabilidad / Flujo	kg/cm	1078	696	927	<b>900</b>
28	Compactación, numero de golpes por cara	golp.	75	75	75	

Observaciones:



Ing. Daniel Adriano C. Espinoza  
CIP 152927  
ICCSAH S.A.C.  
INGENIERÍA DE CALIDAD EN CONCRETO, SUELOS ASFALTO E HIDRAULICA S.A.C.

<b>PROYECTO:</b>	EFFECTO DE LA INCORPORACIÓN DE AGREGADOS ARTIFICIAL DE ARCILLA CRISTALIZADA REFORZAMIENTO CON OXIDO DE CALCIO EN LA PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE HUANCAYO 2024
<b>CONSULTOR:</b>	BACH. DIONICIO YARINGAÑO, MAEL ROY / BACH. DIONICIO YARINGAÑO, GINO
<b>UBICACIÓN:</b>	HUANCAYO
<b>CANTERA:</b>	---
<b>MUESTRA:</b>	Bqt.4 / Bqt.5 / Bqt.6 - Cemento asfáltico 4.5%
<b>FECHA:</b>	04/07/2024

**RESISTENCIA DE MEZCLAS BITUMINOSAS POR MARSHALL PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS  
EN CALIENTE - 4.5% de Cemento asfáltico  
(MTC E 504)**

1	Número de probeta	Unidad	4	5	6	Promedio
2	Cemento Asfáltico en peso de la mezcla	%	4.50	4.50	4.50	<b>4.50</b>
3	Agregado grueso en peso de la mezcla > N° 4	%	31.52	31.52	31.52	
4	Agregado fino en peso de la mezcla < N° 4	%	63.03	63.03	63.03	
5	Filler en peso de la mezcla	%	0.96	0.96	0.96	
6	Peso específico del cemento asfáltico aparente	gr/cm <sup>3</sup>	1.014	1.014	1.014	
7	Peso específico del agregado grueso - Bulk	gr/cm <sup>3</sup>	2.657	2.657	2.657	
8	Peso específico del agregado fino - Bulk	gr/cm <sup>3</sup>	2.679	2.679	2.679	
9	Peso específico del filler - aparente	gr/cm <sup>3</sup>	---	---	---	---
10	Peso de la briqueta al aire	gr	1248.7	1246.1	1249.3	
11	Peso de la briqueta saturada	gr	1254.7	1254.2	1256.7	
12	Peso de la briqueta en agua	gr	720.2	719	719.5	
13	Volumen de briqueta + parafina	cm <sup>3</sup>	534.5	535.2	537.2	
14	Peso específico Bulk de la briqueta	gr/cm <sup>3</sup>	2.336	2.328	2.326	<b>2.330</b>
15	Peso específico máximo (RICE)	gr/cm <sup>3</sup>	2.460	2.460	2.460	
16	Porcentaje de vacíos	%	5.03	5.35	5.46	<b>5.28</b>
17	Peso específico Bulk del agregado total	gr/cm <sup>3</sup>	2.699	2.699	2.699	
18	Peso específico del agregado total	gr/cm <sup>3</sup>	2.637	2.637	2.637	
19	Porcentaje de vacíos del agregado mineral	%	17.33	17.61	17.70	<b>17.54</b>
20	Porcentaje de vacíos llenos con cemento asfáltico	%	70.95	69.59	69.13	<b>69.89</b>
21	Cemento asfáltico absorbido por el agregado total	%	-0.87	-0.87	-0.87	
22	Cemento asfáltico efectivo	%	5.33	5.33	5.33	
23	Estabilidad sin corregir	kg	304	351	362	
24	Factor de estabilidad		1.00	1.00	1.00	
25	Estabilidad corregida	kg	303.8	350.7	361.5	<b>338.7</b>
26	Flujo	mm	2.57	2.63	2.29	<b>2.50</b>
27	Relación Estabilidad / Flujo	kg/cm	1182	1333	1579	<b>1365</b>
28	Compactación, numero de golpes por cara	golp.	75	75	75	

Observaciones: \_\_\_\_\_

<b>PROYECTO:</b>	EFEECTO DE LA INCORPORACIÓN DE AGREGADOS ARTIFICIAL DE ARCILLA CRISTALIZADA REFORZAMIENTO CON OXIDO DE CALCIO EN LA PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE HUANCAYO 2024
<b>CONSULTOR:</b>	BACH. DIONICIO YARINGAÑO, MAEL ROY / BACH. DIONICIO YARINGAÑO, GINO
<b>UBICACIÓN:</b>	HUANCAYO
<b>CANTERA:</b>	---
<b>MUESTRA:</b>	Bqt.7 / Bqt.8 / Bqt.9 - Cemento asfáltico 5.0%
<b>FECHA:</b>	05/07/2024

**RESISTENCIA DE MEZCLAS BITUMINOSAS POR MARSHALL PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS  
EN CALIENTE - 5.0% de Cemento asfáltico  
(MTC E 504)**

1	Número de probeta	Unidad	7	8	9	Promedio
2	Cemento Asfáltico en peso de la mezcla	%	5.00	5.00	5.00	<b>5.00</b>
3	Agregado grueso en peso de la mezcla > N° 4	%	31.35	31.35	31.35	
4	Agregado fino en peso de la mezcla < N° 4	%	62.70	62.70	62.70	
5	Filler en peso de la mezcla	%	0.95	0.95	0.95	
6	Peso específico del cemento asfáltico aparente	gr/cm <sup>3</sup>	1.014	1.014	1.014	
7	Peso específico del agregado grueso - Bulk	gr/cm <sup>3</sup>	2.657	2.657	2.657	
8	Peso específico del agregado fino - Bulk	gr/cm <sup>3</sup>	2.679	2.679	2.679	
9	Peso específico del filler - aparente	gr/cm <sup>3</sup>	---	---	---	---
10	Peso de la briqueta al aire	gr	1248.5	1247.3	1251.1	
11	Peso de la briqueta saturada	gr	1254.3	1254.3	1257.9	
12	Peso de la briqueta en agua	gr	718.7	717.7	716.6	
13	Volumen de briqueta + parafina	cm <sup>3</sup>	535.6	536.6	541.3	
14	Peso específico Bulk de la briqueta	gr/cm <sup>3</sup>	2.331	2.324	2.311	<b>2.322</b>
15	Peso específico máximo (RICE)	gr/cm <sup>3</sup>	2.441	2.441	2.441	
16	Porcentaje de vacíos	%	4.51	4.77	5.31	<b>4.86</b>
17	Peso específico Bulk del agregado total	gr/cm <sup>3</sup>	2.699	2.699	2.699	
18	Peso específico del agregado total	gr/cm <sup>3</sup>	2.636	2.636	2.636	
19	Porcentaje de vacíos del agregado mineral	%	17.94	18.17	18.64	<b>18.25</b>
20	Porcentaje de vacíos llenos con cemento asfáltico	%	74.89	73.72	71.48	<b>73.37</b>
21	Cemento asfáltico absorbido por el agregado total	%	-0.89	-0.89	-0.89	
22	Cemento asfáltico efectivo	%	5.84	5.84	5.84	
23	Estabilidad sin corregir	kg	428	460	505	
24	Factor de estabilidad		1.00	1.00	1.00	
25	Estabilidad corregida	kg	427.6	459.8	505.2	<b>464.2</b>
26	Flujo	mm	3	2.73	2.64	<b>2.79</b>
27	Relación Estabilidad / Flujo	kg/cm	1425	1684	1914	<b>1674</b>
28	Compactación, numero de golpes por cara	golp.	75	75	75	

Observaciones: \_\_\_\_\_



Ing. Cyril Andrés L. Espinoza Espinoza  
CIP-42827  
ICCSAH



<b>PROYECTO:</b>	EFFECTO DE LA INCORPORACIÓN DE AGREGADOS ARTIFICIAL DE ARCILLA CRISTALIZADA REFORZAMIENTO CON OXIDO DE CALCIO EN LA PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE HUANCAYO 2024
<b>CONSULTOR:</b>	BACH. DIONICIO YARINGAÑO, MAEL ROY / BACH. DIONICIO YARINGAÑO, GINO
<b>UBICACIÓN:</b>	HUANCAYO
<b>CANTERA:</b>	---
<b>MUESTRA:</b>	Bqt.10 / Bqt.11 / Bqt.12 - Cemento asfáltico 5.5%
<b>FECHA:</b>	05/07/2024

**RESISTENCIA DE MEZCLAS BITUMINOSAS POR MARSHALL PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS  
EN CALIENTE - 5.5% de Cemento asfáltico  
(MTC E 504)**

