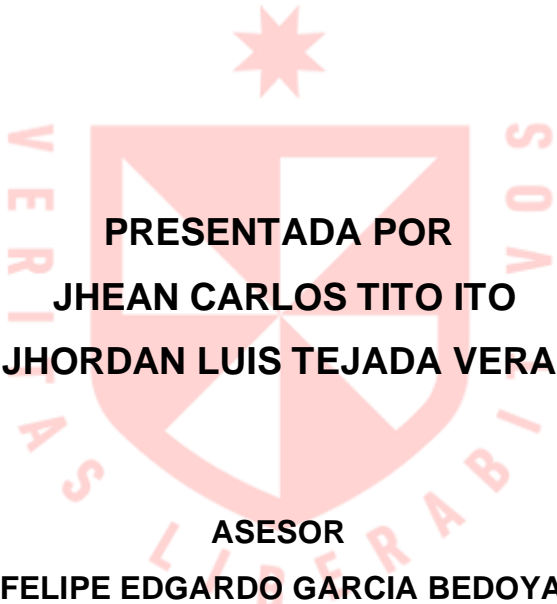




FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

**APLICACIÓN DE THIN WHITETOPPING UTILIZANDO  
CONCRETO SOSTENIBLE ADICIONADO CON  
GEOPOLÍMERO AL PAVIMENTO FLEXIBLE DE LA  
CARRETERA AREQUIPA - YURA**



**PRESENTADA POR  
JHEAN CARLOS TITO ITO  
JHORDAN LUIS TEJADA VERA**

**ASESOR  
FELIPE EDGARDO GARCIA BEDOYA**

**TESIS  
PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL**

**LIMA – PERÚ  
2024**



**CC BY-NC-ND**

**Reconocimiento – No comercial – Sin obra derivada**

El autor sólo permite que se pueda descargar esta obra y compartirla con otras personas, siempre que se reconozca su autoría, pero no se puede cambiar de ninguna manera ni se puede utilizar comercialmente.

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>



**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**

**APLICACIÓN DE THIN WHITETOPPING UTILIZANDO CONCRETO  
SOSTENIBLE ADICIONADO CON GEOPOLÍMERO AL PAVIMENTO  
FLEXIBLE DE LA CARRETERA AREQUIPA - YURA**

**TESIS PARA OPTAR  
EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL**

**PRESENTADO POR:  
JHEAN CARLOS TITO ITO  
JHORDAN LUIS TEJADA VERA**

**ASESOR:  
Mg. Ing. FELIPE EDGARDO GARCIA BEDOYA  
ORCID 0000-0002-2045-710X**

**LIMA, PERÚ  
2024**

## **DEDICATORIA**

A mis padres, Francisco y Mary, por su apoyo incondicional, su respaldo y su dedicación.

A mi hermano Paolo por su compañía y apoyo.

A Sayury por el cariño, paciencia, apoyo y comprensión.

**TITO ITO, JHEAN CARLOS**



## **DEDICATORIA**

A Dios por la orientación de mi camino y ayudarme a cumplir mis metas

A mis queridos padres, Jorge y Karina, quienes me apoyaron, aconsejaron y motivaron en todo el desarrollo de la presente investigación

A la empresa SERVIARTE, quienes me apoyaron y aconsejaron en la elaboración de análisis de datos.

**TEJADA VERA, JHORDAN LUIS**

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por darme salud, vida, sabiduría y fortaleza en todo momento.

A mis Padres por su apoyo sentimental, moral y económico en todas las etapas vividas.

A mi familia en general, por los consejos e influencia en mi crecimiento.

Al Ingeniero Felipe Garcia por sus consejos y apoyo en el desarrollo de esta investigación

**TITO ITO, JHEAN CARLOS**

## **AGRADECIMIENTO**

A Ingeniero Alejandro por la paciencia y apoyo durante el procedimiento de diseño de mezcla concreto y en los respectivos ensayos de laboratorios

A mi hermano, Jefry, por la compañía en el desarrollo de la investigación

**TEJADA VERA, JHORDAN LUIS**

## ÍNDICE DE CONTENIDO

	Página
<b>RESUMEN</b> .....	<b>xviii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xx</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>xxiii</b>
<b>CAPÍTULO I MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>1</b>
1.1. Antecedentes de la investigación.....	1
1.1.1. Antecedentes internacionales.....	1
1.1.2. Antecedentes nacionales .....	6
1.2. Bases teóricas.....	11
1.2.1. Pavimento Flexible.....	11
1.2.2. Ciclo de vida del pavimento .....	13
1.2.3. Condición y serviciabilidad del pavimento.....	14
1.2.4. Vida remanente y rehabilitación .....	17
1.2.5. Fallas del pavimento flexible .....	18
1.2.6. Causas de degradación del pavimento .....	20
1.2.7. Evaluación de pavimentos .....	21
1.2.8. Método Pavement Condition Index (PCI).....	43
1.2.9. Whitetopping.....	54
1.2.10. Concreto geopolímero .....	78
1.3. Definición de Términos Básicos .....	83
<b>CAPÍTULO II HIPÓTESIS Y VARIABLES</b> .....	<b>86</b>

2.1. Hipótesis.....	86
2.1.1. Hipótesis general.....	86
2.1.2. Hipótesis específicas.....	86
2.2. Importancia de la investigación.....	87
2.3. Variables y definición operacional.....	95
2.3.1. Definición conceptual.....	95
2.3.2. Definición operacional.....	96
2.4. Operacionalización de variables.....	96
<b>CAPÍTULO III METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>98</b>
3.1. Diseño metodológico.....	98
3.1.1. Enfoque de la investigación.....	98
3.1.2 Tipo de la investigación.....	99
3.1.3 Nivel de la investigación.....	99
3.1.4 Diseño de la investigación.....	100
3.2. Población y muestra.....	101
3.2.1. Población.....	101
3.2.2. Muestra.....	102
3.3. Técnicas de recolección de datos.....	115
3.4. Técnicas estadísticas para el procesamiento de la información.....	116
<b>CAPÍTULO IV RESULTADOS.....</b>	<b>118</b>
4.1. Procedimiento.....	118

4.2	Diseño Whitetopping .....	125
4.2.1	Diagrama de Flujo.....	125
4.2.2	Método Pavement Condition Index (PCI) .....	126
4.2.3	Diseño de capa de concreto .....	138
4.2.4.	Diseño de juntas .....	142
4.3.	Diseño de mezcla de concreto .....	144
4.3.1	Diagrama de Flujo.....	144
4.3.2.	Características de los agregados.....	146
4.3.3.	Diseño de mezcla .....	152
4.3.4.	Resultado de dosificación por tipo de concreto .....	157
4.3.5.	Proceso de geopolimerización .....	159
4.4	Propiedades físicas .....	161
4.4.1.	Preparación de mezcla. ....	161
4.4.2.	Llenado del cono de Abrahams.....	163
4.5	Propiedades mecánicas .....	166
4.5.1.	Preparación de mezclas con diferentes dosificaciones. ....	167
4.5.2.	Llenado y preparación de probetas cilíndricas y prismáticas.....	169
4.5.3.	Desmoldeo y curado. ....	170
4.5.4.	Rotura de probetas. ....	171
4.5.5.	Resistencia a la compresión .....	174
4.5.6.	Resistencia a la flexión .....	180

4.5.7. Resistencia a la tracción simple .....	182
4.6 Parámetros de sostenibilidad económica .....	184
4.6.1. Capa Bituminosa .....	185
4.6.2. Capa Thin Whitetopping.....	186
4.7 Parámetros de sostenibilidad ambiental .....	188
4.7.1. Emisión de CO2.....	189
4.7.2. Índice de cemento.....	190
<b>CAPÍTULO V DISCUSIÓN.....</b>	<b>193</b>
5.1 Contrastación de Hipótesis.....	193
5.1.1 Hipótesis General .....	193
5.1.2 Hipótesis Especificas .....	194
5.2. Discusión de Antecedentes .....	200
5.2.1. Antecedente Internacional .....	200
5.2.2 Antecedente Nacional .....	202
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>205</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>206</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>207</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>217</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

	Página
<b>Tabla 1:</b> <i>Frecuencia de evaluación del pavimento</i> .....	17
<b>Tabla 2:</b> <i>Deterioros o fallas de los pavimentos asfálticos</i> .....	20
<b>Tabla 3:</b> <i>Causas de fallas de un pavimento</i> .....	21
<b>Tabla 4:</b> <i>Catálogo de fallas para el método del PCI</i> .....	52
<b>Tabla 5:</b> <i>Fallas considerables en la determinación del PCI</i> .....	53
<b>Tabla 6:</b> <i>Interpretación de los valores de PCI y la condición del pavimento</i> .....	53
<b>Tabla 7:</b> <i>Interpretación de la escala PCI</i> .....	54
<b>Tabla 8:</b> <i>Cuadro resumen de la clasificación de Whitetopping</i> .....	56
<b>Tabla 9:</b> <i>Índice de serviciabilidad según calificación</i> .....	68
<b>Tabla 10:</b> <i>Índice de serviciabilidad inicial y final recomendado</i> .....	68
<b>Tabla 11:</b> <i>Niveles de confiabilidad según la clasificación funcional del camino</i> ...	71
<b>Tabla 12:</b> <i>Desviación estándar normal relacionado a la confiabilidad</i> .....	72
<b>Tabla 13:</b> <i>Valores recomendados para la desviación estándar (So)</i> .....	73
<b>Tabla 14:</b> <i>Calidad de drenaje para pavimento</i> .....	77
<b>Tabla 15:</b> <i>Porcentaje del tiempo de exposición del pavimento</i> .....	77
<b>Tabla 16:</b> <i>Coeficiente de transmisión de carga (J)</i> .....	78
<b>Tabla 17:</b> <i>Operacionalización de variables</i> .....	97
<b>Tabla 18:</b> <i>Ensayo de trabajabilidad, unidades físicas y en volumen de concreto.</i> .....	105
<b>Tabla 19:</b> <i>Ensayo de resistencia a la compresión, unidades físicas y en volumen de concreto.</i> .....	111
<b>Tabla 20:</b> <i>Hoja resumen para el análisis del índice de condición de pavimento</i>	137
<b>Tabla 21:</b> <i>Conteo de vehículos por días</i> .....	138



<b>Tabla 22:</b> <i>Periodo de Diseño en relación al tipo de carretera</i> .....	139
	Página
<b>Tabla 23:</b> <i>Determinación del factor por dirección</i> .....	140
<b>Tabla 24:</b> <i>Determinación del facto carril</i> .....	140
<b>Tabla 25:</b> <i>Cálculo de ESAL para la capa de concreto Whitetopping</i> .....	143
<b>Tabla 26:</b> <i>Resumen de datos de diseño requeridos</i> .....	141
<b>Tabla 27:</b> <i>Requisitos mínimos para pasadores en juntas de pavimentos</i> .....	143
<b>Tabla 28:</b> <i>Granulometría del agregado grueso</i> .....	147
<b>Tabla 29:</b> <i>Peso unitario suelto del agregado grueso</i> .....	148
<b>Tabla 30:</b> <i>Peso unitario compacto del agregado grueso</i> .....	148
<b>Tabla 31:</b> <i>Peso específico y absorción del agregado grueso</i> .....	148
<b>Tabla 32:</b> <i>Características generales del agregado grueso</i> .....	149
<b>Tabla 33:</b> <i>Granulometría del agregado fino</i> .....	149
<b>Tabla 34:</b> <i>Curva granulométrica del agregado fino</i> .....	150
<b>Tabla 35:</b> <i>Características generales del agregado fino</i> .....	150
<b>Tabla 36:</b> <i>Peso unitario suelto del agregado fino</i> .....	151
<b>Tabla 37:</b> <i>Peso unitario compacto del agregado fino</i> .....	151
<b>Tabla 38:</b> <i>Peso específico y absorción del agregado fino</i> .....	151
<b>Tabla 39:</b> <i>Cuadro resumen de las características de los agregados</i> .....	152
<b>Tabla 40:</b> <i>Parámetros inicial para el diseño de mezcla</i> .....	152
<b>Tabla 41:</b> <i>Cantidad aproximada de agua para diferentes slump, tamaño</i> <i>máximo de agregado y cantidad de aire</i> .....	153
<b>Tabla 42:</b> <i>Dosificación de materiales por tipo de concreto</i> .....	158
<b>Tabla 43:</b> <i>Composición química de la Ceniza volante</i> .....	159
<b>Tabla 44:</b> <i>Medida de asentamiento del concreto (Slump)</i> .....	164

<b>Tabla 45:</b> <i>Resultados de la resistencia a la compresión a los 7 días</i> .....	174
	Página
<b>Tabla 46:</b> <i>Resultados de la resistencia a la compresión a los 14 días</i> .....	176
<b>Tabla 47:</b> <i>Resultados de la resistencia a la compresión a los 28 días</i> .....	177
<b>Tabla 48:</b> <i>Resistencia a la flexión de los 28 días</i> .....	181
<b>Tabla 49:</b> <i>Resistencia a la tracción simple de 7, 14 y 28 días</i> .....	182
<b>Tabla 50:</b> <i>Promedio de resistencia a la tracción simple en 7, 14 y 28 días.</i> .....	183
<b>Tabla 51:</b> <i>Recubrimiento bituminoso cada 11 años</i> .....	185
<b>Tabla 52:</b> <i>Reasfaltado periódico cada 5 años.</i> .....	186
<b>Tabla 53:</b> <i>Recubrimiento Thin Whitetopping de concreto con 25% de geopolímero</i> .....	186
<b>Tabla 54:</b> <i>Costo de reparación de juntas, 26/06/2024</i> .....	187
<b>Tabla 55:</b> <i>Comparación del costo del ciclo de vida (valor actual neto) de la capa de rodadura bituminosa y de la capa Thin Whitetopping</i> .....	188
<b>Tabla 56:</b> <i>Comparación de bolsas y emisión de CO2</i> .....	192
<b>Tabla 57:</b> <i>Validación de hipótesis general</i> .....	194
<b>Tabla 58:</b> <i>Validación de hipótesis específica N° 01</i> .....	195
<b>Tabla 59:</b> <i>Validación de hipótesis específica N° 02</i> .....	196
<b>Tabla 60:</b> <i>Validación de hipótesis específica N° 03</i> .....	197
<b>Tabla 61:</b> <i>Validación de hipótesis específica N° 04</i> .....	198
<b>Tabla 62:</b> <i>Validación de hipótesis específica N° 05</i> .....	199
<b>Tabla 63:</b> <i>Validación de hipótesis específica N° 06</i> .....	200
<b>Tabla 64:</b> <i>Validación de antecedente internacional</i> .....	202
<b>Tabla 65:</b> <i>Validación de antecedente nacional</i> .....	204

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
<b>Figura 1.</b> <i>Perfil convencional de una estructura de pavimento bituminoso.....</i>	13
<b>Figura 2.</b> <i>Situaciones de degradación del pavimento .....</i>	15
<b>Figura 3.</b> <i>Frecuencia de evaluación de pavimentos.....</i>	16
<b>Figura 4.</b> <i>Concepto de vida remanente.....</i>	18
<b>Figura 5.</b> <i>Fisuras Transversales .....</i>	23
<b>Figura 6.</b> <i>Piel de cocodrilo.....</i>	27
<b>Figura 7.</b> <i>Agrietamiento en bloque.....</i>	28
<b>Figura 8.</b> <i>Fisura longitudinal y transversal junta de construcción.....</i>	29
<b>Figura 9.</b> <i>Ahuellamiento.....</i>	31
<b>Figura 10.</b> <i>Hundimiento.....</i>	33
<b>Figura 11.</b> <i>Ondulación.....</i>	35
<b>Figura 12.</b> <i>Descaramiento.....</i>	36
<b>Figura 13.</b> <i>Bache.....</i>	38
<b>Figura 14.</b> <i>Desgaste superficial.....</i>	39
<b>Figura 15.</b> <i>Pérdida de agregado pétreo.....</i>	40
<b>Figura 16.</b> <i>Surcos.....</i>	41
<b>Figura 17.</b> <i>Diagrama de flujo del método del PCI .....</i>	45
<b>Figura 18.</b> <i>Inspección del pavimento.....</i>	46
<b>Figura 19.</b> <i>Determinación de los valores de deducción .....</i>	46
<b>Figura 20.</b> <i>Valor total de reducción.....</i>	47
<b>Figura 21.</b> <i>Valor total deducido.....</i>	47
<b>Figura 22.</b> <i>Ecuación para calcular el tamaño mínimo de muestra a evaluar .....</i>	49
<b>Figura 23.</b> <i>Peso y medias máximas permitidas parte 01 .....</i>	61

	Página
<b>Figura 24.</b> <i>Peso y medidas máximas permitidas parte 02</i> .....	62
<b>Figura 25.</b> <i>Peso y medidas máximas permitidas parte 03</i> .....	63
<b>Figura 26.</b> <i>Peso y medias máximas permitidas parte 04</i> .....	64
<b>Figura 27.</b> <i>Peso y medidas máximas permitidas parte 05</i> .....	65
<b>Figura 28.</b> <i>Peso y medidas máximas permitidas parte 07</i> .....	66
<b>Figura 29.</b> <i>Proceso de obtención de cemento geopolímero</i> .....	74
<b>Figura 30.</b> <i>Preparación de geopolímeros</i> .....	83
<b>Figura 31.</b> <i>Características para un enfoque cuantitativo</i> .....	98
<b>Figura 32.</b> <i>Cono de Abrahams para ensayo de trabajabilidad</i> .....	106
<b>Figura 33.</b> <i>Moldes para probetas de concreto</i> .....	107
<b>Figura 34.</b> <i>Diagrama de flujo del procedimiento para cumplir el objetivo general</i> .....	118
<b>Figura 35.</b> <i>Inicio del tramo de evaluación vial</i> .....	119
<b>Figura 36.</b> <i>Tipo de Falla: Agrietamiento en bloque tramo de estudio</i> .....	121
<b>Figura 37.</b> <i>Tipo de Falla: Grieta de borde Tramo de la carretera Arequipa-entrada a Yura</i> .....	121
<b>Figura 38.</b> <i>Día número 1 de conteo de vehículos</i> .....	122
<b>Figura 39.</b> <i>Diagrama de Flujo del diseño Whitetopping</i> .....	125
<b>Figura 40.</b> <i>Tramo de evaluación Arequipa entrada a Yura</i> .....	126
<b>Figura 41.</b> <i>Cálculo de muestreo y unidades de muestra</i> .....	127
<b>Figura 42.</b> <i>Cálculo para selección de unidades de muestreo</i> .....	128
<b>Figura 43.</b> <i>Seccionamiento cada 40.00 metros</i> .....	128
<b>Figura 44.</b> <i>Información superior de la ficha de evaluación</i> .....	129
<b>Figura 45.</b> <i>Falla tipo agrietamiento en bloque</i> .....	130

	Página
<b>Figura 46.</b> <i>Medición para la falla tipo agrietamiento en bloque</i> .....	130
<b>Figura 47.</b> <i>Medición para el nivel de severidad de la falla</i> .....	131
<b>Figura 48.</b> <i>Falla tipo grieta de borde</i> .....	131
<b>Figura 49.</b> <i>Medición de la falla tipo grieta de borde</i> .....	132
<b>Figura 50.</b> <i>Ejemplo de procedimiento para el valor deducido de la falla Arietamiento en bloque.</i> .....	133
<b>Figura 51.</b> <i>Ficha de evaluación completa con el total de valores deducidos</i> ....	133
<b>Figura 52.</b> <i>Cálculo del número máximo de valores deducidos y del valor “m”.</i>	134
<b>Figura 53.</b> <i>Cálculo corregido de valor deducido</i> .....	135
<b>Figura 54.</b> <i>Nivel de Condición del Pavimento (PCI)</i> .....	135
<b>Figura 55.</b> <i>Correlación de categoría de acción con un rango de PCI</i> .....	135
<b>Figura 56.</b> <i>Diagrama de Flujo de Diseño de mezcla de concreto</i> .....	144
<b>Figura 57.</b> <i>Ubicación de la cantera denominada LA PODEROSA</i> .....	146
<b>Figura 58.</b> <i>Curva granulométrica del agregado grueso</i> .....	147
<b>Figura 59</b> <i>Peso de componentes en porcentaje</i> .....	156
<b>Figura 60.</b> <i>Preparación de una solución alcalina a partir de hidróxido de sodio y gránulos de silicato.</i> .....	160
<b>Figura 61.</b> <i>Diagrama de flujo para el análisis de características físicas del concreto.</i> .....	161
<b>Figura 62.</b> <i>Materiales e instrumentos utilizados</i> .....	162
<b>Figura 63.</b> <i>Proceso de mezcla fecha 02 y 16 de mayo del 2023</i> .....	163
<b>Figura 64.</b> <i>Llenado del cono de Abrahams</i> .....	163
<b>Figura 65.</b> <i>Retiro del cono de Abrahams</i> .....	164

<b>Figura 66.</b> <i>Medida de la diferencia de altura entre el molde y la mezcla (con porcentajes de 20 y 25% de geopolímero)</i> .....	165
<b>Figura 67.</b> <i>Representación de porcentaje de geopolímero con su respectivo slump.</i> .....	166
<b>Figura 68.</b> <i>Diagrama de flujo para el análisis de características mecánicas del concreto.</i> .....	167
<b>Figura 69.</b> <i>Mezcla de cemento con geopolímero</i> .....	168
<b>Figura 70.</b> <i>Materiales utilizados para una determinada dosificación</i> .....	168
<b>Figura 71.</b> <i>Proceso de limpieza y recubrimiento de petróleo de los moldes</i> .....	169
<b>Figura 72.</b> <i>Proceso de moldeado de probetas cilíndricas</i> .....	170
<b>Figura 73.</b> <i>Probetas cilíndricas desmoldadas</i> .....	170
<b>Figura 74.</b> <i>Probetas prismáticas desmoldadas</i> .....	170
<b>Figura 75.</b> <i>Extracción de las probetas, luego del proceso de curado.</i> .....	171
<b>Figura 76.</b> <i>Marca de la máquina de ensayo para compresión</i> .....	172
<b>Figura 77.</b> <i>Probeta del concreto patrón próxima a ser colocada en la máquina.</i> .....	173
<b>Figura 78.</b> <i>Probetas próximas a ser ensayadas</i> .....	173
<b>Figura 79.</b> <i>Valor de compresión de una probeta.</i> .....	174
<b>Figura 80.</b> <i>Resistencia a la compresión 7 días</i> .....	175
<b>Figura 81.</b> <i>Resistencia a la compresión 14 días</i> .....	176
<b>Figura 82.</b> <i>Resistencia a la compresión a los 28 días del concreto con geopolímero</i> .....	178
<b>Figura 83.</b> <i>Cuadro resumen de ensayo de resistencia a la compresión</i> .....	179
<b>Figura 84.</b> <i>Gráfico de resistencia a la flexión de 28 días</i> .....	181

**Figura 85.** *Resistencia a la tracción simple del concreto en 7, 14 y 28 días ....* 183

**Figura 86.** *Consumo de bolsas por metro cúbico .....* 191

## RESUMEN

Las vías urbanas con pavimento flexible a menudo suelen presentar fallas superficiales con el tiempo, debido a la circulación de vehículos pesados, deficiencias constructivas y materiales de baja calidad. Además, el mantenimiento a largo plazo de estos pavimentos es costoso, especialmente si se considera un periodo superior a aproximado de 15 años.

La presente investigación propone determinar la influencia de la aplicación de concreto con geopolímero como alternativa sostenible en Thin Whitetopping aplicado al pavimento flexible tramo de la carretera Arequipa – Yura.

La metodología empleada es explicativa-experimental con enfoque cuantitativo. La muestra consistió en 48 probetas cilíndricas y 8 prismáticas, en las que se diseñó una mezcla de concreto base y variantes con reemplazo parcial de cemento por geopolímero en proporciones del 20%, 25% y 30%. Las cuales fueron sometidas a ensayos en estado fresco para evaluar su trabajabilidad y, en estado endurecido, a pruebas de resistencia a la compresión, flexión y tracción

Los resultados a los 28 días mostraron que la resistencia a la compresión del concreto patrón fue de 310.06 kg/cm<sup>2</sup>, mientras que las mezclas con 20%, 25% y 30% de geopolímero alcanzaron resistencias de 312.10 kg/cm<sup>2</sup>, 314.51 kg/cm<sup>2</sup> y 298.30 kg/cm<sup>2</sup>, respectivamente.

Se concluye que la mezcla con 25% de geopolímero es la óptima porque cumple con la resistencia a compresión de los 28 días requerida por el diseño, mientras que la dosificación con 30% de geopolímero presenta una disminución del 5%. Además, el espesor obtenido para la capa en Thin Whitetopping es de 12.5 cm (5 pulgadas).



**Palabras claves:** concreto, geopolímero, pavimento flexible, rehabilitación, Whitetopping, costos, sostenibilidad, contaminación.

## ABSTRACT

Urban roads with flexible pavements often show surface failures over time, due to heavy vehicle traffic, construction deficiencies and poor quality materials. In addition, the long-term maintenance of these pavements is costly, especially if a period of more than approximately 15 years is considered.

The present research proposes to determine the influence of the application of geopolymer concrete as a sustainable alternative in thin whitetopping applied to the flexible pavement of the Arequipa - Yura highway.


The methodology used is explanatory-experimental with a quantitative approach. The sample consisted of 48 cylindrical and 8 prismatic specimens, in which a concrete base mix and variants were designed with partial replacement of cement by geopolymer in proportions of 20%, 25% and 30%. These were tested in the fresh state to evaluate their workability and, in the hardened state, for compressive, flexural and tensile strength.

The results at 28 days showed that the compressive strength of the standard concrete was 310.06 kg/cm<sup>2</sup>, while the mixes with 20%, 25% and 30% geopolymer reached strengths of 312.10 kg/cm<sup>2</sup>, 314.51 kg/cm<sup>2</sup> and 298.30 kg/cm<sup>2</sup>, respectively.

It is concluded that the mixture with 25% geopolymer is the optimum because it meets the 28-day compressive strength required by the design, while the dosage with 30% geopolymer presents a 5% decrease. In addition, the thickness obtained for the thin whitetopping layer is 12.5 cm (5 inches).

**Keywords:** concrete, geopolymer, flexible pavement, rehabilitation, whitetopping, costs, sustainability, contamination.

# JHEAN CARLOS TITO ITO / JHORDAN LUIS TEJAD... APLICACIÓN DE THIN WHITETOPPING UTILIZANDO CONCRETO SOSTENIBLE ADICIONADO CON GEOPOLÍMERO ...

 CIVIL

 TESIS/AS

 Universidad de San Martín de Porres

## Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid::29427:410473036

Fecha de entrega

29 nov 2024, 7:57 a.m. GMT-5

Fecha de descarga

29 nov 2024, 8:00 a.m. GMT-5

Nombre de archivo

28- TITO ITO - TEJADA VERA - TESIS - Thin whitetopping, concreto geopolimero.pdf

Tamaño de archivo

24.3 MB

315 Páginas

42,348 Palabras

237,940 Caracteres



**Biblioteca FIA**

Patricia Aurora Rodríguez Toledo  
Bibliotecóloga




## 9% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

### Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto citado
- ▶ Texto mencionado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

### Fuentes principales

- 7%  Fuentes de Internet
- 1%  Publicaciones
- 6%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

### Marcas de integridad

#### N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

## INTRODUCCIÓN

### DESCRIPCIÓN DE LA SITUACIÓN PROBLEMÁTICA

El mantenimiento de los pavimentos debe realizarse de manera tal que garantice durante la continuidad de su uso, un transporte eficaz, procurando reducir costos y a la vez promoviendo la sostenibilidad medioambiental, teniendo en cuenta los efectos de los fenómenos meteorológicos extremos y los materiales utilizados para su rehabilitación y/o mantenimiento. El ciclo de vida de un pavimento incluye desde la inversión inicial, los costos de mantenimiento, hasta la etapa final de su vida útil, es por ello que se considera importante un mantenimiento periódico y rutinario para alargar la serviciabilidad del mismo. Internacionalmente a menudo, el pavimento flexible se repara utilizando una técnica de rehabilitación denominada Whitetopping (WT), que consta de superponer una fina capa de concreto para obtener los beneficios de unos costos de mantenimiento reducidos con una inversión inicial menor (Bellum, 2022).

El tráfico diario por la red de vías y carreteras, dependiendo su uso, provoca un deterioro significativo de la red viaria. Además, la red vial sigue expandiéndose, así pues, el costo de construcción y mantenimiento de carreteras en Perú es un motivo de preocupación crítica. Por otro lado, la aplicación de la técnica de reparación Whitetopping incrementa la demanda de cemento, cuya producción requiere un alto consumo de energía y genera grandes cantidades de gases de efecto invernadero. Estas emisiones representan entre el 5% y el 7% del total a nivel mundial (Savadkoohi y Reisi, 2020). En consecuencia, se han evaluado diversos materiales novedosos para reducir la dependencia de la fabricación cada vez mayor de cemento, lo más importante es que muchos de estos materiales son

residuos que deben eliminarse, como las cenizas volantes que las centrales termoeléctricas producen anualmente.

Cuando el cemento se sustituye total o parcialmente por materiales puzolánicos, como las cenizas volantes, el resultado es el concreto geopolímero (Huang y Ling, 2021). Los elementos básicos del concreto geopolímero son los activadores alcalinos y las materias primas, de hecho, se pueden utilizar activadores alcalinos, como hidróxido de potasio o silicato de sodio, junto con cenizas volantes (clase F o C) para crear diferentes tipos de concreto geopolímero que, cuando se aplican con activadores alcalinos, proporcionan una resolución de ligado lateral equivalente a la del cemento (Ratha et al., 2020).

### **PROBLEMA PRINCIPAL**

¿Cómo el concreto con geopolímero en Thin Whitetopping influye en la rehabilitación del pavimento flexible tramo de la carretera Arequipa - Yura?,

### **OBJETIVO GENERAL**

Determinar la influencia de la aplicación de concreto con geopolímero como alternativa sostenible en Thin Whitetopping aplicado al pavimento flexible tramo de la carretera Arequipa – Yura.

### **OBJETIVOS ESPECIFICOS**

1. Desarrollar el diseño Thin Whitetopping para la aplicación del concreto con geopolímero en la rehabilitación del pavimento flexible tramo de la carretera Arequipa – Yura.