1	Número de probeta	Unidad	10	11	12	Promedio
2	Cemento Asfáltico en peso de la mezcla	%	5.50	5.50	5.50	<b>5.50</b>
3	Agregado grueso en peso de la mezcla > N° 4	%	31.19	31.19	31.19	
4	Agregado fino en peso de la mezcla < N° 4	%	62.37	62.37	62.37	
5	Filler en peso de la mezcla	%	0.95	0.95	0.95	
6	Peso específico del cemento asfáltico aparente	gr/cm <sup>3</sup>	1.014	1.014	1.014	
7	Peso específico del agregado grueso - Bulk	gr/cm <sup>3</sup>	2.657	2.657	2.657	
8	Peso específico del agregado fino - Bulk	gr/cm <sup>3</sup>	2.679	2.679	2.679	
9	Peso específico del filler - aparente	gr/cm <sup>3</sup>	---	---	---	---
10	Peso de la briqueta al aire	gr	1251.2	1246.1	1247.5	
11	Peso de la briqueta saturada	gr	1256.5	1254.1	1253.4	
12	Peso de la briqueta en agua	gr	716	713.2	713.1	
13	Volumen de briqueta + parafina	cm <sup>3</sup>	540.5	540.9	540.3	
14	Peso específico Bulk de la briqueta	gr/cm <sup>3</sup>	2.315	2.304	2.309	<b>2.309</b>
15	Peso específico máximo (RICE)	gr/cm <sup>3</sup>	2.416	2.416	2.416	
16	Porcentaje de vacíos	%	4.18	4.65	4.43	<b>4.42</b>
17	Peso específico Bulk del agregado total	gr/cm <sup>3</sup>	2.699	2.699	2.699	
18	Peso específico del agregado total	gr/cm <sup>3</sup>	2.627	2.627	2.627	
19	Porcentaje de vacíos del agregado mineral	%	18.94	19.33	19.15	<b>19.14</b>
20	Porcentaje de vacíos llenos con cemento asfáltico	%	77.90	75.96	76.85	<b>76.90</b>
21	Cemento asfáltico absorbido por el agregado total	%	-1.02	-1.02	-1.02	
22	Cemento asfáltico efectivo	%	6.45	6.45	6.45	
23	Estabilidad sin corregir	kg	523	447	456	
24	Factor de estabilidad		1.00	1.00	1.00	
25	Estabilidad corregida	kg	522.7	446.9	456.3	<b>475.3</b>
26	Flujo	mm	3.29	3	3.17	<b>3.15</b>
27	Relación Estabilidad / Flujo	kg/cm	1589	1490	1439	<b>1506</b>
28	Compactación, numero de golpes por cara	golp.	75	75	75	

Observaciones: \_\_\_\_\_

  
 Ing. Civil Aguado C. Espinoza Espinoza  
 CIP 152927  
  
 INGENIERÍA DE CALIDAD EN CONCRETO, SUELOS ASFALTO E HIDRÁULICA S.A.C.



<b>PROYECTO:</b>	EFFECTO DE LA INCORPORACIÓN DE AGREGADOS ARTIFICIAL DE ARCILLA CRISTALIZADA REFORZAMIENTO CON OXIDO DE CALCIO EN LA PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE HUANCAYO 2024
<b>CONSULTOR:</b>	BACH. DIONICIO YARINGAÑO, MAEL ROY / BACH. DIONICIO YARINGAÑO, GINO
<b>UBICACIÓN:</b>	HUANCAYO
<b>CANTERA:</b>	---
<b>MUESTRA:</b>	Bqt.13 / Bqt.14 / Bqt.15 - Cemento asfáltico 6.0%
<b>FECHA:</b>	06/07/2024

**RESISTENCIA DE MEZCLAS BITUMINOSAS POR MARSHALL PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS  
EN CALIENTE - 6.0% de Cemento asfáltico  
(MTC E 504)**

1	Número de probeta	Unidad	13	14	15	Promedio
2	Cemento Asfáltico en peso de la mezcla	%	6.00	6.00	6.00	6.00
3	Agregado grueso en peso de la mezcla > N° 4	%	31.02	31.02	31.02	
4	Agregado fino en peso de la mezcla < N° 4	%	62.04	62.04	62.04	
5	Filler en peso de la mezcla	%	0.94	0.94	0.94	
6	Peso específico del cemento asfáltico aparente	gr/cm <sup>3</sup>	1.014	1.014	1.014	
7	Peso específico del agregado grueso - Bulk	gr/cm <sup>3</sup>	2.657	2.657	2.657	
8	Peso específico del agregado fino - Bulk	gr/cm <sup>3</sup>	2.679	2.679	2.679	
9	Peso específico del filler - aparente	gr/cm <sup>3</sup>	---	---	---	---
10	Peso de la briqueta al aire	gr	1249	1248.9	1247.8	
11	Peso de la briqueta saturada	gr	1255.3	1258.2	1253.9	
12	Peso de la briqueta en agua	gr	712.3	712.2	710.9	
13	Volumen de briqueta + parafina	cm <sup>3</sup>	543	546	543	
14	Peso específico Bulk de la briqueta	gr/cm <sup>3</sup>	2.300	2.287	2.298	2.295
15	Peso específico máximo (RICE)	gr/cm <sup>3</sup>	2.380	2.380	2.380	
16	Porcentaje de vacíos	%	3.35	3.89	3.45	3.56
17	Peso específico Bulk del agregado total	gr/cm <sup>3</sup>	2.699	2.699	2.699	
18	Peso específico del agregado total	gr/cm <sup>3</sup>	2.604	2.604	2.604	
19	Porcentaje de vacíos del agregado mineral	%	19.88	20.32	19.96	20.05
20	Porcentaje de vacíos llenos con cemento asfáltico	%	83.13	80.85	82.73	82.24
21	Cemento asfáltico absorbido por el agregado total	%	-1.37	-1.37	-1.37	
22	Cemento asfáltico efectivo	%	7.27	7.27	7.27	
23	Estabilidad sin corregir	kg	388	476	433	
24	Factor de estabilidad		1.00	1.00	1.00	
25	Estabilidad corregida	kg	388.3	475.6	432.5	432.1
26	Flujo	mm	3.58	3.81	3.42	3.60
27	Relación Estabilidad / Flujo	kg/cm	1085	1248	1265	1199
28	Compactación, numero de golpes por cara	golp.	75	75	75	

Observaciones: \_\_\_\_\_

<b>PROYECTO:</b>	EFECTO DE LA INCORPORACIÓN DE AGREGADOS ARTIFICIAL DE ARCILLA CRISTALIZADA REFORZAMIENTO CON OXIDO DE CALCIO EN LA PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE HUANCAYO 2024
<b>CONSULTOR:</b>	BACH. DIONICIO YARINGAÑO, MAEL ROY / BACH. DIONICIO YARINGAÑO, GINO
<b>UBICACIÓN:</b>	HUANCAYO
<b>CANTERA:</b>	---
<b>MUESTRA:</b>	Bqt.16 / Bqt.17 / Bqt.18 - Cemento asfáltico 6.5%
<b>FECHA:</b>	06/07/2024

**RESISTENCIA DE MEZCLAS BITUMINOSAS POR MARSHALL PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS  
EN CALIENTE - 6.5% de Cemento asfáltico  
(MTC E 504)**

1	Número de probeta	Unidad	16	17	18	Promedio
2	Cemento Asfáltico en peso de la mezcla	%	6.50	6.50	6.50	<b>6.50</b>
3	Agregado grueso en peso de la mezcla > N° 4	%	30.86	30.86	30.86	
4	Agregado fino en peso de la mezcla < N° 4	%	61.71	61.71	61.71	
5	Filler en peso de la mezcla	%	0.94	0.94	0.94	
6	Peso específico del cemento asfáltico aparente	gr/cm <sup>3</sup>	1.014	1.014	1.014	
7	Peso específico del agregado grueso - Bulk	gr/cm <sup>3</sup>	2.657	2.657	2.657	
8	Peso específico del agregado fino - Bulk	gr/cm <sup>3</sup>	2.679	2.679	2.679	
9	Peso específico del filler - aparente	gr/cm <sup>3</sup>	---	---	---	---
10	Peso de la briqueta al aire	gr	1248.8	1251.1	1251.3	
11	Peso de la briqueta saturada	gr	1255.1	1260.4	1259.6	
12	Peso de la briqueta en agua	gr	712.9	715.6	712.7	
13	Volumen de briqueta + parafina	cm <sup>3</sup>	542.2	544.8	546.9	
14	Peso específico Bulk de la briqueta	gr/cm <sup>3</sup>	2.303	2.296	2.288	<b>2.296</b>
15	Peso específico máximo (RICE)	gr/cm <sup>3</sup>	2.360	2.360	2.360	
16	Porcentaje de vacíos	%	2.41	2.69	3.05	<b>2.72</b>
17	Peso específico Bulk del agregado total	gr/cm <sup>3</sup>	2.699	2.699	2.699	
18	Peso específico del agregado total	gr/cm <sup>3</sup>	2.600	2.600	2.600	
19	Porcentaje de vacíos del agregado mineral	%	20.20	20.43	20.73	<b>20.45</b>
20	Porcentaje de vacíos llenos con cemento asfáltico	%	88.09	86.82	85.28	<b>86.73</b>
21	Cemento asfáltico absorbido por el agregado total	%	-1.43	-1.43	-1.43	
22	Cemento asfáltico efectivo	%	7.82	7.82	7.82	
23	Estabilidad sin corregir	kg	340	284	361	
24	Factor de estabilidad		1.00	1.00	1.00	
25	Estabilidad corregida	kg	340.3	284	361.2	<b>328.5</b>
26	Flujo	mm	3.92	3.87	4.18	<b>3.99</b>
27	Relación Estabilidad / Flujo	kg/cm	868	734	864	<b>822</b>
28	Compactación, numero de golpes por cara	golp.	75	75	75	

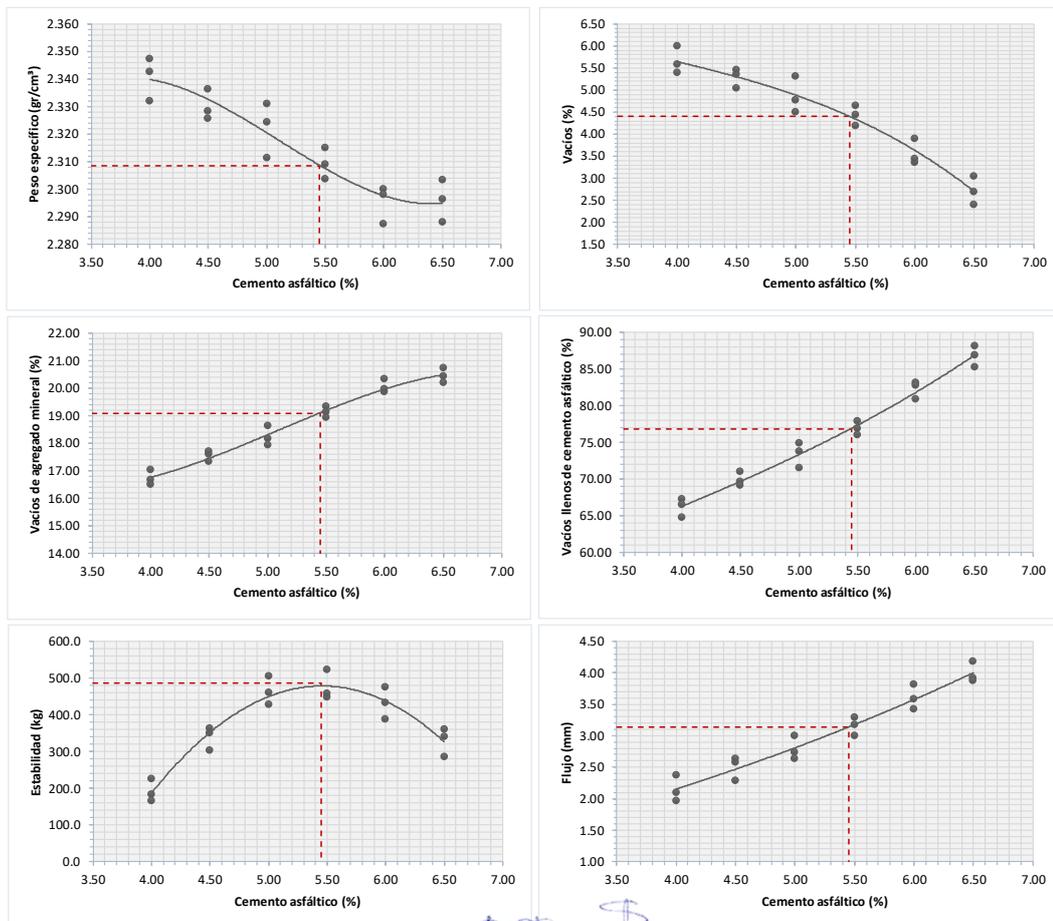
Observaciones: \_\_\_\_\_



ING. CIVIL ARNALDO C. ESPINOZA ESPINOZA  
CIP 152927  
**ICCSAH**  
INGENIERÍA DE CALIDAD EN CONCRETO, SUELOS ASFALTO E HIDRÁULICA S.A.C.

<b>PROYECTO:</b>	EFFECTO DE LA INCORPORACIÓN DE AGREGADOS ARTIFICIAL DE ARCILLA CRISTALIZADA REFORZAMIENTO CON OXIDO DE CALCIO EN LA PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE HUANCAYO 2024
<b>CONSULTOR:</b>	BACH. DIONICIO YARINGAÑO, MAEL ROY / BACH. DIONICIO YARINGAÑO, GINO
<b>UBICACIÓN:</b>	HUANCAYO
<b>CANTERA:</b>	---
<b>MUESTRA:</b>	Gráficas Diseño Marshall
<b>FECHA:</b>	06/07/2024

**GRÁFICAS MARSHALL PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE**  
(MTC E 504)



  
 Ing. Civil Arnold C. Espinoza Espinoza  
 CIP-46827  
**ICCSAH**  
 INGENIERÍA DE CALIDAD EN CONCRETO, SUELOS ASFALTO E HIDRÁULICA S.A.C.



<b>PROYECTO:</b>	EFFECTO DE LA INCORPORACIÓN DE AGREGADOS ARTIFICIAL DE ARCILLA CRISTALIZADA REFORZAMIENTO CON OXIDO DE CALCIO EN LA PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE HUANCAYO 2024
<b>CONSULTOR:</b>	BACH. DIONICIO YARINGAÑO, MAEL ROY / BACH. DIONICIO YARINGAÑO, GINO
<b>UBICACIÓN:</b>	HUANCAYO
<b>CANtera:</b>	---
<b>MUESTRA:</b>	Bqt.01 / Bqt.18
<b>FECHA:</b>	09/07/2024

**PORCENTAJE DE VACIOS DE AIRE EN MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS DENSAS Y ABIERTAS  
(MTC E 505)**

Muestras	ÓXIDO DE CALCIO (%)	VACÍOS DE AIRE (%)	PESO UNITARIO (gr/cm <sup>3</sup> )	VACÍOS DE AGREGADO MINERAL (%)	VACÍOS LLENOS DE CEMENTO ASFÁLTICO (%)
Bqt.01	0.0	4.26	2.313	19.00	77.59
Bqt.02		4.70	2.302	19.37	75.74
Bqt.03		4.33	2.311	19.06	77.28
Bqt.04	6.0	4.66	2.303	19.34	75.90
Bqt.05		4.15	2.316	18.91	78.05
Bqt.06		4.27	2.313	19.01	77.52
Bqt.07	12.0	4.06	2.318	18.83	78.46
Bqt.08		4.28	2.313	19.02	77.49
Bqt.09		3.94	2.321	18.73	78.98
Bqt.10	18.0	3.79	2.325	18.60	79.64
Bqt.11		3.54	2.330	18.39	80.74
Bqt.12		3.88	2.322	18.68	79.23
Bqt.13	24.0	3.56	2.330	18.41	80.66
Bqt.14		3.86	2.323	18.66	79.31
Bqt.15		3.38	2.334	18.25	81.50

Ing. Civil Dionicio Y. Espinoza  
 CIP-120827  
 ICCSAH  
 INGENIERÍA DE CALIDAD EN CONCRETO, SUELOS ASFALTO E HIDRÁULICA S.A.C.

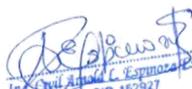


INGENIERÍA DE CALIDAD EN CONCRETO, SUELOS ASFALTO E HIDRÁULICA S.A.C.

<b>PROYECTO:</b>	EFFECTO DE LA INCORPORACIÓN DE AGREGADOS ARTIFICIAL DE ARCILLA CRISTALIZADA REFORZAMIENTO CON OXIDO DE CALCIO EN LA PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE HUANCAYO 2024
<b>CONSULTOR:</b>	BACH. DIONICIO YARINGAÑO, MAEL ROY / BACH. DIONICIO YARINGAÑO, GINO
<b>UBICACIÓN:</b>	HUANCAYO
<b>CANtera:</b>	---
<b>MUESTRA:</b>	Bqt.01 / Bqt.18
<b>FECHA:</b>	09/07/2024

**RESISTENCIA DE MEZCLAS BITUMINOSAS POR MARSHALL PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE**  
(MTC E 504)

Muestras	ÓXIDO DE CALCIO (%)	FLUJO (mm)	ESTABILIDAD SIN CORREGIR (kg)	FACTOR DE CORRECCIÓN	ESTABILIDAD CORREGIDA (kg)
Bqt.01	0.0	3.30	460.2	1.0	460.2
Bqt.02		2.79	527.6	1.0	527.6
Bqt.03		3.35	473.6	1.0	473.6
Bqt.04	6.0	3.22	485.3	1.0	485.3
Bqt.05		2.61	526.9	1.0	526.9
Bqt.06		2.89	496.3	1.0	496.3
Bqt.07	12.0	2.80	484.9	1.0	484.9
Bqt.08		2.95	502.9	1.0	502.9
Bqt.09		2.57	548.0	1.0	548.0
Bqt.10	18.0	2.11	546.5	1.0	546.5
Bqt.11		2.58	613.4	1.0	613.4
Bqt.12		1.95	600.1	1.0	600.1
Bqt.13	24.0	2.15	616.2	1.0	616.2
Bqt.14		1.68	562.1	1.0	562.1
Bqt.15		1.60	577.7	1.0	577.7

  
 Ing. Gualberto C. Espinoza  
 CIP 152927  
  
 INGENIERÍA DE CALIDAD EN CONCRETO, SUELOS ASFALTO E HIDRÁULICA S.A.C.



INGENIERÍA DE CALIDAD EN CONCRETO, SUELOS ASFALTO E HIDRÁULICA S.A.C.