2. Determinar el diseño de mezcla del concreto con geopolímero con porcentajes de reemplazo de 20, 25 y 30% respecto al cemento, en Thin Whitetopping

3. Analizar las propiedades físicas del concreto con geopolímero en Thin Whitetopping

4. Analizar las propiedades mecánicas del concreto con geopolímero en Thin Whitetopping

5. Evaluar los parámetros de sostenibilidad económica de la dosificación optima del concreto con geopolímero en Thin

6. Evaluar los parámetros de sostenibilidad ambiental de la dosificación optima del concreto con geopolímero en Thin Whitetopping.

### **HIPÓTESIS PRINCIPAL**

La aplicación del concreto con geopolímero influye positivamente en Thin Whitetopping para la rehabilitación del pavimento flexible en el km 56-57 del tramo Arequipa Yura.

### **IMPORTANCIA DEL ESTUDIO**

El estudio es relevante porque se espera que los resultados obtenidos contribuyan al desarrollo y optimización de mezclas de concreto con geopolímero, adecuadas para cubrir pavimentos asfálticos deteriorados. Se busca que estas mezclas sean rentables en términos de ciclo de vida, más duraderas y, además, que los materiales utilizados sean amigables con el medio ambiente.

### **LIMITACIONES**

La principal limitación del estudio estuvo en no contar con un análisis más técnico para el proceso de geopolimerización, por lo que el proceso estuvo guiado de investigaciones similares.

### **ENFOQUE Y TIPO DE DISEÑO METODOLÓGICO**

La tesis presentada tiene un enfoque cuantitativo y es de tipo experimental.

## **POBLACIÓN Y MUESTRA**

Para el diseño muestral se estableció que la población es de carácter ilimitado, considerando a ello el diseño de mezcla patrón y el diseño con los porcentajes de reemplazo de cemento. También se debe indicar que la muestra es no probabilística ya que se toman las muestras de acuerdo con los requerimientos de la norma E 0.06, la muestra constará de 8 para moldes para la evaluación de trabajabilidad, 24 probetas para la evaluación de la compresión, 24 para evaluar la tracción y 8 vigas prismáticas para la resistencia a la tracción.

## **ESTRUCTURA DE LA TESIS**

La investigación ha sido organizada para facilitar su comprensión y análisis. En el Capítulo I, se desarrolla el Marco Teórico, que reúne antecedentes relevantes a nivel nacional e internacional, además de incluir las bases teóricas y la definición de los términos esenciales. Este marco conceptual constituye la base fundamental para guiar y contextualizar el enfoque del estudio.

En el Capítulo II, se presentan las hipótesis, tanto general como específicas, junto con la definición de las variables del proyecto. Este apartado permite precisar lo que se espera demostrar y establece la operacionalización de las variables, lo cual resulta clave para estructurar de forma coherente la investigación.

El Capítulo III describe la metodología empleada, detallando los enfoques, técnicas e instrumentos utilizados para recolectar información. Además, se explica el procesamiento de los datos mediante métodos adecuados que garantizan el cumplimiento del objetivo principal del estudio.

En el Capítulo IV, considerado el eje central de la investigación, se presentan los resultados obtenidos, destacando los hallazgos más relevantes. Aquí se prioriza



dar respuesta y soporte a los objetivos específicos planteados, con un enfoque claro y sustentado.

Por último, el Capítulo V se dedica a la discusión de los resultados, donde se interpretan y analizan en relación con las hipótesis formuladas y los antecedentes revisados. Este capítulo permite comprender la relevancia de los hallazgos en el contexto del problema estudiado. Finalmente, se incluyen las conclusiones, recomendaciones prácticas, y se complementa el trabajo con referencias bibliográficas, apéndices y anexos que consolidan el rigor académico del estudio.

# CAPÍTULO I

## MARCO TEÓRICO

### 1.1. Antecedentes de la investigación

#### 1.1.1. Antecedentes internacionales

**Venugopalan, (2023)** en su investigación titulada: Revolución de cobertura blanca para lograr un tratamiento rentable y duradero de las carreteras bituminosas existentes, "*White Topping Revolution for Cost-Effective and Long-Lasting Treatment over the Existing Bituminous Roads*". Se tuvo como objetivo explicar ampliamente las ventajas y desventajas de la tecnología White Topping y la comparación del costo del ciclo de vida entre la capa bituminosa, la capa fina blanca y la capa ultrafina de capa blanca para establecer los ahorros de costos relativos de las superposiciones finas de capa blanca. La metodología utilizada consistió en realizar una comparación detallada del costo a lo largo de la vida útil de un segmento de autopista con configuración correspondiente a cuatro carriles. Se han propuesto superposiciones alternativas, una superposición bituminosa, la segunda con capa fina blanca y la tercera con capa ultrafina blanca, en donde el costo por kilómetro de longitud de la autopista se calculó para cada tipo de superposición. Se llegó a la conclusión que el valor actual neto de la capa fina blanca con 150 mm de espesor es solo aproximadamente el 75% del de la capa bituminosa, lo que supone un ahorro de aproximadamente el 25% en el costo total del ciclo de vida. Cuando se trata de la comparación entre la capa bituminosa y la capa superior blanca ultrafina de 100 mm de espesor, el ahorro en el costo del ciclo de vida será del orden del 40%, como se explica en el análisis anterior.

**Singh et al., (2023)** en su investigación titulada: “Concreto geopolímero a base de cenizas volantes, GGBS y humo de sílice con materiales reciclados: Propiedades e impactos ambientales, *“Fly ash, GGBS, and silica fume based geopolymer concrete with recycled aggregates: Properties and environmental impacts”*. Se tomó como objetivo investigar la viabilidad técnica y ambiental de utilizar cenizas volantes (FA), escoria de alto horno granulada molida (GGBS) y humo de sílice (SF) en concreto geopolímero (GPC) con agregados 100% reciclados (RA). La metodología incluyó la optimización de las proporciones de FA, GGBS y SF, evaluando propiedades mecánicas, microestructurales y mineralógicas mediante pruebas de resistencia y análisis de microscopía electrónica de barrido (SEM) y difracción de rayos X (XRD). La evaluación ambiental, mediante análisis de ciclo de vida (LCA), mostró que la mezcla GPC-MG15 (FA:GGBS en proporción 35:50:15) destacó con propiedades mecánicas superiores, logrando una reducción del 50-60% en impactos ambientales en comparación con el concreto tradicional (OPC) con agregados naturales (NA), lo que la posiciona como una opción más sostenible sin comprometer funcionalidad.

La metodología aplicada se enfocó en la mejora y ajuste de las proporciones de ceniza volante (FA), escoria de alto horno granulada (GGBS) y microsílíce (SF), con el objetivo de analizar su comportamiento mediante ensayos técnicos que evaluaron características como la resistencia mecánica, así como propiedades microestructurales y mineralógicas. Para ello, se llevaron a cabo pruebas de resistencia y se utilizaron herramientas avanzadas de análisis, como la microscopía electrónica de barrido (SEM) y la difracción de rayos X (XRD), que permitieron obtener una comprensión detallada de las interacciones entre los materiales.

En el aspecto ambiental, se realizó un análisis de ciclo de vida (LCA), el cual permitió identificar que la mezcla GPC-MG15, compuesta por un 35% de FA, 50% de GGBS y 15% de SF, mostró un desempeño superior en términos de resistencia mecánica. Esta mezcla también logró una reducción significativa, del 50% al 60%, en los impactos ambientales en comparación con el concreto tradicional (OPC) fabricado con agregados naturales (NA). Estas mejoras posicionan a la mezcla como una alternativa más sostenible y ambientalmente responsable, sin comprometer la funcionalidad ni el rendimiento esperado para aplicaciones en construcción.

**Palacios et al., (2023)** en su investigación titulada: “Restauración de estructura de pavimento para el Bulevar Fuerzas Armadas “La Lima Cortés”, mediante el uso de whitetopping”, tuvieron como objetivo diseñar la estructura geométrica y funcional de una restauración con tecnología Whitetopping para el asfaltado del bulevar. El diseño consideró la calidad del suelo, distancias, estudio topográfico y el análisis de deterioro del pavimento existente, garantizando el cumplimiento de los estándares. El diseño final incluyó una capa de concreto hidráulico de 4" (10 cm) de espesor y juntas a 47 pulgadas (120 cm) de separación.

**Sathvik, S., & et al. (2023)** en su investigación titulada: Evaluar el potencial del hormigón geopolímero como una alternativa sostenible para el pavimento delgado de cubierta blanca, “Low-carbon geopolymer concrete from sustainable solid wastes”. Se considera como objetivo evaluar el potencial del concreto con geopolímero para pavimentos delgados tipo "Thin Whitetopping" utilizando residuos sólidos sostenibles. Dentro de la metodología del estudio, se utilizó materiales alternativos, incluyendo cenizas volantes, agregados de arena

fabricados y diferentes molaridades de activadores alcalinos, para incorporar subproductos de desecho en una capa de pavimento de hormigón de geopolímero. Finalmente se concluye que el concreto con geopolímero puede reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> hasta en un 80% en comparación con el concreto tradicional. Además, se observa una mejora en la resistencia a la compresión de hasta 20 MPa en los primeros 7 días de curado. El uso de residuos sólidos industriales como materia prima no solo reduce los costos de producción, sino que también mejora la sostenibilidad del material al reutilizar desechos que de otra manera serían contaminantes.

**Kuruvachalil et al., (2022)** en su investigación titulada: Emisión de Carbono y Análisis de Costos del Uso de Recubrimientos Híbridos de Fibra Blanca: Una rehabilitación de carreteras, "*Carbon Emission and Cost Analysis of Using Hybrid Fibre White Topping Overlays—A Road Rehabilitation Feasibility Study*". Se considera como objetivo comparar las emisiones de carbono y el costo de fabricación de mezclas de acabado de concreto con tres tipos diferentes de fibras. Para ello se llevó a cabo un estudio de optimización genética multiobjetivo para identificar los diseños de mezcla con menores emisiones de carbono y aumentos de costos de producción. La producción de muestras se realizó a escala de laboratorio para facilitar una comparación efectiva y permitir posibles mejoras ambientales y económicas. La comparación efectiva de los impactos ambientales y los costos de fabricación depende en gran medida de una definición adecuada de la unidad funcional del producto y, por lo tanto, el estudio adoptó "un metro cúbico de concreto" como unidad funcional. Los límites del sistema para el presente estudio involucraron un límite desde la cuna hasta la fábrica que incluía la adquisición de materias primas, el transporte de materias

primas y la producción del producto principal. Dado que el producto fabricado se comparó experimentalmente con diferentes contenidos de material para determinar el rendimiento, se supone que las etapas de mantenimiento, uso y final del ciclo de vida son similares y, por lo tanto, se excluyen del análisis comparativo. Finalmente, el análisis de sensibilidad ilustró que la distancia del transporte es un factor crítico que contribuye al costo de producción, mientras que las emisiones de carbono son altamente sensibles a los factores de emisión para el transporte y la producción de cemento, además de que los resultados experimentales del estudio ilustraron que la incorporación de fibras aumenta significativamente la resistencia a la compresión, la resistencia a la tracción dividida y la resistencia a la flexión de las muestras. La muestra H1 registró el rendimiento más alto con un aumento del 8,73%, 39,93% y 30,11% en la resistencia a la compresión, la resistencia a la tracción dividida y la resistencia a la flexión, respectivamente, en comparación con la muestra de control. Sin embargo, el análisis de costos y emisiones de carbono indicó que las muestras de mezcla que contienen F2 y F3 tienen las menores emisiones de carbono y aumentos de costos de producción con un aumento porcentual de 0,57 % y 7,17 % respectivamente en comparación con la muestra de control. El análisis de sensibilidad identificó que la distancia de transporte, el factor de emisión de carbono incorporado para el cemento y el factor de emisión del transporte son los parámetros más sensibles a las emisiones de carbono.

**Kumar & Uppuluri, (2020)**, en su investigación titulada: Estudio sobre la mezcla de hormigón con materiales sostenibles mixtos cuaternarios para cobertura blanca ultrafina, "*A Study on Concrete Mix with Quaternary Blended Sustainable Materials for Ultra-Thin White Topping*". Se tomó como objetivo

principal demostrar la influencia del humo de sílice, las cenizas volantes y la escoria de alto horno granulada molida en la reparación de pavimentos asfálticos bituminosos. Para ello es que se desarrolló el siguiente procedimiento: Las dosificaciones optimizadas de humo de sílice (S), cenizas volantes (F) y GGBS (G) de los materiales cementicios suplementarios se obtienen como 14,72 %, 12,82 % y 19,29 % con el valor máximo de módulo de ruptura de la función objetivo de 6,4 MPa. Este artículo de investigación analiza las propiedades frescas y endurecidas medidas de diferentes dosificaciones y mezclas de concreto combinado cuaternario para que este acorde a los requerimientos de la superposición de concreto de acabado blanco ultrafino. Además, la optimización de materiales sostenibles para el máximo módulo de ruptura se llevó a cabo con el desarrollo de un modelo de regresión no lineal utilizando algoritmos genéticos. Finalmente se llegó a la conclusión de que la investigación sobre mezclas de hormigón combinado con materiales cuaternarios sostenibles para las superposiciones de hormigón ayudan a reducir el contenido de cemento, lo que reduce las emisiones de dióxido de carbono, mejora las propiedades frescas y endurecidas del hormigón, lo que hace que el hormigón y la mezcla sean duraderos con un mejor rendimiento a largo plazo. Por lo tanto, estas mezclas de hormigón para superposiciones de hormigón de acabado blanco ultrafino abordan el punto de vista económico con la inclusión del concepto de sostenibilidad que fue objeto de atención de la industria de la construcción global.

### ***1.1.2. Antecedentes nacionales***

**Cieza y Sosa (2023)**, en su estudio titulado "Condición de un pavimento asfáltico para proponer el diseño en la aplicación de la tecnología Whitetopping para la rehabilitación de vías urbanas", tuvieron como propósito principal evaluar

la condición de un pavimento asfáltico con el fin de desarrollar un diseño adecuado para su rehabilitación mediante la tecnología Whitetopping. Para ello, emplearon los métodos PCI y MTC, que clasificaron el pavimento existente en una condición deficiente, reflejada en indicadores como un IRI de 5,57 (problemas de seguridad), un PSI de 1,82 (baja satisfacción) y valores de PCI de 28,54 y MTC de 687,15 (presencia de fallas severas en la capa superficial).

Como resultado de esta evaluación, se concluyó que el pavimento presentaba deterioros significativos, lo que llevó al diseño de una capa de refuerzo Whitetopping de 8 pulgadas de espesor, con barras de transferencia de 1/2" colocadas a 25 cm y una separación de 30 cm entre sí. Este diseño se proyectó para extender la vida útil del pavimento en 20 años, garantizando una mejora sustancial en su desempeño y durabilidad.

**Churata (2023)**, en su investigación titulada "Estudio comparativo y caracterización de geopolímeros obtenidos a partir de ceniza volcánica, ceniza volante, puzolana, caolín y relave minero para la obtención de materiales de construcción", se planteó como objetivo analizar la viabilidad de producir geopolímeros mediante la combinación de un 50% de ceniza volcánica con un 50% de otra materia prima, como ceniza volante, relave minero, puzolana natural o metacaolín.