<b>PROYECTO:</b>	EFECTO DE LA INCORPORACIÓN DE AGREGADOS ARTIFICIAL DE ARCILLA CRISTALIZADA REFORZAMIENTO CON OXIDO DE CALCIO EN LA PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE HUANCAYO 2024
<b>CONSULTOR:</b>	BACH. DIONICIO YARINGAÑO, MAEL ROY / BACH. DIONICIO YARINGAÑO, GINO
<b>UBICACIÓN:</b>	HUANCAYO
<b>CANtera:</b>	---
<b>MUESTRA:</b>	BQ-19 a BQ-33
<b>FECHA:</b>	15/07/2024

### ENSAYO DE INMERSIÓN-COMPRESIÓN

(MTC E 518)

BRIQUETA	ÓXIDO DE CALCIO	Baño de aire a 25°C-96h	Baño de agua a 49°C-96	ÍNDICE DE RESISTENCIA RETENIDA
		RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	
	(%)	(kg/cm <sup>2</sup> )	(kg/cm <sup>2</sup> )	(%)
Bqt.19	0.0	32.61	15.77	48.36
Bqt.20		31.33	16.62	53.06
Bqt.21		34.10	15.63	45.83
Bqt.22	6.0	26.06	13.62	52.26
Bqt.23		29.03	16.16	55.65
Bqt.24		28.52	16.35	57.33
Bqt.25	12.0	25.24	13.89	55.02
Bqt.26		26.82	16.89	62.99
Bqt.27		24.58	14.25	57.98
Bqt.28	18.0	21.60	13.71	63.46
Bqt.29		23.49	14.23	60.58
Bqt.30		22.57	15.26	67.62
Bqt.31	24.0	18.65	12.92	69.29
Bqt.32		19.81	12.82	64.70
Bqt.33		19.58	13.00	66.41

Ing. Cyril Aranda C. Espinoza Espinoza  
 CIP-12327  
**ICCSAH**  
 INGENIERÍA DE CALIDAD EN CONCRETO, SUELOS ASFALTO E HIDRÁULICA S.A.C.



**PROYECTO:** EFECTO DE LA INCORPORACIÓN DE AGREGADOS ARTIFICIAL DE ARCILLA CRISTALIZADA REFORZAMIENTO CON OXIDO DE CALCIO EN LA PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE HUANCAYO 2024

**CONSULTOR:** BACH. DIONICIO YARINGAÑO, MAEL ROY / BACH. DIONICIO YARINGAÑO, GINO

**UBICACIÓN:** HUANCAYO

**CANTERA:** ---

**MUESTRA:** Bqt.34 / Bqt.51

**FECHA:** 18/07/2024

**RESISTENCIA DE MEZCLAS BITUMINOSAS POR MARSHALL PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE - TRÁFICO MEDIO (MTC E 504)**

Muestras	CEMENTO ASFÁLTICO (%)	VACÍOS DE AIRE (%)	FLUJO (mm)	ESTABILIDAD SIN CORREGIR (kg)	FACTOR DE CORRECCIÓN	ESTABILIDAD CORREGIDA (kg)
Bqt.34	4.0	5.55	1.51	259.0	1.0	259.0
Bqt.35		5.62	1.92	300.0	1.0	300.0
Bqt.36		5.99	1.59	229.9	1.0	229.9
Bqt.37	4.5	4.94	2.11	426.1	1.0	426.1
Bqt.38		5.23	1.97	465.5	1.0	465.5
Bqt.39		5.30	1.65	475.0	1.0	475.0
Bqt.40	5.0	4.65	1.68	539.2	1.0	539.2
Bqt.41		4.38	1.84	596.1	1.0	596.1
Bqt.42		4.84	2.19	546.0	1.0	546.0
Bqt.43	5.5	3.69	1.98	551.8	1.0	551.8
Bqt.44		3.96	2.23	593.5	1.0	593.5
Bqt.45		3.58	2.41	616.2	1.0	616.2
Bqt.46	6.0	3.33	2.56	534.6	1.0	534.6
Bqt.47		3.54	3.13	504.8	1.0	504.8
Bqt.48		3.27	2.97	557.1	1.0	557.1
Bqt.49	6.5	2.82	3.58	502.1	1.0	502.1
Bqt.50		2.90	3.66	446.2	1.0	446.2
Bqt.51		2.59	3.27	493.0	1.0	493.0

Ing. Dionicio Yaringaño
   
 CIP 152827
   
**ICCSAH**
  
 INGENIERÍA DE CALIDAD EN CONCRETO, SUELOS ASFALTO E HIDRÁULICA S.A.C.

<b>PROYECTO:</b>	EFFECTO DE LA INCORPORACIÓN DE AGREGADOS ARTIFICIAL DE ARCILLA CRISTALIZADA REFORZAMIENTO CON OXIDO DE CALCIO EN LA PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE HUANCAYO 2024
<b>CONSULTOR:</b>	BACH. DIONICIO YARINGAÑO, MAEL ROY / BACH. DIONICIO YARINGAÑO, GINO
<b>UBICACIÓN:</b>	HUANCAYO
<b>CANTERA:</b>	---
<b>MUESTRA:</b>	Bqt.52 / Bqt.69
<b>FECHA:</b>	21/07/2024

**RESISTENCIA DE MEZCLAS BITUMINOSAS POR MARSHALL PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE - TRÁFICO BAJO**  
(MTC E 504)

Muestras	CEMENTO ASFÁLTICO (%)	VACÍOS DE AIRE (%)	FLUJO (mm)	ESTABILIDAD SIN CORREGIR (kg)	FACTOR DE CORRECCIÓN	ESTABILIDAD CORREGIDA (kg)
Bqt.52	4.0	5.68	1.60	311.4	1.0	311.4
Bqt.53		5.95	1.36	359.5	1.0	359.5
Bqt.54		5.49	1.74	370.5	1.0	370.5
Bqt.55	4.5	4.93	1.99	498.3	1.0	498.3
Bqt.56		4.88	1.62	474.9	1.0	474.9
Bqt.57		5.26	1.54	417.4	1.0	417.4
Bqt.58	5.0	4.50	1.71	563.8	1.0	563.8
Bqt.59		4.29	1.50	595.5	1.0	595.5
Bqt.60		4.63	2.06	538.5	1.0	538.5
Bqt.61	5.5	4.17	2.11	568.6	1.0	568.6
Bqt.62		3.55	1.75	626.0	1.0	626.0
Bqt.63		3.73	1.90	557.1	1.0	557.1
Bqt.64	6.0	3.18	1.95	586.6	1.0	586.6
Bqt.65		3.43	2.62	561.3	1.0	561.3
Bqt.66		3.13	2.29	525.5	1.0	525.5
Bqt.67	6.5	2.91	2.91	561.3	1.0	561.3
Bqt.68		2.67	2.55	513.5	1.0	513.5
Bqt.69		3.15	2.99	498.2	1.0	498.2

**CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN  
MT - ML - 018 - 2023***Área de Metrología  
Laboratorio de Masas*

Página 1 de 4

<b>1. Expediente</b>	<b>15150</b>	Este certificado de calibración documenta la trazabilidad a los patrones nacionales o internacionales, que realizan las unidades de la medición de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI).
<b>2. Solicitante</b>	<b>INGENIERÍA DE CALIDAD EN CONCRETO SUELOS ASFALTO E HIDRÁULICA S.A.C.</b>	
<b>3. Dirección</b>	<b>Jr. Los Mercaderes N° 1022 El Tambo Huancayo - JUNÍN</b>	
<b>4. Equipo de medición</b>	<b>BALANZA ELECTRÓNICA</b>	Los resultados son válidos en el momento de la calibración. Al solicitante le corresponde disponer en su momento la ejecución de una recalibración, la cual está en función del uso, conservación y mantenimiento del instrumento de medición o a reglamento vigente.
<b>Capacidad Máxima</b>	<b>30000 g</b>	
<b>División de escala (d)</b>	<b>1 g</b>	
<b>Div. de verificación (e)</b>	<b>NO INDICA (*)</b>	
<b>Clase de exactitud</b>	<b>II</b>	METROLOGÍA & TÉCNICAS S.A.C. no se responsabiliza de los perjuicios que pueda ocasionar el uso inadecuado de este instrumento, ni de una incorrecta interpretación de los resultados de la calibración aquí declarados.
<b>Marca</b>	<b>A&amp;A INSTRUMENTS</b>	
<b>Modelo</b>	<b>WT30000XEJ</b>	
<b>Número de Serie</b>	<b>130420176</b>	
<b>Capacidad mínima</b>	<b>20 g</b>	Este certificado de calibración no podrá ser reproducido parcialmente sin la aprobación por escrito del laboratorio que lo emite.
<b>Identificación</b>	<b>NO INDICA</b>	
<b>5. Fecha de Calibración</b>	<b>2023-05-25</b>	El certificado de calibración sin firma y sello carece de validez.

Fecha de Emisión

2023-05-25

Jefe del Laboratorio de Metrología

  
Ing. WILLIAMS PÉREZ COELLO

Sello



*Metrología y Técnicas S.A.C.*  
Av. San Diego de Alcalá Mz F1 Lote 24 Urb. San Diego - LIMA - PERÚ  
Telf.: (511) 340-0642  
Cel.: (511) 971 439 272 / 971 439 282  
RPM: \*849 272 / \*849 282

email: [metrologia@metrologiatecnicas.com](mailto:metrologia@metrologiatecnicas.com)  
[ventas@metrologiatecnicas.com](mailto:ventas@metrologiatecnicas.com)  
WEB: [www.metrologiatecnicas.com](http://www.metrologiatecnicas.com)

**CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN**  
**MT - ML - 018 - 2023***Área de Metrología*  
*Laboratorio de Masas*

Página 2 de 4

**6. Método de Calibración**

La calibración se realizó según el método descrito en el PC-011: "Procedimiento de Calibración de Balanzas de Funcionamiento No Automático Clase I y Clase II" del SNM-INDECOPI. Cuarta Edición.

**7. Lugar de calibración**

Laboratorio de Masa de METROLOGÍA & TÉCNICAS S.A.C. - METROTEC  
Av. San Diego de Alcalá Mz. F1 lote 24 Urb. San Diego Vipol, San Martín de Porres - Lima

**8. Condiciones Ambientales**

	Inicial	Final
Temperatura	23,4 °C	23,2 °C
Humedad Relativa	51 %	49 %

**9. Patrones de referencia**

Los resultados de la calibración son trazables a la Unidad de Medida de los Patrones Nacionales de Masa del Servicio Nacional de Metrología SNM - INDECOPI en concordancia con el Sistema Internacional de Unidades de Medidas (SI) y el Sistema Legal de Unidades del Perú (SLUMP).

Trazabilidad	Patrón utilizado	Certificado de calibración
PESAS (Clase de exactitud E1) INDECOPI/SNM 140260001/M1	PESAS (Clase de Exactitud F1)	INDECOPI/SNM LM-C-305-202
PESAS (Clase de exactitud E1) INDECOPI/SNM 140260001/M1 130499001 ; MS-2020-022	PESAS (Clase de Exactitud M1)	INDECOPI/SNM LM-795-202
PESAS (Clase de exactitud E2) INDECOPI/SNM LM-1021-2020	PESA (Clase de Exactitud M1)	INDECOPI/SNM LM-800-2022
PESAS (Clase de exactitud E2) INDECOPI/SNM LM-694-2020	PESAS (Clase de Exactitud M1)	SG NORTEC SGP-012-2022

**10. Observaciones**

- Se colocó una etiqueta autoadhesiva con la indicación de **CALIBRADO**.
- (\*) Para los cálculos de los resultados se asumió  $e = 10d$  según procedimiento de calibración.

### CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN MT - ML - 018 - 2023

Área de Metrología  
Laboratorio de Masas

Página 3 de 4

#### 11. Resultados de Medición

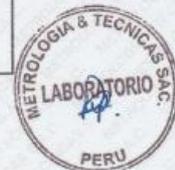
##### INSPECCIÓN VISUAL

AJUSTE DE CERO	TIENE	ESCALA	NO TIENE
OSCILACIÓN LIBRE	TIENE	CURSOR	NO TIENE
PLATAFORMA	TIENE	NIVELACIÓN	TIENE
SISTEMA DE TRABA	NO TIENE		

##### ENSAYO DE REPETIBILIDAD

	Inicial	Final
Temperatura	23,4 °C	23,7 °C

Medición Nº	Carga L1 = 15000 g			Carga L2 = 30000 g		
	I (g)	ΔL (g)	E (g)	I (g)	ΔL (g)	E (g)
1	15000	0,9	4,1	30000	0,9	4,1
2	15000	1,0	4,0	30000	0,9	4,1
3	15000	0,7	4,3	29999	0,9	3,1
4	15000	0,7	4,3	29999	0,9	3,1
5	15000	0,9	4,1	30000	0,9	4,1
6	15000	0,9	4,1	30000	0,9	4,1
7	15000	0,9	4,1	29999	0,9	3,1
8	15000	0,7	4,3	29999	1,0	3,0
9	15000	0,9	4,1	30000	0,7	4,3
10	15000	0,9	4,1	30000	0,9	4,1



##### ENSAYO DE EXCENRICIDAD

2	5
1	
3	4

Posición de las cargas

	Inicial	Final
Temperatura	23,8 °C	23,3 °C

Posición de la Carga	Determinación del Error en Cero Eo				Determinación del Error Corregido Ec				
	Carga Mínima*	I (g)	ΔL (g)	Eo (g)	Carga L (g)	I (g)	ΔL (g)	E (g)	Ec (g)
1	10 g	10	0,9	4,1	10000	10000	1,2	3,8	-0,3
2		10	0,9	4,1		9999	0,5	3,5	-0,6
3		10	0,9	4,1		10001	0,9	5,1	1,0
4		10	0,7	4,3		10000	0,9	4,1	-0,2
5		10	0,9	4,1		9999	0,9	3,1	-1,0

\* Valor entre 0 y 10e

Metrología y Técnicas S.A.C.  
Av. San Diego de Alcalá Mz F1 Lote 24 Urb. San Diego - LIMA - PERÚ  
Telf.: (511) 540-0642  
Cel.: (511) 971 439 272 / 971 439 282  
RPM: \*849 272 / \*849 282

email: metrologia@metrologiatecnicas.com  
ventas@metrologiatecnicas.com  
WEB: www.metrologiatecnicas.com

### CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN MT - ML - 018 - 2023

Área de Metrología  
Laboratorio de Masas

Página 4 de 4

#### ENSAYO DE PESAJE

Temperatura	Inicial	Final
	23,3 °C	23,2 °C

Carga L (g)	CRECIENTES				DECRECIENTES			
	l (g)	ΔL (g)	E (g)	Ec (g)	l (g)	ΔL (g)	E (g)	Ec (g)
Eo	10	0,9	4,1					
20	20	0,9	4,1	0,0	12	0,9	-3,9	-8,0
50	49	1,0	3,0	-1,1	42	0,9	-3,9	-8,0
100	100	1,2	3,8	-0,3	92	0,9	-3,9	-8,0
200	198	0,9	2,1	-2,0	194	1,4	-2,4	-6,5
500	499	0,9	3,1	-1,0	493	0,7	-2,7	-6,8
1000	998	0,9	2,1	-2,0	994	0,9	-1,9	-6,0
5000	4998	0,9	2,1	-2,0	4993	0,9	-2,9	-7,0
10000	9998	0,9	2,1	-2,0	9995	1,4	-1,4	-5,5
15000	14997	0,9	1,1	-3,0	14994	0,9	-1,9	-6,0
20000	19997	0,9	1,1	-3,0	19995	1,4	-1,4	-5,5
30000	29995	0,9	-0,9	-5,0	29994	0,9	-1,9	-6,0

Leyenda: L: Carga aplicada a la balanza. ΔL: Carga adicional. E<sub>0</sub>: Error en cero.  
l: Indicación de la balanza. E: Error encontrado. E<sub>c</sub>: Error corregido.

Incertidumbre expandida de medición  $U = 2 \times \sqrt{(0,46989 + 0,00000001435 R^2)}$

Lectura corregida  $R_{CORREGIDA} = R + 0,000176 R$



#### 12. Incertidumbre

La incertidumbre reportada en el presente certificado es la incertidumbre expandida de medición que resulta de multiplicar la incertidumbre estándar por el factor de cobertura k=2, el cual proporciona un nivel de confianza de aproximadamente 95%.

La incertidumbre expandida de medición fue calculada a partir de los componentes de incertidumbre de los factores de influencia en la calibración. La incertidumbre indicada no incluye una estimación de variaciones a largo plazo.

Fin del documento



### Certificado de Calibración - Laboratorio de Metrología de Fuerza

Calibration Certificate - Force Metrology Laboratory

F-261

Página / Page 1 de 1

<b>Equipo</b> <i>Instrument</i>	EQUIPO AUTOMÁTICO - PARA ENSAYO DE COMPRESIÓN UNIVERSAL N	Los resultados emitidos en este certificado se refieren al momento y condiciones en que se realizaron las mediciones. Dichos resultados corresponden al ítem relacionado en esta página. El laboratorio que lo emite no se responsabiliza de los perjuicios que puedan derivarse del uso inadecuado de los instrumentos y/o de la información suministrada por el solicitante.
<b>Fabricante</b> <i>Manufacturer</i>	PINZUAR LTDA	Este certificado de calibración documenta y asegura la trazabilidad a patrones nacionales e internacionales, que reproducen las unidades de medida de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI).
<b>Modelo</b> <i>Model</i>	PS - 107 - 2	El usuario es responsable de la calibración de los instrumentos en apropiados intervalos de tiempo.
<b>Número de Serie</b> <i>Serial Number</i>	151 -	<i>The results issued in this certificate refer to the moment and conditions in which the measurements were made. These results only relate to the item mentioned on page number one. The laboratory that issues it is not responsible for the damages that may result from the improper use of the instruments and/or the information provided by the customer.</i>
<b>Identificación Interna</b> <i>Internal Identification</i>	No Presenta -	<i>This calibration certificate documents and ensures the traceability to national and international standards, which realize the units of measurement according to the International System of Units (SI).</i>
<b>Intervalo de Medición</b> <i>Measurement Range</i>	Del 10 % al 100 %	<i>The user is responsible for the calibration of the instruments in appropriate intervals of time.</i>
<b>Solicitante</b> <i>Customer</i>	INGENIERIA DE CALIDAD EN CONCRETO SUELOS ASFALTO E HIDRAULICA S.A.C.	<i>The results issued in this certificate refer to the moment and conditions in which the measurements were made. These results only relate to the item mentioned on page number one. The laboratory that issues it is not responsible for the damages that may result from the improper use of the instruments and/or the information provided by the customer.</i>
<b>Dirección</b> <i>Address</i>	JR. LOS MERCADERES NRO. 1022 A.H. JUSTICIA PAZ Y VIDA ( 1 CD. MCDO. MICHAELA BASTIDAS) JUNIN-HUANCAYO- EL TAMBO	<i>This calibration certificate documents and ensures the traceability to national and international standards, which realize the units of measurement according to the International System of Units (SI).</i>
<b>Ciudad</b> <i>City</i>	HUANCAYO	<i>The user is responsible for recalibrating the measuring instruments at appropriate time intervals.</i>
<b>Fecha de Recepción</b> <i>Date of Receipt</i>	2024 - 02 - 24	
<b>Fecha de Calibración</b> <i>Date of Calibration</i>	2024 - 02 - 24	
<b>Fecha de Emisión</b> <i>Date of Issue</i>	2024 - 02 - 25	
<b>Número de páginas del certificado, incluyendo anexos</b> <i>Number of pages of the certificate and documents attached</i>	06	

Si la aprobación del Laboratorio de Metrología Pinzuar Ltda. no se puede reproducir el informe, siempre cuando se reproduce en su totalidad, ya que proporciona la seguridad que los partes del certificado no se calien de contexto. Los certificados de calibración en línea no son válidos.  
Without the approval of the Pinzuar Metrology Laboratory, the report can not be reproduced, except when it is reproduced in its entirety, since it provides the security that the parts of the certificate are not taken out of context. Unassigned calibration certificates are not valid.