Para alcanzar este objetivo, se evaluaron las propiedades de los geopolímeros obtenidos a través de la adición de un activador alcalino compuesto por 75% de NaOH a 15M y 25% de Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>, utilizando una proporción líquido/sólido de 0.16. Los geopolímeros fueron caracterizados mediante ensayos de espectroscopia FTIR, difracción de rayos X (XRD) y pruebas mecánicas.



Los resultados confirmaron la viabilidad del uso de estas materias primas para la producción de geopolímeros. Además, se observó que la composición química y las características mineralógicas de los materiales de partida influyeron significativamente en la reacción de geopolimerización y en la resistencia a la compresión. En particular, la mezcla de cenizas volcánicas y puzolana natural demostró ser la más efectiva, alcanzando una resistencia a la compresión de 35 MPa, atribuida a la alta reactividad de la puzolana en combinación con los activadores alcalinos.

**Gstir (2023)**, en su estudio titulado "Implementación de la tecnología Whitetopping para la rehabilitación de pavimentos asfálticos en la vía universitaria, tramo: Puente Tingo – Cayhuaynita, Distrito de Pillco Marca – Huánuco, 2021", se planteó como objetivo principal evaluar la viabilidad del uso de la tecnología Whitetopping para la rehabilitación de pavimentos flexibles.

Para ello, se analizaron las condiciones del pavimento utilizando los métodos de la Viga Benkelman y el Rugosímetro (Merlín), complementados con un estudio de tráfico que permitió obtener una visión más integral de las características y necesidades del tramo evaluado. La investigación se clasificó como aplicada, con un nivel correlacional y un enfoque cuantitativo, bajo un diseño cuasiexperimental.

Los resultados indicaron que, tras la evaluación, se obtuvieron valores de 4.60 en el tramo entre las progresivas 0+000 y 0+200, y de 4.72 entre las progresivas 0+200 y 0+475, lo que evidencia que la implementación de la tecnología Whitetopping es una alternativa técnicamente viable para rehabilitar el pavimento en el tramo analizado.

**Tupayachy (2021)**, en su investigación titulada "Estudio y caracterización de geopolímeros a partir de ceniza volcánica para la obtención de materiales de construcción", se enfocó en desarrollar un material innovador que reuniera propiedades físicas y mecánicas adecuadas, posicionándose como una alternativa más amigable con el medio ambiente y económicamente viable en comparación con los materiales tradicionales utilizados en la industria de la construcción. Para ello, empleó como insumo principal ceniza volcánica proveniente del volcán Ubinas, aprovechando su composición para fabricar geopolímeros.

El estudio abarcó un análisis detallado de las características físicas, químicas, mineralógicas y estructurales de los morteros elaborados, tanto geopoliméricos como de cemento convencional. Además, se llevaron a cabo ensayos mecánicos con el fin de evaluar la resistencia y el comportamiento del material bajo diferentes condiciones. Los resultados revelaron que las propiedades mecánicas estaban significativamente influenciadas por el tipo de solución alcalina utilizada como activador y la selección del tipo de arena, ya fuera local o estándar.

Entre los principales hallazgos, destacó que la combinación de hidróxido de sodio (NaOH) como activador alcalino junto con arena local produjo los mejores resultados en términos de resistencia a la compresión. En concreto, se registraron valores de 27.49 MPa a los 7 días, 27.57 MPa a los 14 días y 24.59 MPa tras 28 días de ensayo. Estos resultados confirmaron el gran potencial de los geopolímeros elaborados para ser empleados en aplicaciones de construcción sostenible. Su desarrollo no solo representa una alternativa técnica viable, sino que también responde a la creciente demanda de materiales más respetuosos

con el medio ambiente, manteniendo altos estándares de desempeño y durabilidad.

**Pirca y Chincay (2021)**, en su investigación titulada "Propiedades mecánicas del concreto con fibras sintéticas para rehabilitar pavimento flexible mediante la técnica Whitetopping, en Avenida Central San Juan de Lurigancho, Lima, 2020", se propusieron analizar las propiedades mecánicas del concreto mejorado con fibras sintéticas, evaluando su viabilidad para la rehabilitación de pavimentos flexibles utilizando la tecnología Whitetopping.

El estudio incluyó la preparación y análisis de 27 probetas de concreto, algunas con aditivos y otras sin ellos, las cuales fueron sometidas a ensayos para determinar su resistencia a la flexión, resistencia a la tracción y módulo de elasticidad. Los resultados indicaron que el concreto que incorporaba aditivos mostró un desempeño significativamente superior en comparación con el concreto convencional, consolidándose como una alternativa eficiente para la rehabilitación de pavimentos flexibles mediante esta tecnología.

Asimismo, los investigadores concluyeron que el diseño propuesto cumplía con los requerimientos establecidos en la normativa técnica peruana. El espesor final del pavimento Whitetopping fue de 6.7 pulgadas (17 cm), clasificándose dentro de la categoría de Whitetopping delgado, lo cual lo hace adecuado para este tipo de intervenciones. Estos resultados refuerzan la efectividad del uso de concreto con fibras sintéticas como solución técnica y normativa para mejorar la vida útil y el desempeño de los pavimentos rehabilitados.

**Ríos y Junior (2020)**, en su investigación titulada "Evaluación de la carpeta de rodadura y la optimización aplicando el Ultra-Thin Whitetopping como

método de rehabilitación en la Av. Gerardo Unger, Comas – Lima", se enfocaron en analizar la viabilidad de implementar el Ultra-Thin Whitetopping como una solución para rehabilitar pavimentos flexibles, partiendo de un diagnóstico detallado de la condición de la carpeta asfáltica existente.

Para llevar a cabo el estudio, se realizaron ensayos de asentamiento del concreto (slump test) y pruebas de resistencia a la compresión, considerando tanto mezclas con aditivos químicos (Sikament-306 y Plastiment TM-12) como mezclas sin aditivos. Además, el diseño de la estructura del pavimento se desarrolló siguiendo las especificaciones del método AASHTO-93.

Los resultados evidenciaron que la incorporación de aditivos mejoró significativamente las propiedades del concreto. En el ensayo de slump, el asentamiento alcanzó un valor de 7 ½", mientras que la resistencia a la compresión aumentó en un 22% en comparación con el concreto convencional sin aditivos. En términos estructurales, el diseño del pavimento rígido mostró un espesor de 8.2 pulgadas sin aditivos, clasificado como Whitetopping estándar, mientras que al utilizar aditivos, el espesor se redujo a 7 pulgadas, siendo catalogado como Thin Whitetopping. Estos hallazgos subrayan la eficacia de esta técnica para optimizar la rehabilitación de pavimentos flexibles, tanto en términos de desempeño mecánico como de sostenibilidad estructural.

## **1.2. Bases teóricas**

### ***1.2.1. Pavimento Flexible***

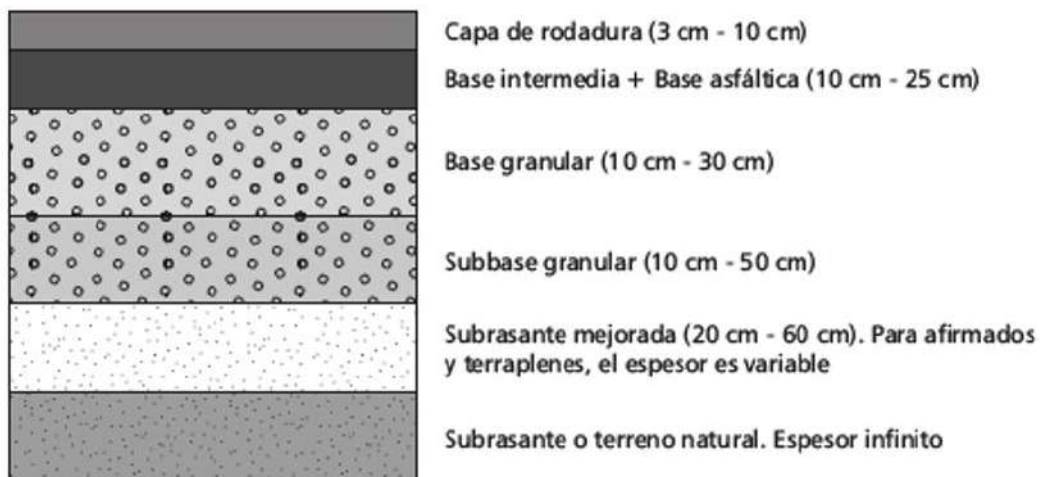
Según Rondón y Reyes (2022) los pavimentos asfálticos bituminosos son sistemas de infraestructura de vías compuestos de múltiples estratos. Tienen una capa superior asfáltica basada en capas inferiores de menor consistencia, integradas por agregados granulares o ligados (base, subbase, afirmado y, en

ciertas ocasiones, subrasante tratada o capa estructural), que reposan sobre el subsuelo o subrasante natural. Es así que la capa asfáltica superior desempeña tres roles principales:

**1.2.1.1. Estructural.** Su diseño y construcción deben proporcionar resistencia frente a los fenómenos que influyen en la fatiga de los materiales y acumulo de deformaciones continuas provocados por las cargas vehiculares recurrentes en el tiempo. Asimismo, debe soportar las inclemencias climáticas.

**1.2.1.2. Funcional.** Al recibir directamente las solicitaciones del tránsito rodado en su superficie, esta capa requiere un diseño y ejecución que garanticen un adecuado transito confortable y seguro de la vía durante toda su vía útil de servicio. (serviciabilidad)

**1.2.1.3. Impermeabilización.** Evita la infiltración de forma directa del agua hacia los estratos subyacentes o inferiores, lo cual es crucial para impedir la pérdida de resistencia al esfuerzo cortante que pudiesen manifestar las capas granulares de base, subbase y subrasante ante un incremento en la saturación de los materiales que las componen. Debido a lo descrito, se mantiene la integridad estructural de las capas inferiores del pavimento, así como también la capacidad de carga del pavimento bituminoso.



**Figura 1.** Perfil convencional de una estructura de pavimento bituminoso.

Fuente. Rondón y Reyes (2022) Pavimentos: materiales, construcción y diseño

El uso de pavimentos asfálticos bituminosos es más recurrente en vías de tránsito bajo a medio, pero también se usan en autopistas interestatales vehiculares, en pistas de aterrizaje, calles de rodaje y plataformas expuestas a las cargas ejercidas por los trenes de aterrizaje y las ruedas de las aeronaves. Conforme se acrecientan las demandas de cargas rodadas aplicadas y la cantidad de aplicaciones de carga, cobra especial relevancia caracterizar convenientemente el comportamiento de los suelos correspondiente a la subrasante y las capas de agregados no ligados que ofician de cimientos para la estructura estratificada del pavimento. (Rondón y Reyes, 2022)

### ***1.2.2. Ciclo de vida del pavimento***

Según Dawson (2020) describe las distintas etapas del ciclo de vida de un pavimento flexible, abarcando desde la fase de planificación hasta su periodo de servicio:

#### **1.2.2.1. Planificación y diseño**

Esta etapa consiste en evaluar las condiciones del suelo, seleccionar los materiales y diseñar la estructura del pavimento para garantizar su durabilidad y sostenibilidad.

#### **1.2.2.2. Construcción**

La construcción implica desde el estudio, colocación y compactación de las capas de materiales granulares y asfalto.

#### **1.2.2.3. Mantenimiento y rehabilitación**

Las acciones de mantenimiento o rehabilitación incluyen el sellado de grietas, la restauración de baches y los tratamientos superficiales para ampliar la vida útil del pavimento.

#### **1.2.2.4. Fin de vida útil**

Esto implica que el pavimento ya es intransitable, lo que representa que su condición de serviciabilidad es muy baja y accidentada. Por otro lado, al terminar su vida útil, el pavimento se retira y a menudo se recicla para su uso en nuevas construcciones

##### **1.2.2.4.1. Factores que afectan a la vida útil del pavimento**

###### **- Condiciones climáticas**

El clima afecta significativamente al deterioro del pavimento. Las fluctuaciones de temperatura y la exposición a la humedad pueden acelerar el daño.

###### **- Carga de tránsito**

El volumen y el peso del tráfico influyen directamente en el desgaste del pavimento.

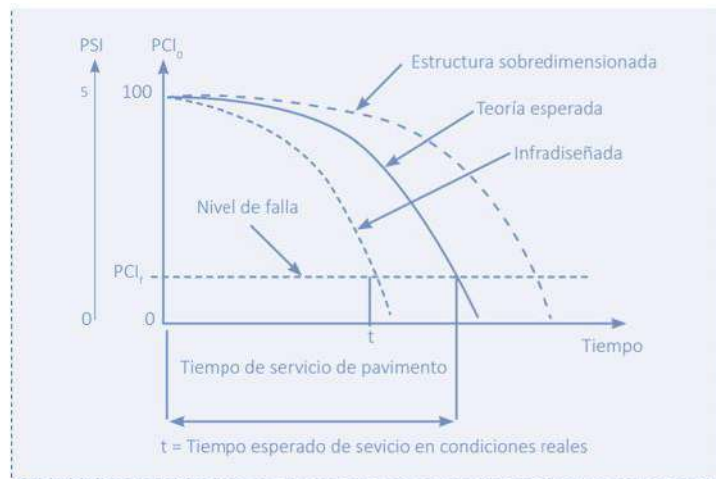
###### **- Calidad de los materiales**

La selección y correcta aplicación de los materiales durante la construcción son cruciales para la durabilidad del pavimento.

#### ***1.2.3. Condición y serviciabilidad del pavimento.***

Las labores de mantenimiento, rehabilitación y reparación se fundamentan en los valores de PCI o PSI, estos índices se utilizan para evaluar la proyección de deterioro que podría experimentar el pavimento en el transcurso de su vida útil. En la representación gráfica exhibida en la Figura 2 se aprecia la evolución del deterioro de una estructura pavimentada diseñada conforme a una trayectoria

de línea continua. Se establece que la línea asociada a un diseño excesivamente robusto no representa una preocupación significativa, dado que resultará en una infraestructura generosa que superará el tiempo de servicio previsto. No obstante, la línea de trazo discontinuo, correspondiente a una estructura subdimensionada, plantea una problemática considerable. En este caso, nos encontramos ante una situación seria, ya que la estructura pavimentada no cumplirá con la vida útil proyectada y, por ende, requerirá intervenciones de M&R antes de alcanzar su tiempo de servicio completo (Gutiérrez, 2021).



**Figura 2.** Situaciones de degradación del pavimento

Fuente: Wilfredo Gutierrez Lazares (2021). Mecánica de suelos. Aplicada a vías de transporte (macro.bibliotecasinlinea.com)

Para analizar la evolución del deterioro del pavimento, ya sea a través del índice de condición del pavimento (PCI) o del índice de servicio (PSI), es fundamental realizar mediciones periódicas. Estas mediciones permiten generar gráficos y evaluar los cambios en las condiciones del pavimento a lo largo de su vida útil. En la Figura 3 se presentan pautas específicas para llevar a cabo estas mediciones, que varían según la categoría de la carretera y el nivel de prioridad asignado.



Esto significa que tanto la frecuencia como el alcance de las evaluaciones se ajustan a la importancia de la vía y al volumen de tráfico que soporta. De esta forma, se optimiza el uso de los recursos destinados al mantenimiento y la rehabilitación, garantizando una gestión más eficiente y efectiva de la infraestructura vial (Gutiérrez, 2021).



**Figura 3.** Frecuencia de evaluación de pavimentos

Fuente: PCI, Jugo Burguera

En la Tabla N° 03 se identifica el momento óptimo para realizar evaluaciones en función del nivel de categoría de la carretera, diferenciando entre vías de primera, segunda y tercera categoría. Esta clasificación permite una planificación precisa de mantenimiento:

- Primera categoría: Carreteras de alta prioridad, generalmente de uso intenso y conexiones clave, requieren evaluaciones y mantenimiento frecuentes.
- Segunda categoría: Carreteras intermedias con menor tráfico, demandan evaluaciones periódicas.

- Tercera categoría: Vías de menor prioridad, de tráfico esporádico o rural, donde las intervenciones pueden ser menos frecuentes.

Este enfoque adaptativo optimiza el uso de recursos, promoviendo la durabilidad y seguridad vial.

**Tabla 1**

*Frecuencia de evaluación del pavimento*

Nivel de prioridad	Frecuencia de evaluación (años)		
	Tipo de vía		
	Primaria	Secundaria	Terciaria
1	0.5	1	1
2	1	1	2
3	1	2	3

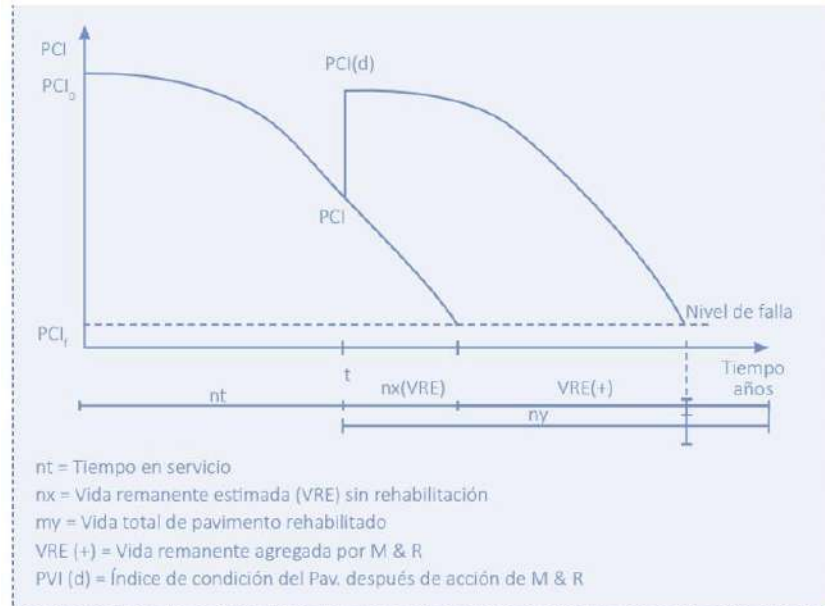
Fuente: PCI, Jugo Burguera.

#### **1.2.4. Vida remanente y rehabilitación**

La evaluación de los valores del PCI mediante inspecciones visuales es una herramienta clave para definir las actividades y prioridades relacionadas con el mantenimiento y la reparación de pavimentos. Al implementar acciones de mantenimiento y rehabilitación, el índice PCI se incrementa a un valor ajustado, conocido como PCI(d), lo que modifica la trayectoria de deterioro del pavimento y extiende su vida útil.

Las actividades de mantenimiento y rehabilitación que aumentan el PCI también generan un tiempo de servicio añadido (VRE+). Estas acciones pueden destinarse a extender la vida útil del pavimento o corregir su diseño inicial. El proceso de degradación del pavimento conduce eventualmente a un valor final de PCI (PCIf) que no resulta en la destrucción absoluta de la estructura.

Los términos de referencia del MTC pueden establecer este punto de falla. Lo crucial es que la curva intersecta este punto después de un tiempo igual al diseño inicial y equivalente a  $(nt + nx(VRE))$ . (Gutiérrez, 2021)



**Figura 4.** Concepto de vida remanente

Fuente: Jugo Burguera

### 1.2.5. Fallas del pavimento flexible

Fatiga y Grietas de Fatiga: Las grietas de fatiga son una de las más usuales en los pavimentos asfálticos bituminosos. Estas ocurren debido a la repetición de cargas de tráfico, generando la aparición de grietas en la superficie del pavimento. Este tipo de fallo se conoce comúnmente como "craquelado de piel de cocodrilo" debido a su patrón característico. La fatiga se acentúa con el incremento de cargas por eje, especialmente cuando estas superan ciertos umbrales. (Lu & Hajj, 2021)

Deformación Plástica o Ahuellamiento: El ahuellamiento es otra falla significativa que se manifiesta como surcos a lo largo de las rutas de las ruedas.

Esta deformación es resultado de la acumulación de deformaciones plásticas en las capas de asfalto bajo cargas repetitivas. Factores como la temperatura elevada y la calidad del material del pavimento contribuyen a esta falla. (Lu & Hajj, 2021)

**Daños por Factores Ambientales:** Factores como el agua, las heladas y la sal de carretera tienen un impacto notable en la degradación de los pavimentos asfálticos bituminosos. La penetración de agua puede debilitar la estructura del pavimento, mientras que las heladas y los deshielos recurrentes provocan expansión y contracción, generando grietas y otros daños. La sal utilizada para el deshielo también contribuye a la degradación del pavimento al acelerar la corrosión y la disolución de ciertos materiales. (Mączka & Piotr, 2022)

**Baches:** Los baches son cavidades que se forman en la superficie del pavimento, generalmente como resultado de la combinación de cargas de tráfico y la acción del agua. Los baches representan un peligro significativo para la seguridad vial y son una causa común de mantenimiento frecuente (Lu & Hajj, 2021)

**Problemas de Diseño y Construcción:** Las fallas pueden ser consecuencia de problemas inherentes en el diseño y la construcción del pavimento. Esto incluye la selección inadecuada de materiales, errores en el grosor de las capas, y una compactación insuficiente. Estos problemas estructurales pueden llevar a fallas prematuras en el pavimento (Mączka & Piotr, 2022).

**Tabla 2***Deterioros o fallas de los pavimentos asfálticos.*

Clasificación de los deterioros/fallas	Código de deterioro/falla	Deterioro/falla	Gravedad
Deterioros o fallas Estructurales	1	Piel de cocodrilo	1: Malla grande (> 0.5 m) sin material suelto 2: Malla mediana (entre 0.3 y 0.5 m) sin o con material suelto 3: Malla pequeña (< 0.3 m) sin o con material suelto
	2	Fisuras longitudinales	1: Fisuras finas en las huellas del tránsito (ancho $\leq$ 1 mm) 2: Fisuras medias corresponden a fisuras abiertas y/o ramificadas (ancho 1 mm y $\leq$ 3 mm) 3: Fisuras gruesas corresponden a fisuras abiertas y/o ramificadas (ancho > 3 mm). También se denominan grietas.
	3	Deformación por deficiencia estructural	1: Profundidad sensible al usuario < 2 cm 2: Profundidad entre 2 cm y 4 cm 3: Profundidad > 4 cm
	4	Ahuellamiento	1: Profundidad sensible al usuario pero $\leq$ 6 mm 2: Profundidad > 6 mm y $\leq$ 12 mm 3: Profundidad > 12 mm
	5	Reparaciones o parchados	1: Reparación o parchado para deterioros superficiales. 2: Reparación de piel de cocodrilo o de fisuras longitudinales, en buen estado. 3: Reparación de piel de cocodrilo o de fisuras longitudinales, en mal estado.
Deterioros o fallas Superficiales	6	Peladura y desprendimiento	1: Puntual sin aparición de la base granular (peladura superficial). 2: Continuo sin aparición de la base granular o puntual con aparición de la base granular. 3: Continuo con aparición de la base granular.
	7	Baches (huecos)	1: Diámetro < 0.2 m 2: Diámetro entre 0.2 y 0.5 m 3: Diámetro > 0.5 m
	8	Fisuras transversales	1: Fisuras finas (ancho $\leq$ 1 mm) 2: Fisuras medias, correspondientes a fisuras abiertas y/o ramificadas (ancho > 1 mm y $\leq$ 3 mm) 3: Fisuras gruesas, corresponden a fisuras abiertas y/o ramificadas (ancho > 3mm). También se denominan grietas.

Fuente. Tomado del Manual de Carreteras mantenimiento o conservación

vial. [https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas\\_carreteras/MTC\\_NORMAS/ARCH\\_PDF/MAN\\_9\\_MCV-2014\\_2016.pdf](https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/MTC_NORMAS/ARCH_PDF/MAN_9_MCV-2014_2016.pdf)

**1.2.6. Causas de degradación del pavimento**

El desgaste de los pavimentos puede ser causada por diversos factores, especialmente destacan las causas que influyen directamente en la estructura desde su construcción hasta su tiempo de servicio. Esta degradación puede

atribuirse a varias razones, como se muestra en la Tabla 3, donde se enumeran algunas de las causas que pueden llevar a un curso de deterioro de un pavimento que no logrará su tiempo de servicio diseñado debido a un diseño insuficiente.

(Gutiérrez, 2021)

**Tabla 3**

*Causas de fallas de un pavimento*

Causa	Efecto	Comentario
Tráfico	Infradiseño	Cargas reales diferentes a las previstas en el diseño.
Proceso constructivo	Estructura débil	Inadecuados: espesores, mezclas y estabilización, deficiencia en distribución y compactación.
Deficiencias de proyecto	Antieconómica	Diseños inadecuados, mala valoración de subrasante, inadecuada dosificación de la mezcla y no consideración del factor ambiental.
Factores ambientales	Vida útil	Elevación de napa freática, inundaciones, lluvias prolongadas, insuficiencia en drenaje superficial o profundo, variación térmica, congelamiento, sales nocivas.
Deficiente mantenimiento	Pronta rehabilitación	Técnicas inadecuadas, falta de conservación

Fuente: Wilfredo Gutierrez Lazares (2016). Mecánica de suelos. Aplicada a vías de transporte. (macro.bibliotecasenlinea.com)

**1.2.7. Evaluación de pavimentos**

**1.2.7.1. Inventario de daños**

Durante la etapa de inventario es crucial identificar la magnitud, tipo y severidad de los daños presentes, este proceso debe llevarse a cabo de acuerdo a las técnicas establecidas en los manuales de diagnóstico reconocidos, ya sea a nivel nacional como internacional. Asegurando una evaluación precisa y consistente de las condiciones del pavimento. En cuanto a los pavimentos asfálticos bituminosos, los daños suelen clasificarse en cinco categorías principales: deformaciones, fisuras, daños superficiales, pérdida de capas de la

estructura y otros, como afloramientos de agua y finos, y desplazamiento de bermas. Posteriormente se mencionaran estas cinco categorías las cuales fueron clasificadas por Rondón & Reyes (2022).

#### **1.2.7.1.1. Fisuras**

Para las fisuras longitudinales (ver Figura 05), la repetición de carga vehicular ocasiona flexión en la capa asfáltica, originando esfuerzos de tensión que provocan deformaciones plásticas y la formación de microfisuras. Estas microfisuras pueden colapsar con el tiempo, dando lugar a fisuras visibles en la superficie del pavimento. Por otro lado, las fisuras transversales (ver Figura 06) suelen ser consecuencia de fenómenos térmicos o envejecimiento de la mezcla asfáltica. Las causas comunes de fisuras transversales son el agrietamiento por baja temperatura y la fatiga térmica. El primero ocurre generalmente cuando las temperaturas descienden a  $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ , mientras que la fatiga térmica tiende a manifestarse en un rango de temperatura que va desde  $-7$  hasta  $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

La unidad para medir estos tipos de daños es la longitud cuantificada en metros, y para evaluar el área dañada, se multiplica esta longitud por un ancho de referencia de 0.6 m. Se aconseja evaluar áreas afectadas por longitudes de 100 m.

La severidad de los daños se puede clasificar como baja, regular o alta, según la longitud del tramo afectado y el ancho de la fisura, que varía entre menos de 1 mm para baja severidad, de 1 a 3 mm para severidad regular y más de 3 mm para severidad alta.





**Figura 5. Fisuras Longitudinales**



**Figura 5. Fisuras Transversales**

**- Evolución de las fisuras longitudinales y transversales:**

Las fisuras longitudinales y transversales pueden evolucionar hacia una malla eslabonada, lo cual conlleva a la infiltración de agua de lluvia, reduciendo la resistencia del pavimento y envejeciendo la capa asfáltica. La malla eslabonada se caracteriza por presentar cuadrículas con dimensiones longitudinales que superan los 15 cm. Si estas cuadrículas son más pequeñas, con dimensiones inferiores a 15 cm, se forma el daño conocido como piel de cocodrilo, generalmente acompañado por el hundimiento del área afectada. Por lo que esta



combinación de fisuras y hundimiento indica un deterioro significativo de la estructura del pavimento que requiere reparación adecuada.

- **Causas del daño por fatiga:**

- a) Este tipo de deterioro se genera principalmente debido a la fatiga del pavimento bajo ciertas condiciones específicas, tales como:
- b) Cuando la estructura del pavimento presenta un espesor insuficiente para soportar el tráfico vehicular, o cuando la capa asfáltica carece del grosor necesario para resistir las cargas impuestas.
- c) Presencia de zonas blandas o de baja rigidez que no fueron detectadas durante la colocación y compactación de las capas granulares.
- d) Compactación de mezclas asfálticas sobre capas granulares con exceso de humedad, lo que compromete la estabilidad estructural.
- e) Desplazamientos verticales significativos en la subrasante ocasionados por las cargas cíclicas generadas por el tránsito.
- f) Movimiento de la subrasante debido a la desecación de arcillas, producto de la absorción de agua por raíces de árboles cercanos.
- g) Uso de ligantes asfálticos con baja penetración o alta rigidez, lo que afecta la flexibilidad de la capa asfáltica.
- h) Envejecimiento de la mezcla o del ligante asfáltico, que disminuye sus propiedades mecánicas.
- i) Acumulación de humedad en las capas granulares como consecuencia de deficiencias en el sistema de drenaje del pavimento.

- j) Diseño inadecuado de la mezcla asfáltica, lo que compromete su desempeño frente a las cargas aplicadas.
- k) Aparición de fisuras reflejadas desde bases estabilizadas, que se trasladan a la capa superior asfáltica.

Identificar y comprender estas causas permite implementar estrategias más efectivas para prevenir y mitigar el daño en los pavimentos, optimizando su vida útil y desempeño.

#### **1.2.7.1.2. Piel de cocodrilo**

La falla conocida como "Piel de Cocodrilo" es un tipo de daño común en pavimentos asfálticos, caracterizado por una red de fisuras interconectadas que crean patrones irregulares, similares a la piel de un cocodrilo (Ver Figura 7). Este tipo de fisuración es resultado del debilitamiento progresivo del pavimento debido a cargas de tráfico repetidas, lo que genera fatiga en la capa superficial o en la base de soporte. A medida que la pavimentación sufre esta carga cíclica, se forman grietas longitudinales en las áreas de rodadura, que luego se conectan para formar bloques angulares pequeños. La "Piel de Cocodrilo" suele indicar problemas en la base del pavimento o un drenaje deficiente, lo cual reduce la capacidad de carga del pavimento y acelera su deterioro, eventualmente formando baches si no se realiza un mantenimiento adecuado ( Build-Construct, 2023).