**Firmas Autorizadas**  
*Authorized signatures*

METROLOGO LABORATORIO DE METROLOGÍA



**TABLA DE ERRORES DE LA CALIBRACION**

Capacidad:		2 500,0	N		División de Escala						0,2		N	
Porcenta je de Carga	Promedio de las Lecturas	Equivalente	CALCULO DE ERRORES										Incertidumbre U	
			Exactitud (q)		Repetibilidad (b)		Resolución Relativa (a)		Reversibilidad (v)		Accesorios (Acc)			
%	N	N	N	%	N	%	%	N	%	N	%	N	%	
10	250,358	250,00	-0,4	-0,14	0,1	0,04	0,08	-	-	-	-	1,3	0,53	
20	499,678	500,00	0,3	0,09	0,1	0,02	0,04	-	-	-	-	2,6	0,53	
30	748,992	750,00	1,0	0,13	0,1	0,01	0,03	-	-	-	-	4,0	0,53	
40	998,555	1 000,0	1,4	0,14	0,1	0,01	0,02	-	-	-	-	5,3	0,53	
50	1 248,06	1 250,0	1,9	0,16	0,3	0,02	0,02	-	-	-	-	6,6	0,53	
60	1 498,57	1 500,0	-1,4	-0,10	-0,1	0,01	0,01	-	-	-	-	7,9	0,53	
70	1 747,33	1 750,0	2,7	0,15	0,2	0,01	0,01	-	-	-	-	9,3	0,53	
80	1 996,55	2 000,0	3	0,17	0	0,02	0,01	-	-	-	-	11	0,53	
90	2 246,25	2 250,0	4	0,17	0	0,00	0,01	-	-	-	-	12	0,53	
100	2 495,67	2 500,0	4	0,17	0	0,00	0,01	-	-	-	-	13	0,53	
ERROR RELATIVO DE CERO			0,000		0,000		---		0,000		---			

ERRORES RELATIVOS ABSOLUTOS MÁXIMOS OBTENIDOS DE LA CALIBRACION					
EXACTITUD q (%)	REPETIBILIDAD b (%)	RESOLUCIÓN RELATIVA a (%)	ERROR DE CERO e (%)	ACCESORIOS (%)	REVERSIBILIDAD v (%)
0,17	0,04	0,08	0,000	---	---

**RELACION DE LOS ERRORES OBTENIDOS DE LA CALIBRACION**

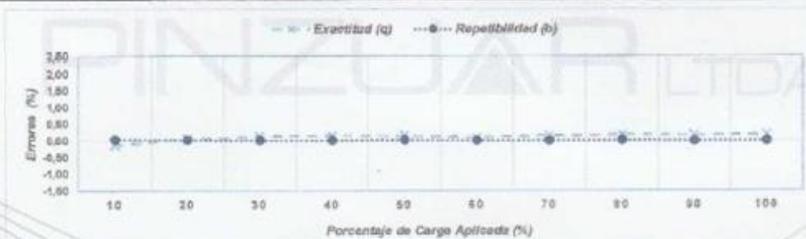


Figura 1. Relación de los errores de Exactitud (q) y de Repetibilidad (b) respecto a la carga aplicada en la calibración.

**CONDICIONES AMBIENTALES DURANTE LA CALIBRACION**

Temperatura mínima:	21,2 °C	Temperatura máxima:	21,5 °C
Humedad relativa mínima:	62,3 % HR	Humedad relativa máxima:	63,1 % HR



**DATOS TÉCNICOS**

**Tipo de equipo:** EQUIPO AUTOMÁTICO PARA ENSAYO DE COMPRESIÓN UNIVERSAL  
**Capacidad:** 2500 N **Dirección de carga:** COMPRESIÓN  
**Ubicación:** Laboratorio

**MÉTODO DE CALIBRACIÓN**

En el método de calibración se mide el desplazamiento en el indicador de caratula propio de la máquina y para el tiempo se emplea un cronómetro.

**RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN**

**Medición en mm / min**

RANGO BAJO				
Tiempo (min)		1		
Velocidad mm / min	Lectura 1 mm / min	Lectura 2 mm / min	Lectura 3 mm / min	Promedio mm / min
0,000	0,000	0,000	0,000	0,00000
0,030	0,029	0,028	0,029	0,02867
0,060	0,060	0,035	0,060	0,05167
0,090	0,090	0,090	0,090	0,09000
0,120	0,120	0,120	0,121	0,12033
0,150	0,150	0,150	0,151	0,15033

RANGO ALTO				
Tiempo (min)		1		
Velocidad mm / min	Lectura 1 mm / min	Lectura 2 mm / min	Lectura 3 mm / min	Promedio mm / min
0,000	0,000	0,000	0,000	0,00000
0,300	0,300	0,300	0,301	0,3003
0,600	0,600	0,601	0,601	0,6007
0,900	0,908	0,908	0,909	0,9083
1,200	1,220	1,221	1,220	1,2203
1,500	1,488	1,488	1,490	1,4880



**DATOS TÉCNICOS**

Tipo de equipo:	EQUIPO AUTOMÁTICO PARA ENSAYO DE COMPRESIÓN UNIVERSAL		
Capacidad:	2500 N	Dirección de carga:	COMPRESIÓN
Ubicación:	Laboratorio		

**MÉTODO DE CALIBRACIÓN**

El método de calibración es por comparación directa, se realizó la medición de fuerza ejercida por el brazo para cada relación y carga aplicada. Dicha medición se realizó ubicando el transductor de fuerza y aumentando el valor de la carga con las pesas propias del equipo de corte directo, la fuerza real aplicada se mide sobre una celda calibrada con trazabilidad.

Se realizó la prueba de carga y desplazamiento con el disco metálico según las disposiciones de la Norma INVIAS INV E-151 Numeral 7.1.1 y 7.1.2

**RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN**

**FACTOR DE MULTIPLICACIÓN 1 : (5)**

CARGA			Equivalente	Lectura 1	Lectura 2	Lect. Promedio	Factor	Factor Promedio
Mq.	X	Pl.						
	kgf		N	kgf	kgf	kgf		
1	2		19,613	9,993	9,983	9,988	4,994	4,976
2	4		39,227	19,899	19,909	19,904	4,976	
3	8		78,453	39,758	39,768	39,76	4,970	
4	16		156,906	79,509	79,519	79,51	4,970	
5	32		313,813	159,19	159,99	159,09	4,972	

**FACTOR DE MULTIPLICACIÓN 1 : (10)**

CARGA			Equivalente	Lectura 1	Lectura 2	Lect. Promedio	Factor	Factor Promedio
Mq.	X	Pl.						
	kgf		N	kgf	kgf	kgf		
1	2		19,613	19,807	19,828	19,818	9,909	9,913
2	4		39,227	39,636	39,626	39,631	9,908	
3	8		78,453	79,286	79,296	79,29	9,911	
4	16		156,906	158,669	158,659	158,66	9,916	
5	32		313,813	317,456	317,476	317,47	9,921	



### INCERTIDUMBRE DE LA MEDICIÓN

La incertidumbre expandida de la medición esta dada en la tabla resultado de la calibración pagina No 3. La incertidumbre de medición fue calculada utilizando un factor de cobertura  $k = 2,01$ . Para un nivel de confianza aproximado del 95,45% para una distribución "t-student" y fue estimada con el documento: JCGM 100:2008. GUM 1995 with minor corrections. Evaluation of measurement data Guide to the expression of uncertainty in measurement. First Edition. September 2008

### CLASIFICACIÓN DEL SISTEMA DE MEDICIÓN DE FUERZA

La siguiente Tabla proporciona los valores máximos permitidos, para los diferentes errores relativos del sistema de medición de fuerza y para la resolución relativa del indicador de fuerza que caracteriza una escala de la máquina de ensayo de acuerdo con la clase apropiada para sus ensayos según la sección 7 de la Norma NTC-ISO 7500-1:2007.

CLASE DE LA ESCALA DE LA MÁQUINA	EXACTITUD (a)	REPETIBILIDAD (b)	REVERSIBILIDAD (v)	CERO (c)	RESOLUCIÓN RELATIVA (e)
0,5	0,5	0,5	0,75	0,05	0,25
1,0	1,0	1,0	1,50	0,10	0,50
2,0	2,0	2,0	3,00	0,20	1,00
3,0	3,0	3,0	4,50	0,30	1,50

### TRAZABILIDAD

El/Los certificado(s) de calibración de el/los patrón(es) usado(s) como referencia para la calibración en cuestión, que se mencionan en la página dos se pueden descargar accediendo al enlace en el código QR.