#### **- Grados de severidad de la piel de cocodrilo:**

En el contexto de la evaluación del estado de las superficies pavimentadas, se pueden categorizar los niveles de daño en tres grados: bajo, regular y alto, según el porcentaje del área afectada y las características de las fisuras presentes.

- a. Nivel Bajo: Cuando el área afectada es menor al 10%, se considera que el daño es bajo. En este caso, las fisuras que aparecen son predominantemente longitudinales y paralelas, y no presentan desportillamiento. Además, estas fisuras suelen tener pocas conexiones entre sí o ninguna, y no hay indicios de bombeo, lo que sugiere que el pavimento todavía mantiene una buena integridad estructural.
- b. Nivel Regular: Cuando entre el 10% y el 50% del área está afectada, el daño es clasificado como regular. En estas circunstancias, las fisuras forman un patrón de polígonos pequeños y angulosos. Aunque hay un ligero desgaste en los bordes de las fisuras y estas se abren entre 1 y 3 mm, no se observa evidencia de bombeo. Esto indica un nivel moderado de deterioro, donde las fisuras empiezan a comprometer la superficie, pero aún no de manera severa.
- c. Nivel Alto: Cuando el área afectada excede el 50%, el daño es considerado alto. En esta situación, se observa un desgaste significativo y desportillamiento en los bordes de las fisuras. Además, los bloques de pavimento pueden moverse con el tránsito, y hay presencia de bombeo, lo cual es una clara señal de que el pavimento ha perdido una considerable parte de su capacidad para soportar el tráfico sin deformarse ni deteriorarse más.



**Figura 6.** *Piel de cocodrilo.*

#### **1.2.7.1.3. Agrietamiento en bloque**

Un tipo de deterioro en el pavimento que presenta un patrón visual similar al de la piel de cocodrilo son las fisuras en bloque (ver Figura 8). A diferencia de las fisuras asociadas a la piel de cocodrilo, las fisuras en bloque se desarrollan en áreas del pavimento que no están directamente sometidas a cargas vehiculares.

Las principales causas de este tipo de daño incluyen:

- Gradientes térmicos que generan fatiga térmica en el material, debilitando su estructura con el tiempo.
- Reflejo de grietas de contracción provenientes de las bases estabilizadas subyacentes, que se trasladan hacia la superficie del pavimento.
- Uso de un ligante asfáltico envejecido o con baja penetración, lo que aumenta su rigidez y reduce su capacidad para resistir

tensiones provocadas tanto por cambios térmicos como por factores mecánicos.

- Identificar estas causas es esencial para diseñar estrategias de mantenimiento preventivo que puedan prolongar la vida útil del pavimento y minimizar costos de reparación.



**Figura 7.** *Agrietamiento en bloque*

#### **1.2.7.1.4. Fisuras longitudinales y transversales**

Las fisuras longitudinales y transversales son tipos comunes de deterioro en pavimentos asfálticos. Las fisuras longitudinales, que se desarrollan paralelas al eje de la carretera, suelen ser causadas por la fatiga debido a la repetición de cargas de tráfico o problemas estructurales en las juntas del pavimento. Por otro lado, las fisuras transversales, que se presentan perpendicularmente al eje, son generalmente resultado de contracciones térmicas en climas fríos o diferencias de temperatura entre las capas del pavimento. Ambos tipos de fisuras requieren intervención para evitar su propagación y daño adicional en la superficie del pavimento (Myers & Roque, 2024)

Las tres importantes causas de este tipo de daño son:

- Inadecuada compactación de las juntas durante el proceso constructivo
- Deficiencia de ligante asfáltico en la zona de la junta.
- Variación de rigidez entre los materiales, especialmente evidente durante la construcción de juntas en condiciones de baja temperatura.

La construcción inadecuada de estas juntas podría generar abultamientos en la superficie y zonas con densidad variable en el contorno de las juntas, lo que conduce a un agrietamiento precoz.

Además, hay un tipo de agrietamiento conocido como agrietamiento de reflexión, que ocurre cuando la capa asfáltica se coloca sobre losas de concreto hidráulico en movimiento continuo.



**Figura 8.** Fisura longitudinal y transversal junta de construcción.

La severidad de las fisuras longitudinales y transversales en pavimentos se caracteriza por tres niveles, que consideran el ancho y deterioro de los bordes de las grietas: (Myers & Roque, 2024)

- Baja severidad: fisuras finas, menores a 3 mm, sin desintegración en los bordes.
- Moderada severidad: fisuras de 3 a 6 mm de ancho, con deterioro leve en los bordes.

- Alta severidad: fisuras mayores a 6 mm, con pérdida de material en los bordes, lo que indica un daño estructural significativo.

#### **1.2.7.1.5. Ahuellamiento**

El ahuellamiento es uno de los problemas de deterioro más significativos que afectan las capas asfálticas en pavimentos bituminosos. Este fenómeno se manifiesta como una deformación vertical permanente que se desarrolla en el pavimento debido al paso constante de vehículos, generando, con el tiempo, depresiones longitudinales y delgadas en el recorrido de las llantas (ver Figura 10). Este tipo de daño puede comprometer tanto la funcionalidad como la estructura del pavimento, afectando no solo la capa asfáltica superficial, sino también otras capas de la estructura vial.

Las principales causas del ahuellamiento incluyen:

- Uso de mezclas asfálticas con baja rigidez o sometidas a temperaturas elevadas, lo que disminuye su capacidad de resistencia.
- Compactación inadecuada tanto de la capa asfáltica como de las capas granulares subyacentes, lo que reduce su estabilidad estructural.
- Presencia excesiva de asfalto en la mezcla, lo que puede contribuir a deformaciones prematuras.
- Exposición a cargas de tránsito elevadas, especialmente en combinación con un espesor de pavimento insuficiente para soportarlas.

La severidad del ahuellamiento se clasifica de la siguiente manera:

- Bajo: Deformaciones con una profundidad inferior a 1 cm.



- Moderado: Deformaciones cuya profundidad varía entre 1 y 2.5 cm.
- Identificar y mitigar las causas del ahuellamiento es esencial para prolongar la vida útil del pavimento y garantizar la seguridad y comodidad de los usuarios.



**Figura 9.** *Ahuellamiento.*

#### **1.2.7.1.6. Hundimiento**

El hundimiento en pavimentos es una deformación localizada donde ciertas áreas del pavimento se encuentran a una elevación ligeramente más baja que el resto de la superficie. (Ver Figura 11). Este tipo de falla se caracteriza por su capacidad para acumular agua tras lluvias, lo cual aumenta el riesgo de hidroplaneo y afecta la calidad de la conducción en la vía. Los hundimientos suelen ser causados por la compactación inadecuada del subsuelo o por la acción de fenómenos como el frost heave, que implica la expansión y contracción del suelo debido a ciclos de congelación y descongelación. La reparación efectiva de esta falla requiere la remoción del pavimento afectado y la estabilización o



reemplazo del material subyacente para prevenir futuros problemas (Pavement Interactive, 2023)

Esas depresiones localizadas que se ven en los pavimentos, a las que se llaman hundimientos, suelen aparecer principalmente por varias razones:

Primero, cuando hay problemas con los sistemas de drenaje y el agua no se evacúa correctamente de la vía. También pueden surgir por fallas puntuales que quedaron en las capas de agregados durante la construcción y no se corrigieron.

Otra causa común es que el suelo de abajo, la subrasante, tiende a desplazarse hacia abajo ya sea porque se está secando o por el peso de los vehículos más pesados que circulan.

En algunas zonas específicas, si las capas granulares quedan demasiado húmedas, eso también puede generar hundimientos. Y por supuesto, si durante la construcción no se compactaron bien esas capas, con el tiempo se van asentando y formando estas depresiones.

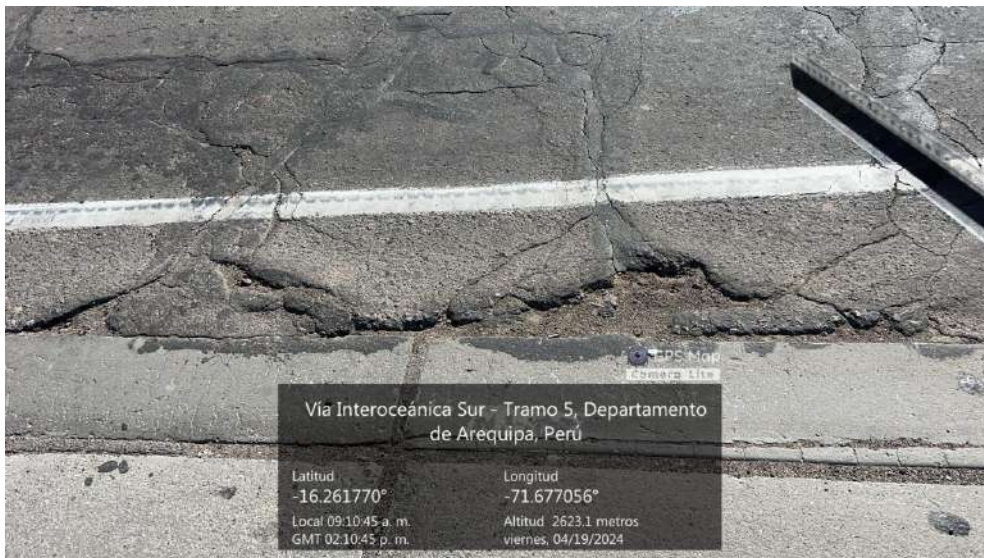
Las tuberías subterráneas de alcantarillado y acueducto que están dañadas también contribuyen, al igual que la inestabilidad de los taludes laterales de la vía.

La severidad de los hundimientos en pavimentos se clasifica en función de la profundidad y el impacto en la superficie:

- Baja severidad: Depresiones leves que generan irregularidades superficiales menores y afectan mínimamente la calidad de la conducción.

- Moderada severidad: Hundimientos visibles que pueden acumular agua tras lluvias, afectando la seguridad vial debido al riesgo de hidroplaneo.
- Alta severidad: Depresiones profundas y extendidas que requieren reparación inmediata, ya que provocan un deterioro significativo y aumentan los riesgos de accidentes.

Los hundimientos suelen ser causados por problemas en la compactación del subsuelo o fenómenos como el frost heave (congelamiento y descongelamiento del suelo), y requieren excavación y reemplazo de la subbase para su reparación (Pavement Interactive, 2023).



**Figura 10** *Hundimiento.*

#### **1.2.7.1.7. Ondulaciones**

Las ondulaciones son otro tipo de deformación que se presenta en los pavimentos, caracterizándose por alteraciones en el perfil longitudinal de la vía. En las áreas más afectadas, estas ondulaciones suelen ir acompañadas de grietas con formas semicirculares (ver Figura 12).

Este tipo de daño puede originarse por diversas causas. Una de las principales es el exceso de ligante asfáltico en la mezcla o su dosificación inadecuada en relación con los agregados pétreos. Además, el uso de ligantes asfálticos excesivamente blandos puede contribuir significativamente a la formación de ondulaciones.

La pérdida de estabilidad de la mezcla asfáltica, especialmente en climas cálidos, también es un factor determinante. Situaciones como el frenado de vehículos pesados en intersecciones o su circulación lenta en pendientes pronunciadas generan esfuerzos adicionales que favorecen este tipo de daño. Asimismo, la utilización de agregados pétreos excesivamente redondeados en la mezcla puede reducir la cohesión y aumentar la probabilidad de que se formen ondulaciones.

La severidad de las ondulaciones se clasifica en tres niveles:

- Baja: Profundidad máxima inferior a 1 cm, sin causar molestias significativas al usuario.
- Moderada: Profundidad entre 1 y 2 cm, generando cierta incomodidad durante el tránsito.
- Alta: Profundidad superior a 2 cm, causando molestias notables y obligando a los conductores a reducir la velocidad.

Comprender las causas y clasificar la severidad de las ondulaciones es fundamental para implementar medidas correctivas y preventivas que aseguren la funcionalidad y comodidad de los pavimentos.



**Figura 11** *Ondulación.*

#### **1.2.7.1.8. Descascaramiento**

Una de las afecciones que puede padecer el sistema de capas que conforma la estructura del pavimento es la delaminación de sus estratos superficiales. Este fenómeno, denominado descascaramiento, implica el desprendimiento de la capa asfáltica externa (comúnmente la de rodadura o parte de ella), sin que se vea comprometida la capa inmediatamente inferior (base intermedia o base asfáltica propiamente dicha). (Ver Figura 13)

Múltiples son los factores que pueden desencadenar este mecanismo de deterioro, según se nos explica: un grosor deficiente de la capa de rodadura, la utilización de un aglomerante o ligante asfáltico inapropiado, deficiencias en la compactación localizada, una pobre afinidad entre el ligante asfáltico y los agregados pétreos que conforman la mezcla, la extensión y compactación cuando hay precipitaciones, fallas en la imprimación previa, mezclas asfálticas excesivamente permeables o el envejecimiento del propio aglomerante asfáltico.

En cuanto al nivel de gravedad, este se clasifica del siguiente modo atendiendo a la profundidad del descascaramiento: leve si es menor a 1 cm,

moderado si fluctúa entre 1 y 2.5 cm, y severo cuando excede los 2.5 cm de profundidad.

Por otra parte, respecto al porcentaje de área afectada en un tramo de 100 metros lineales, el grado de severidad se puede catalogar así: leve si es inferior al 5% del área, moderado entre 5% y 10%, y severo si supera el 10% del área total.



**Figura 12.** *Descaramiento.*

#### **1.2.7.1.9. Bache**

El bache es otro tipo de deterioro común en las superficies pavimentadas. Este problema se presenta cuando una sección localizada del asfalto se desprende completamente, dejando al descubierto la capa granular subyacente. (Ver Figura 14).

La formación de baches suele deberse a varios factores. Entre estos se incluye la evolución de daños preexistentes, como el conocido patrón de "piel de cocodrilo". También pueden originarse en zonas donde no se detectaron "fallos" durante los procesos de compactación y extensión de las capas granulares. Adicionalmente, las deficiencias en los sistemas de drenaje o subdrenaje contribuyen a la aparición de baches. Otra causa relevante es la presencia de un exceso de humedad que ablanda la subrasante, debilitando la estructura del pavimento.

La severidad de los baches se clasifica según su profundidad en tres niveles. Los baches se consideran leves cuando su profundidad es menor a 2.5 cm, un problema común en capas delgadas como tratamientos superficiales, lechadas asfálticas y microaglomerados en caliente. Se clasifican como moderados cuando su profundidad oscila entre 2.5 y 5 cm, exponiendo así la capa granular subyacente. Finalmente, se consideran graves cuando su profundidad supera los 5 cm, afectando incluso la capa granular.

Además de la profundidad, la severidad de los baches también se evalúa en función de la proporción del área afectada en un tramo de 100 metros, considerando hundimientos superiores a 2 cm. En este contexto, los baches se clasifican como leves si afectan menos del 1% del área. Se consideran moderados cuando afectan entre el 1% y el 10% del área. Finalmente, los baches se clasifican como graves si más del 10% del área está afectada.