### CONTACTO

Funcionario con quien se estableció comunicación de manera directa para tratar temas relacionados con la solicitud del servicio

**Nombre** JOB MAURICIO FLORES  
**Organización** INGENIERÍA DE CALIDAD EN CONCRETO SUELOS ASFALTO E HIDRAULICA S.A.C.  
**Cargo** GERENTE GENERAL  
**Teléfono** 986847109,0  
**Correo Electrónico** ICCSAHSAC@GMAIL.COM

### OBSERVACIONES

1. Se realizó una inspección general del equipo encontrándose en buen estado de funcionamiento y apto para su calibración.
2. En cualquier caso, el equipo debe verificarse si se somete a ajustes o reparaciones importantes.
3. La calibración se realizó bajo condiciones establecidas en el procedimiento interno LM-PC-27, en donde se especifica un intervalo de temperatura comprendido entre 10°C y 35°C, con una variación máxima de 2°C durante cada serie de medición.
4. Con el presente certificado de calibración se adjunta la estampilla de calibración No. **F-261**

Fin del Certificado



## Anexo 4. Panel fotográfico

### 1. Caracterización de agregado artificial de arcilla



Anexo N° 1. Producción de agregado artificial de arcilla con agua con óxido de calcio



Anexo N° 2. Tras la mezcla de la arcilla triturada con el óxido de calcio se forman masas de arcilla y las bolitas resultantes se colocan en una bandeja para ser llevadas al horno.



Anexo N° 3. Las masas de arcilla triturada con óxido de calcio en la bandeja son llevadas al horno precalentado, donde se alcanzarán los 1000 grados para ser calentados por 24 h.



Anexo N° 4. Muestra de agregado artificial de arcilla resultante.

## 2. Análisis granulométrico



Anexo N° 5. Muestras de agregados: arena natural zarandeada y arena triturada extraídas de la cantera de Pilcomayo.



Anexo N° 6. Muestra de agregado artificial arcilla para caracterización granulométrica.



Anexo N° 7. Peso de muestra correspondiente a 3000 gramos de agregado artificial de arcilla, según las especificaciones MTC E 204 este es el peso requerido para realizar un análisis granulométrico adecuado.



Anexo N°8. Comienzo de procedimiento de clasificación por tamizado de agregado artificial de arcilla, se debe establecer un tiempo adecuado para llevar a cabo el tamizado correcto de la muestra.



Anexo N° 9. Peso total de la muestra de 1500 gramos del árido fino, arena de origen natural, según la normativa MTC E 204 este es el peso estipulado para realizar correctamente el análisis granulométrico del material fino.



Anexo N° 10. Inicio de la clasificación por tamizado del AF correspondiente a la arena natural, es necesario estimar el tiempo adecuado para efectuar un tamizado correcto de la muestra.



Anexo N° 11. Peso de muestra de 1500 gramos de arena triturada proveniente de cantera, de acuerdo con la norma MTC E 204 este el peso indicado para llevar a cabo un correcto análisis granulométrico para arenas.



Anexo N° 12. Inicio de la fase de la clasificación arena triturada mediante el tamizado, de igual manera debe controlarse el tiempo adecuado para realizar un tamizado correcto de la muestra.



Anexo N° 13. Muestra de cal hidratada para el análisis granulométrico.



Anexo N° 14. Inicio de proceso de tamizado de la cal hidratada como filler

### 3. Mezcla de agregados



Anexo N° 15. Se muestra la clasificación de los agregados de acuerdo los tamaños del tamiz establecidas en la combinación teórica MAC-2



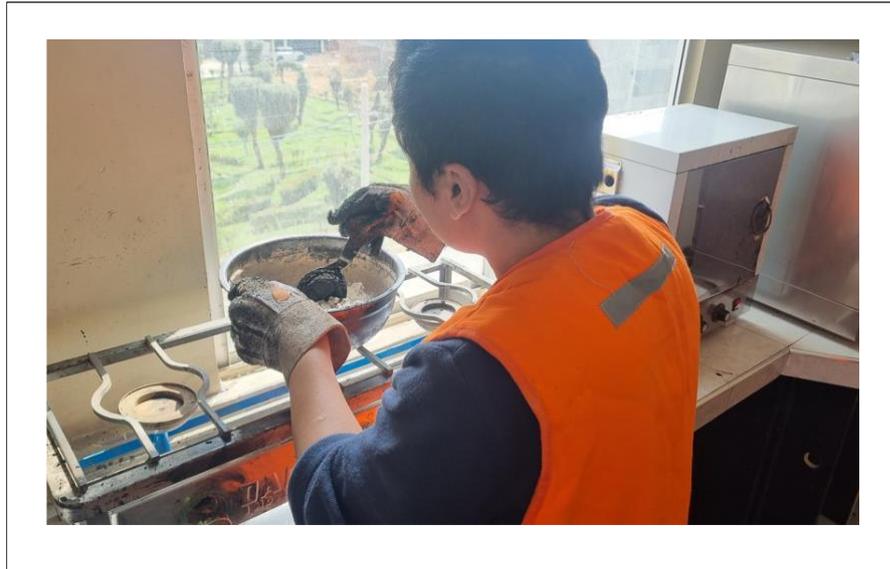
Anexo N° 16. Determinación del Peso total del agregado (AF, AG) de acuerdo con la combinación teórica MAC 02, para que la mezcla total alcance un peso de 1250 gr.



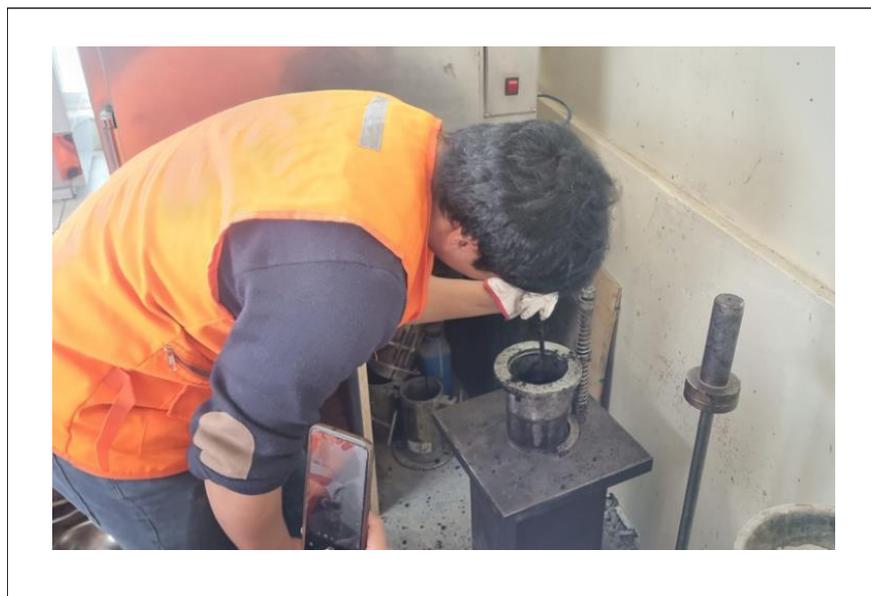
Anexo N° 17. Ligante asfáltico de PEN 85-100, el cual tuvo que mantenerse a altas temperaturas en el horno para elaborar la mezcla asfáltica en caliente.



Anexo N° 18. Incorporación del ligante asfáltico de PEN85-100 en la mezcla de agregados.



Anexo N° 19. Mezclado de los componentes del diseño MAC-2 a una temperatura máxima de 160°C para ser colocado posteriormente en los moldes.



Anexo N° 20. Colocado de la mezcla bituminosa en caliente al molde previamente precalentado, para ello primeramente debe ponerse un papel de filtro en la base de la briqueta y de igual manera al termino de vaciar la mezcla.



Anexo N° 21. Chuseo manual de mezcla utilizando una varilla de 3/8" introduciendo al centro y a lo largo del diámetro de la mezcla con fin de eliminar la presencia de aire.



Anexo N° 22. Compactado de las briquetas mediante el uso del martillo Marshall, aplicando 75 golpes por cada lado de la cara, según los requisitos de la normatividad MTC E 504.



Anexo N° 23. Briquetas obtenidas correspondientes al diseño de la mezcla asfáltica en calientes propuestas en estudio, la cual serán sometidas a la rotura según los porcentajes de cemento asfáltico empleados.



Anexo N° 24. Grupo de especímenes de briquetas de la mezcla bituminosa en caliente obtenidas al 4%, 4.5%, 5%, 5.5%, 6% y 6.5% de cemento asfáltico, las cuales son preparadas para los siguientes ensayos.



Anexo N° 25. Exposición de las muestras a un baño María por un lapso de treinta minutos, para acondicionar los especímenes y posteriormente proceder con el ensayo de estabilidad Marshall.

#### 4. Ensayo de Marshall



Anexo N° 26. Preparación del dispositivo de la sujeción de la mordaza para efectuar el ensayo de Marshall.



Anexo N° 27. Colocación de briquetas obtenidas de la mezcla bituminosa en la mordaza.



Anexo N° 28. Registro de la lectura sobre la estabilidad y el flujo empleando el aparato de Marshall de las briquetas de mezcla asfáltica en caliente. Para poder obtener las lecturas de los diales de manera exacta fue documentado el ensayo mediante una grabación.

## 5. Adición de óxido de calcio



Anexo N° 29. Se adicionará a la mezcla obtenida para un óptimo ideal % de ligante asfáltico respecto al 0% de óxido de calcio.



Anexo N° 30. Se adicionará a la mezcla obtenida para un óptimo contenido de ligante asfáltico para el 6% de óxido de calcio adicionada al AG, respecto al peso total de la mezcla.