**Figura 13.** *Bache.*

#### **1.2.7.1.10. Daños superficiales**

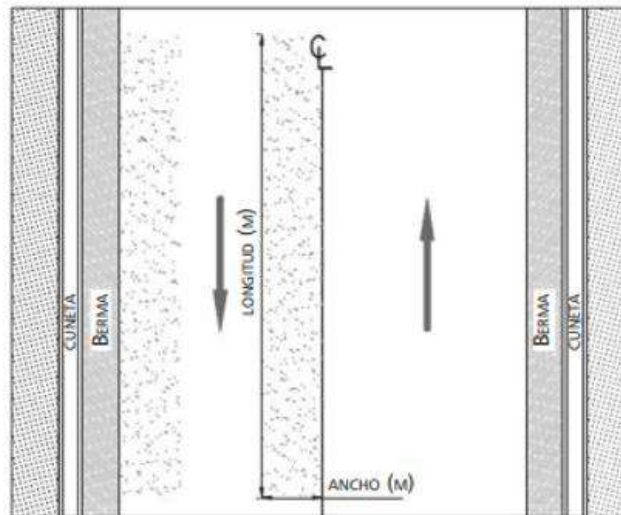
El desgaste superficial en los pavimentos ocurre principalmente debido al contacto continuo entre las llantas de los vehículos y la capa de rodadura. Este roce constante genera la pérdida progresiva del ligante asfáltico presente en la mezcla que conforma esta capa (ver Figura 16). Además, puede ser provocado por una adherencia inadecuada entre el ligante asfáltico y los agregados pétreos, o por una proporción incorrecta de asfalto en la mezcla. Este tipo de daño, que usualmente se mide en metros cuadrados ( $m^2$ ), puede evolucionar hasta causar la pérdida de los agregados de la superficie.

Cuando el desgaste superficial es severo, la capa de rodadura comienza a desintegrarse, dejando partículas sueltas de agregado pétreo visibles sobre el pavimento. Este fenómeno incrementa la rugosidad de la vía, haciéndola más vulnerable tanto al tráfico como a las condiciones climáticas desfavorables. El deterioro severo, también medido en metros cuadrados ( $m^2$ ), puede tener diversas causas, como el envejecimiento del ligante asfáltico, una compactación



insuficiente durante la construcción o la exposición a productos derivados del petróleo, como gasolina o aceites lubricantes.

Entender las causas y consecuencias de este tipo de desgaste es crucial para implementar estrategias de mantenimiento oportunas y evitar daños mayores en la infraestructura vial.

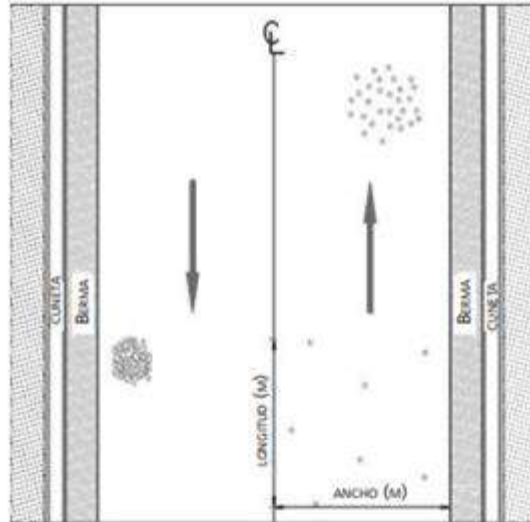


**Figura 14** *Desgaste superficial.*

Fuente: Tomado del Manual para la inspección visual de pavimentos asfálticos bituminosos de la Universidad Nacional de Colombia y el Ministerio de Transportes

Además de la pérdida de ligante y agregado, la fricción entre las llantas y la capa de rodadura puede causar el pulimento de los agregados pétreos. (Ver Figura 17). Este tipo de daño resulta de la combinación de altos volúmenes de tráfico y el uso de agregados de baja dureza. El pulimento de los agregados reduce significativamente la resistencia al deslizamiento del pavimento, aumentando así el riesgo de accidentes debido a superficies resbaladizas.

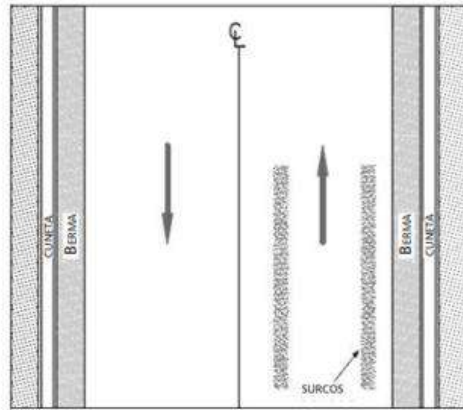




**Figura 15.** *Pérdida de agregado pétreo*

Fuente: Tomado del Manual para la inspección visual de pavimentos asfálticos bituminosos de la Universidad Nacional de Colombia y el Ministerio de Transportes

Cuando el desgaste superficial forma franjas o canales longitudinales bien definidos, este fenómeno se conoce como "surcos".(Ver Figura 18). Estos surcos son un indicativo de una mayor exposición y desgaste debido al tráfico.



**Figura 16.** *Surcos*

Fuente: Tomado del Manual para la inspección visual de pavimentos asfálticos bituminosos de la Universidad Nacional de Colombia y el Ministerio de Transportes

#### **1.2.7.1.11. Otros**

Los pavimentos asfálticos bituminosos pueden sufrir daños de diversas formas, incluyendo afloramientos de agua y finos, así como desplazamientos de las bermas. En ausencia de lluvia, el agua puede acumularse sobre el pavimento. Cuando esta agua se mezcla con partículas sólidas finas, se produce un tipo de daño denominado afloramiento de finos. La causa principal de este problema suele ser una construcción inadecuada o insuficiente de los sistemas de drenaje y subdrenaje en las carreteras. Este tipo de daño se cuantifica de dos maneras: en metros lineales cuando se trata de la acumulación de agua, y en número de veces cuando se detecta en áreas previamente afectadas por afloramiento de finos.

El desplazamiento de las bermas es otro problema significativo en las carreteras pavimentadas. Existen dos formas principales de desplazamiento: el corrimiento vertical y la separación horizontal. El corrimiento vertical implica que la berma se desplaza hacia arriba o hacia abajo, mientras que la separación

horizontal implica que la berma se aleja lateralmente de la calzada, generando grietas en el área de conexión. Estos daños se miden en metros de longitud afectada y suelen ser el resultado de problemas de estabilidad en los taludes.

El corrimiento vertical de las bermas se clasifica en tres niveles de severidad:

- **Baja severidad:** Desplazamientos menores a 6 mm. Estos movimientos son relativamente pequeños y pueden no afectar significativamente la estabilidad de la berma.
- **Media severidad:** Desplazamientos entre 6 mm y 2.5 cm. Estos movimientos son más pronunciados y pueden comenzar a comprometer la integridad estructural de la berma y la conexión con la calzada.
- **Alta severidad:** Desplazamientos mayores a 2.5 cm. Estos movimientos significativos indican un grave problema de estabilidad que requiere atención inmediata para prevenir daños mayores.
- Por otro lado, la separación horizontal de las bermas también se clasifica en tres niveles de severidad:
  - **Baja severidad:** Aberturas menores a 3 mm. Estas pequeñas aberturas pueden ser indicativas de un desplazamiento inicial, pero no representan un peligro inmediato.
  - **Media severidad:** Aberturas entre 3 y 6 mm. Estas aberturas más grandes indican un desplazamiento significativo que puede afectar la integridad de la berma y la calzada.

- **Alta severidad:** Aberturas mayores a 1 cm. Estas grandes aberturas representan un serio problema de estabilidad y requieren una intervención urgente para prevenir un deterioro adicional y garantizar la seguridad de la vía.

### **1.2.8. Método Pavement Condition Index (PCI)**

#### **1.2.8.1. Definición**

Shahin & Khon (1987)) destacan que el Índice de Condición del Pavimento (PCI, por sus siglas en inglés) es una herramienta clave para evaluar el estado de la superficie de los pavimentos y medir su capacidad funcional en relación con las condiciones y los daños presentes. Este índice fue diseñado para ofrecer una medida que refleje tanto la integridad estructural del firme como las condiciones de su capa superficial.

La recopilación de datos sobre los daños en el pavimento permite identificar las causas principales, ya sea relacionadas con las cargas de tránsito o con factores climáticos. Además, al realizar inspecciones periódicas, se puede recopilar información valiosa sobre el estado del firme, lo que no solo facilita la predicción de su comportamiento futuro, sino que también proporciona datos más detallados y específicos para la toma de decisiones.

A través de la observación de los diferentes tipos de deterioros que pueden presentarse en un pavimento, el método del PCI clasifica los daños en distintas categorías, permitiendo una evaluación estructurada y sistemática del estado del pavimento. Esta clasificación es fundamental para diseñar estrategias de mantenimiento y rehabilitación más eficaces.

a) **Deformación:** El daño es ondulado, esponjoso, presenta ranuras y protuberancias.

- b) Los daños por grietas son los daños longitudinales, transversales, diagonales, en bloque y en cocodrilo.
- c) Los daños en la textura superficial son daños en los gránulos sueltos, sangrado, agregados resbaladizos y exfoliación.
- d) Los daños en el bache son daños en los parches y en los cruces de ferrocarril.
- e) Los daños en el borde del pavimento son: grieta/rotura en el borde y arcén en declive.

#### **1.2.8.2. Determinación del grado de deterioro**

La determinación del grado de deterioro o del valor de deducción de un pavimento se basa en una serie de factores, entre los cuales se incluyen el tipo de falla identificada, el nivel de severidad de dicha falla y la proporción de superficie afectada en el área evaluada. Durante la inspección, es común encontrar múltiples tipos de fallas, cada una con diferentes grados de severidad que se clasifican como leve, moderada o severa. A cada tipo de falla se le asigna un nivel de severidad específico, lo que permite una evaluación detallada del estado del pavimento.

Un aspecto adicional en este proceso es el uso de un factor de ajuste, denotado como "F", que tiene como finalidad considerar únicamente las fallas que realmente impactan en el deterioro funcional y estructural del pavimento. Este factor permite ponderar la relevancia de cada falla en el cálculo final del Índice de Condición del Pavimento (PCI).

El procedimiento completo para calcular el PCI está representado en la Figura 21 mediante un diagrama de flujo, que detalla de manera esquemática las etapas necesarias para la obtención del índice. Este diagrama incluye pasos

como la identificación de las fallas, la clasificación de su severidad, el cálculo de los valores de deducción y la aplicación del factor de ajuste, hasta llegar al valor final del PCI. Dicho valor se representa en una escala gráfica que refleja el comportamiento y las condiciones actuales del pavimento (Huang y Ling, 2021).



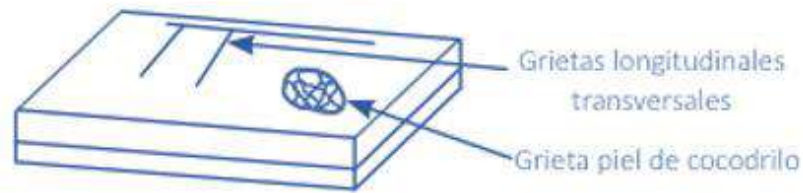
**Figura 17.** Diagrama de flujo del método del PCI

Fuente. Tomado de “Mecánica de Suelos aplicado a vías de transporte” (2020)

### 1.2.8.3. Pasos para el cálculo del PCI

- Paso 1. Inspección del pavimento, tipos de fallas y severidad y determinación de densidad, para lo cual se emplea principalmente un análisis de

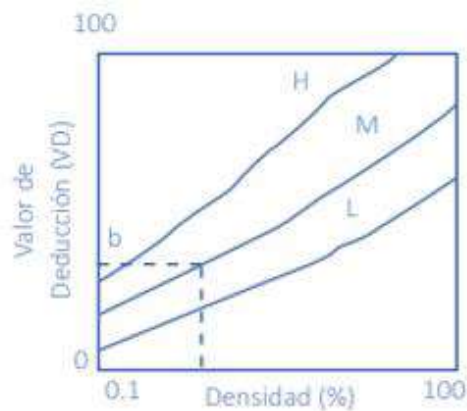
forma visual. En la figura 22 se puede ver una representación general de las fallas que podrían presentarse en una inspección.



**Figura 18.** Inspección del pavimento

Fuente. Tomado de “Mecánica de suelos aplicado a vías de transporte” (2020)

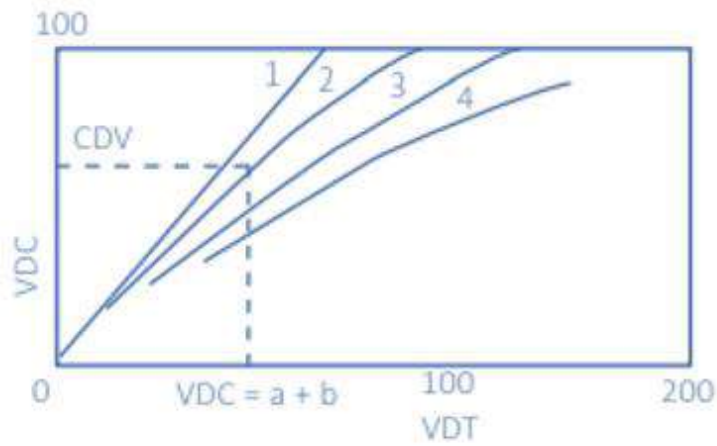
- Paso 2. Determinación de los valores de deducción, por lo que en la Figura 23 se observa el valor de deducción expresado en términos de densidad, dependiendo del nivel de las fallas.



**Figura 19** Determinación de los valores de deducción

Fuente. Tomado de “Mecánica de suelos aplicado a vías de transporte” (2020)

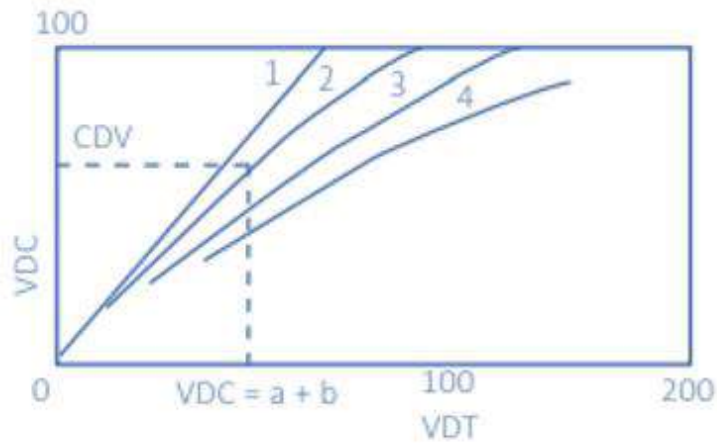
- Paso 3. Cómputo del valor total de deducción:  $VDT = a + b$ . Tal como se observa en la Figura 24, se deriva de acuerdo al VDC



**Figura 20.** Valor total de reducción

Fuente. Tomado de “Mecánica de suelos aplicado a vías de transporte” (2020)

- Paso 4. Ajuste de valor total deducido. Este ajuste se da de acuerdo a la Figura 25.



**Figura 21.** Valor total deducido

Fuente. Tomado de “Mecánica de suelos aplicado a vías de transporte” (2020)



- Paso 5. Cálculo del Índice de Condición del Pavimento (PCI):

$$PCI = 100 - VDC$$

Para determinar el estado del pavimento, se emplean dos enfoques de inspección. En ambos métodos, la sección del pavimento se divide en unidades manejables, generalmente de 225 m<sup>2</sup>, siempre que el tamaño del área lo permita, lo que equivale a los 100 metros lineales referenciados en el método estándar.