Anexo N° 31. Se adicionará a la mezcla obtenida para un óptimo % de ligante asfáltico para el 12% de óxido calcio añadida al AG, con referencia al peso de la mezcla.



Anexo N° 32. Se adicionará a la mezcla obtenida para un óptimo % de cemento asfáltico para el 18% de óxido de calcio añadida al AG, esto en relación con el peso de la mezcla.



Anexo N° 33. Se adicionará a la mezcla obtenida para un óptimo % de cemento ligante asfáltico para el 24% de óxido calcio incorporada al AG, en proporción al peso de la mezcla.

#### 6. Ensayo de vacíos al adicionar óxido de calcio



Anexo N° 34. Registro de peso seco en briquetas al adicionar óxido de calcio.



Anexo N° 35. Registro de peso sumergido en briquetas al adicionar óxido de calcio



Anexo N° 36. Equipo Rice empleado para la determinación de la gravedad específica teórica máxima de mezclas asfálticas

## 7. Ensayo de Marshall al adicionar óxido de calcio



Anexo N° 37. Se preparó un grupo de briquetas de la mezcla obtenida para un óptimo % de ligante asfáltico para 0% de óxido de calcio.



Anexo N° 38. Se preparó un grupo de especímenes de la mezcla obtenida para un óptimo ideal de cemento asfáltico para el 6% de óxido calcio, en función al peso de la mezcla.



Anexo N° 39. Se preparó un grupo de briquetas de la mezcla obtenida para el óptimo % de ligante asfáltico, para el 12% de óxido de calcio, con relación al peso de la mezcla.



Anexo N° 40. Se preparó un grupo de briquetas de la mezcla bituminosa obtenida para un óptimo % de cemento asfáltico el 18% de óxido de calcio, de acuerdo con el peso de la mezcla.



Anexo N° 41. Se preparó un grupo de briquetas de la mezcla obtenida para un óptimo contenido de ligante asfáltico, para el 24% de óxido de calcio añadida al AG, en función al peso de la mezcla.



Anexo N° 42. Registro de lectura de la estabilidad y el flujo de las briquetas utilizando el aparato de Marshall tras la adición de óxido de calcio en AG.

## 8. Ensayo de inmersión-compresión al adicionar óxido de calcio



Anexo N° 43. Se elaboraron dos nuevos grupos de briquetas por cada % de óxido de calcio, con dimensiones de 4 pulgadas de diámetro y de altura, al emplear 0% de óxido de calcio.



Anexo N° 44. Se elaboraron dos nuevos grupos de briquetas por cada porcentaje de óxido de calcio, de 4 pulgadas de diámetro y de altura, al emplear 6% de óxido de calcio.



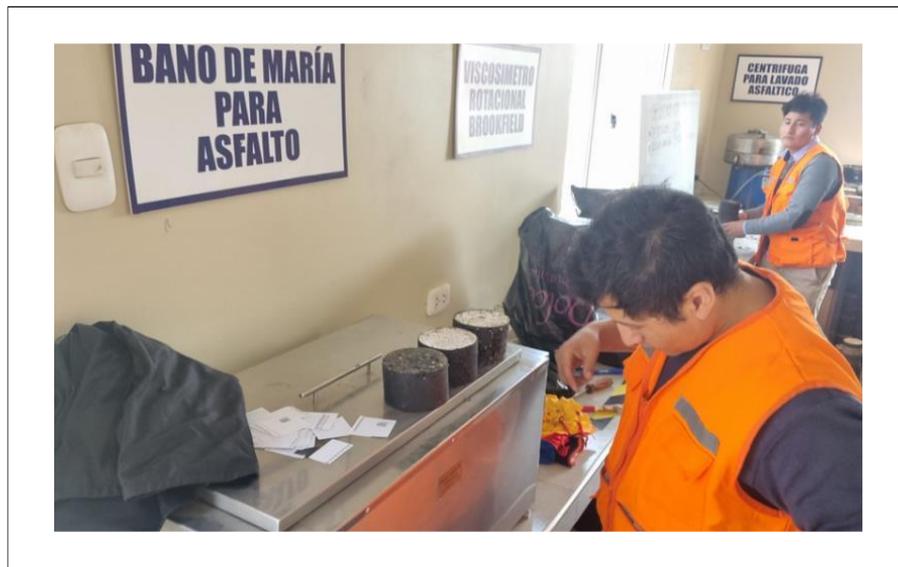
Anexo N° 45. Se elaboraron dos nuevos grupos de briquetas por cada % de óxido de calcio, con medidas de las probetas 4 pulgadas de diámetro y de altura, al emplear 12% de óxido de calcio.



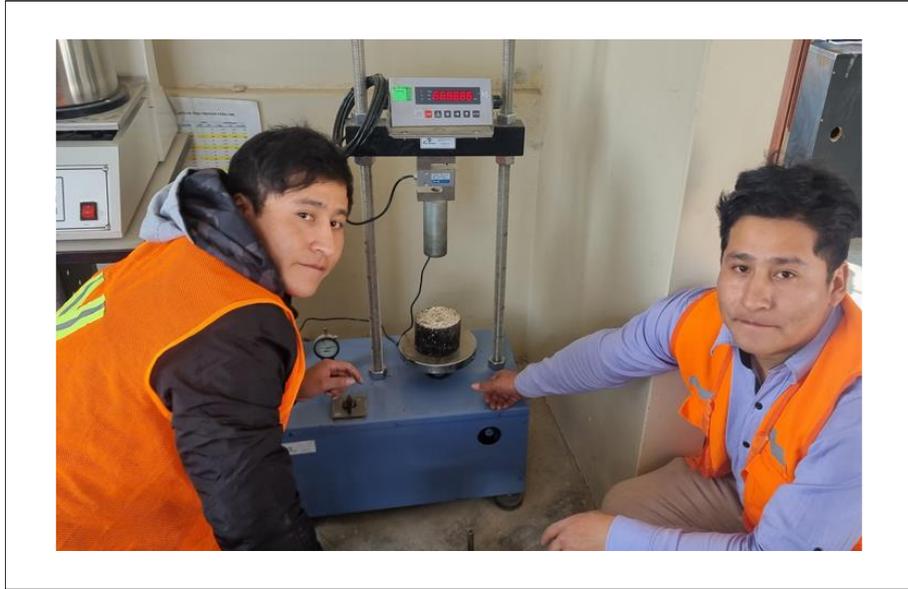
Anexo N° 46. Se elaboraron dos nuevos grupos de briquetas por cada % de óxido de calcio, de 4 pulgadas de diámetro y de altura, al emplear 18% de óxido de calcio.



Anexo N° 47. Se elaboraron dos nuevos grupos de briquetas por cada cantidad de óxido de calcio, de probetas de 4 pulgadas de diámetro y de altura, al emplear 24% de óxido de calcio.



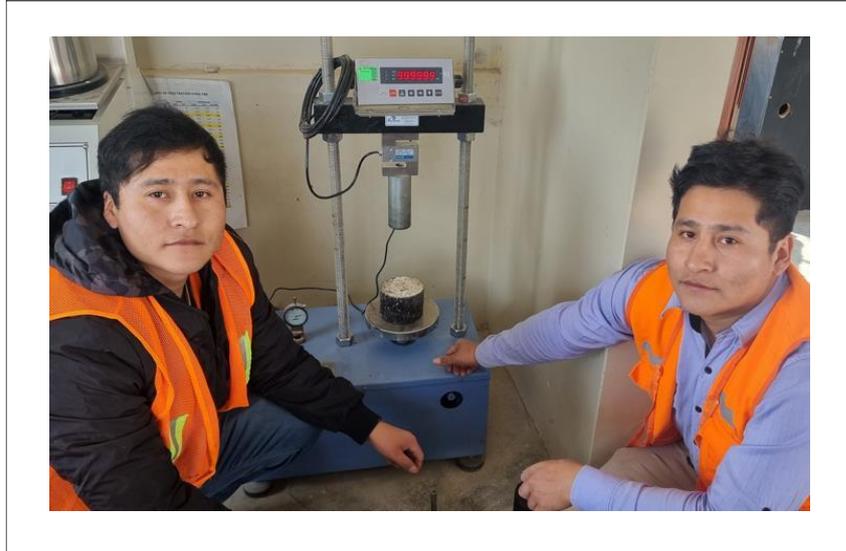
Anexo N° 48. El primer grupo se acondiciona en aire a 25°C por 4 días (96 horas).



Anexo N° 49. Tras un breve acondicionamiento en agua a 25°C por 2 horas se procede a determinar la resistencia a la compresión.



Anexo N° 50. El segundo grupo se acondiciona en agua a 49°C por 4 días (96 horas).



Anexo N° 51. Tras un breve acondicionamiento en agua a 25°C por 2 horas se procede a ensayar y calcular la resistencia sometida por compresión.

### 9. Variación de cemento asfáltico al óptimo de óxido de calcio



Anexo N° 52. Se adicionará a la mezcla obtenida para un óptimo porcentaje de óxido de calcio el cemento asfáltico en 4%, 4.5%, 5%, 5.5%, 6% y 6.5%, realizando el diseño para tráfico bajo.



Anexo N° 53: Se adicionará a la mezcla obtenida para un óptimo % de óxido de calcio el cemento asfáltico en 4%, 4.5%, 5%, 5.5%, 6% y 6.5%, realizando el diseño para tráfico medio.