- **Primer Procedimiento:** Este enfoque consiste en realizar una inspección detallada de todas las unidades en las que se ha dividido la sección del pavimento. Cada unidad se evalúa minuciosamente, registrando los datos correspondientes a los distintos tipos de fallas en planillas específicas. Este procedimiento proporciona una visión integral del estado del pavimento, siendo especialmente útil para proyectos donde se requiere una evaluación exhaustiva. Sin embargo, es importante tener en cuenta que este método puede ser costoso y demandar una cantidad significativa de tiempo y recursos debido a la necesidad de evaluar cada unidad de forma individual.
- **Segundo Procedimiento:** Este método alternativo se basa en la evaluación de una muestra seleccionada aleatoriamente de las unidades. Mediante un plan de muestreo estadístico, se calcula el Índice de Condición del Pavimento (PCI) sin necesidad de inspeccionar todas las unidades, lo que permite una mayor eficiencia en el uso de los recursos disponibles. La selección aleatoria asegura que la muestra sea representativa del estado

general de la sección del pavimento, manteniendo un balance entre precisión y eficiencia.

Para garantizar que la muestra sea representativa, el número mínimo de unidades a evaluar ( $n$ ) se calcula utilizando una ecuación específica (ver Figura 26). Esta ecuación, desarrollada por Shahim y Khon en 1987, se basa en principios estadísticos que consideran la precisión deseada y las características de la población. Su aplicación asegura resultados confiables sin la necesidad de realizar una inspección completa de todas las unidades, optimizando los recursos y el tiempo invertido en el análisis.

**Figura 22.** Ecuación para calcular el tamaño mínimo de muestra a evaluar.

$$n = N * \sigma^2 / (e^2 / 4(N - 1) + \sigma^2)$$

Donde:

$n$ : Número de unidades de muestra que deben evaluarse.

$N$ : Número total de unidades en la sección del pavimento (mínimo de 5 unidades).

$e$ : Margen de error permitido en la determinación del PCI (se recomienda un error de  $\pm 5$  puntos del PCI).

$s$ : Desviación estándar del PCI en las unidades de la sección (si no se dispone de datos, se recomienda usar un valor inicial de  $s = 1.0$ ).

La ecuación empleada para calcular el número de unidades de muestra necesarias está diseñada para garantizar un nivel de confianza del 95%. Esto implica que, al usar el número de muestras calculado ( $n$ ), el Índice de Condición del Pavimento (PCI) tendrá un margen de error de  $\pm e$  respecto al valor real.

El mínimo establecido para N, el total de unidades en la sección evaluada, es de 5 unidades, asegurando así una representatividad adecuada del pavimento analizado. Este enfoque estadístico permite optimizar los recursos y mantener la precisión en los resultados del PCI.

### **1.2.8.3. Ejemplo de cálculo del PCI**

Para una sección de carretera dividida en 100 unidades de 30 metros de longitud cada una, si se requiere determinar el Índice de Condición del Pavimento (PCI) con un margen de error de  $\pm 5\%$ , el cálculo indica que es necesario evaluar un mínimo de 14 unidades. Estas unidades deben seleccionarse siguiendo uno de los dos procedimientos establecidos por el método.

#### **1.2.8.3.1. Selección de unidades:**

##### **a. Primer procedimiento:**

- Este enfoque divide las 100 unidades en grupos iguales o similares. Por ejemplo:
  - 6 grupos de 14 unidades y 1 grupo de 16, o
  - 5 grupos de 14 unidades y 2 grupos de 15.
- Luego, se seleccionan 2 unidades aleatorias de cada grupo, hasta completar las 14 necesarias.

##### **b. Segundo procedimiento (sistemático):**

- En este método, las unidades se seleccionan uniformemente espaciadas. Se comienza con una unidad elegida aleatoriamente entre 1 y 7.
- Por ejemplo, si se selecciona la unidad 5, las siguientes unidades a evaluar serían: 5, 12, 19, 26, etc., hasta alcanzar las 14 unidades requeridas.

### **1.2.8.3.2. Relevamiento de fallas:**

El relevamiento de fallas incluye la recopilación de información mediante inspección visual y trabajo de campo, considerando los siguientes aspectos:

- **Tipos de falla:**

Todas las fallas observadas deben clasificarse según el catálogo descrito en la Tabla 4. Este catálogo enumera los tipos de fallas, sus descripciones y las unidades empleadas en la evaluación. Es esencial respetar la numeración asignada a cada falla para facilitar el procesamiento computarizado de los datos.

- **Severidad de falla:**

Cada tipo de falla se clasifica en diferentes niveles de severidad (leve, moderada o severa) según las características específicas del daño. Esto permite identificar la gravedad del problema y definir las medidas correctivas necesarias.

- **Valor de deducción (VDC):**

Este valor se calcula con base en el tipo de falla, su severidad y la densidad de la misma en el pavimento. El VDC refleja el impacto de las fallas en la condición general del pavimento y se utiliza en el cálculo del PCI.

### **1.2.8.3.3. Determinación del PCI**

El PCI se calcula mediante la fórmula:

$$PCI = 100 - VDC \quad \text{PCI} = 100 - \text{VDC}$$

Este valor proporciona una visión cuantitativa de la condición del pavimento, facilitando la priorización de acciones de mantenimiento y rehabilitación en función del estado de las secciones evaluadas.

**Tabla 4**

*Catálogo de fallas para el método del PCI*

FALLAS N.º	DESCRIPCIÓN	UNID.
1	Grieta piel de cocodrilo	m2
2	Exudación de asfalto	m2
3	Grietas de contracción (bloque)	m2
4	Elevaciones - hundimiento	m
5	Corrugaciones	m2
6	Depresiones	m2
7	Grietas de borde	m
8	Grietas de reflexión de juntas	m
9	Desnivel calzada - hombrillo	m
10	Grietas longitudinal y transversal	m
11	Baches y zanjas reparadas	m2
12	Agregados pulidos	m2
13	Huecos	Nº
14	Cruce de rieles *	m2
15	Ahuellamiento	m2
16	Deformación por empuje	m2
17	Grietas de deslizamiento	m2
18	Hinchamiento	m2
19	Disgregación y desintegración	m2

Fuente: PCI, USACE.

Así mismo, en la Tabla 5 y Tabla 6 se puede observar las fallas considerables teniendo en cuenta el tipo, densidad, severidad y valor de deducción, además de las posibles causas dependiendo del tipo de falla.

**Tabla 5***Fallas considerables en la determinación del PCI*

Cálculo del PCI				
Tipo de falla	Densidad	Severidad	Valor de deducción	
3	2.38	L	2	
3	7.14	M	14	
10	9.52	L	7	PCI=160-VDC
10	2.88	M	8	<b>66</b>
1	3.81	L	22	
7	2.58	L	3	CONDICIÓN DEL PAVIMENTO
13	0.48	L	12	<b>BUENA</b>
VALOR TOTAL DE DEDUCCIÓN			58	
VALOR DE DEDUCCIÓN CORREGIDO (VDC)			34	

**Tabla 6***Interpretación de los valores de PCI y la condición del pavimento*

Falla N°	Descripción unidad		Causa principal		
			Tráfico	Clima	Materiales
1	Grieta piel de cocodrilo	m <sup>2</sup>	✓		
2	Exudación de asfalto	m <sup>2</sup>		✓	✓
3	Grietas de contracción (bloque)	m <sup>2</sup>		✓	✓
4	Elevación - hundimiento	m <sup>2</sup>		✓	✓
5	Corrugaciones	m <sup>2</sup>		✓	✓
6	Depresiones	m <sup>2</sup>		✓	✓
7	Grietas de borde	m		✓	✓
8	Grietas de reflexión de juntas	m		✓	✓
9	Desnivel calzada - hombrillo	m		✓	✓
10	Grietas longitudinal - transversal	m		✓	✓
11	Baches y zanjas reparadas	m <sup>2</sup>	✓		
12	Agregados pulidos	m <sup>2</sup>	✓		
13	Huecos	N°.	✓		
14	Cruces de rieles	m <sup>2</sup>			
15	Ahuellamiento	m <sup>2</sup>			
16	Deformación por empuje	m <sup>2</sup>			
17	Grieta de deslizamiento	m <sup>2</sup>		✓	✓
18	Hinchamiento	m <sup>2</sup>			
19	Disgregación y desintegración	m <sup>2</sup>			

Por otro lado, en la Tabla 7, se visualiza la interpretación de los valores PCI para saber su significado.

**Tabla 7**

*Interpretación de la escala PCI*

PCI	Significado
100	Pavimento en "perfecto" estado.
70	Punto en que el pavimento comienza a mostrar pequeñas fallas localizadas, es decir, el punto en que deben iniciarse acciones de mantenimiento rutinario o preventivo menor.
55	Punto en que el pavimento requiere acciones de mantenimiento localizado para corregir fallas más fuertes. Su condición de rodaje sigue siendo "buena", pero su deterioro o reducción de calidad de rodaje (relación de deterioro) comienza a aumentar.
40	Punto en el que el pavimento muestra fallas más acentuadas y su condición de rodaje puede calificar- se como regular o "aceptable", su rata de deterioro aumenta rápidamente. Este punto es cercano al definido como punto "óptimo" de rehabilitación.
0	El pavimento está fuertemente deteriorado, presenta diversas fallas avanzadas y el tráfico no puede circular a velocidad normal. El pavimento se considera "fallado" y requiere acciones de mantenimiento mayor y eventualmente reconstrucción parcial o bacheo de un alto porcentaje de su área.

**1.2.9. Whitetopping**

**1.2.9.1. Definición**

La organización de Pavement Interactive (2020) menciona que se refiere a una capa de concreto portland sobrepuesta en un pavimento asfáltico comportándose como una sección compuesta, normalmente tiene un espesor de 4" a 11" y se aplica a pavimentos que presentes diferentes fallas. Gracias a esta tecnología tiende a mejorar la capacidad de servicio, alargar la vida útil del pavimento, durante todo su ciclo de vida se recude costos de mantenimiento y aumenta seguridad al transportista.

## **1.2.9.2. Clasificación del Whitetopping**

### **1.2.9.2.1. Whitetopping**

Consiste en un recubrimiento de PCC de superior a 200 mm de espesor sobre la capa bituminosa existente, diseñado y construido sin considerar ninguna unión entre el recubrimiento de hormigón y la capa bituminosa subyacente. El recubrimiento blanco convencional se diseña y ejecuta como un nuevo pavimento rígido, sin asumir ninguna acción compuesta, tratando la superficie bituminosa existente como una sub-base, similar al Hormigón Lean Seco (DLC). La condición de la superficie bituminosa existente no es significativamente importante, excepto que esta no debe presentar daños aislados como hundimientos o problemas relacionados con el material (Pavement Interactive, 2020).

### **1.2.9.2.2. Thin Whitetopping**

Los revestimientos de PCC con un grosor superior a 100 mm e inferior o igual a 200 mm se clasifican como revestimientos finos (Thin White-topping, TWT). Aunque la adherencia entre el PCC sobrepuesto y la capa bituminosa subyacente puede ser una consideración en el diseño, no es obligatoria. Se suele emplear hormigón de alta resistencia con fibras y las juntas tienen una separación más corta, de 0.6 a 1.25 m (Pavement Interactive, 2020).

### **1.2.9.2.3. Ultra-Thin Whitetopping**

Los revestimientos de PCC de espesor igual o inferior a 100 mm se clasifican como revestimientos blancos ultrafinos (Ultra-Thin White-topping, UTWT). En este caso, la adherencia entre el PCC superpuesto y la capa bituminosa subyacente es obligatoria. La superficie bituminosa existente se suele fresar a una profundidad de 25-40 mm para asegurar la adherencia necesaria en la interfaz entre ambas capas. Este fresado es preferible porque garantiza una



adherencia efectiva, esencial para el buen rendimiento del UTWT. Se utilizan fibras y hormigón de alta resistencia para mejorar el desempeño del revestimiento (Pavement Interactive, 2020).

**Tabla 8**

*Cuadro resumen de la clasificación de Whitetopping.*

Clasificación Whitetopping	Espesor de Losa	Observaciones
Convencional Whitetopping	$\geq 20$ cm	no asumir adherencia entre capas
Thin Whitetopping	Entre 20 y 10 cm	Se puede o no asumir adherencia entre capas
Ultra Thin Whitetopping	Entre 10 y 5 cm	Se asume adherencia entre capas

### **1.2.9.3. Beneficios del Whitetopping**

El Whitetopping en pavimento flexible existente proporciona muchos beneficios adicionales en comparación con la alternativa de recubrimiento bituminoso convencional. Según Chaney Enterprise (2020) los beneficios más resaltantes de la aplicación de la tecnología Whitetopping es la contribución positiva con el medio ambiente, reducción de costos durante el ciclo de vida y mejora el rendimiento del tránsito. Al introducir una capa de concreto hidráulico en un pavimento flexible se tendría las capacidades de un pavimento donde se mejoraría las temperaturas del pavimento, un consumo de combustible de los automóviles y camiones más eficientes.

### **1.2.9.4. Diseño de Whitetopping**

La capa de rodadura blanca convencional se diseña y construye como un nuevo pavimento rígido sin asumir ninguna acción compuesta. En este tipo de revestimiento blanco, las juntas transversales están provistas de pasadores para transferir la carga y las juntas longitudinales suelen estar provistas de barras de

unión para mantener unida la losa. La transferencia de carga a través de las juntas es posible mediante barras de espiga, enclavamiento granular o mediante la acción combinada de ambos mecanismos.

#### **1.2.9.4.1. Metodología AASHTO**

La metodología AASHTO, para el diseño de pavimentos delgados de concreto sobre pavimento asfáltico (Thin Whitetopping) se fundamenta en un conjunto de procedimientos técnicos que integran el análisis estructural y funcional del pavimento existente. Este enfoque incluye la evaluación de las propiedades del pavimento base (asfáltico) y su capacidad portante, así como la consideración de las cargas de tráfico y las condiciones climáticas específicas del área donde se implementará el pavimento.

El diseño contempla también la selección de materiales adecuados y la elaboración de la mezcla de concreto, junto con el cálculo del espesor óptimo de la capa de concreto que asegure la durabilidad y el desempeño requerido.

Mediante un enfoque empírico-mecanicista, la metodología de AASHTO incorpora parámetros como la resistencia a la fatiga del concreto y su capacidad para distribuir las cargas vehiculares, lo que permite garantizar una vida útil prolongada del pavimento. Este método determina el espesor necesario basándose en las características del tráfico, los niveles de carga y los ciclos térmicos y mecánicos que experimentará el pavimento.

La ecuación propuesta en la metodología sirve para calcular la estructura del diseño, considerando los factores mencionados, y asegura que la capa de concreto se adapte a las condiciones específicas del sitio (Huang, 2004).

$$\log_{10}(W18) = Z_r * S_o + 7.35 * \log_{10}(D+1) - 0.06 + \frac{\log_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4.5-1.5}\right)}{1 + \frac{1.624 * 10^7}{(D+1)^{8.46}}} + (4.22 - 0.32 * pt) * \log_{10}\left(\frac{S'c * Cd * (D^{0.75} - 1.132)}{215.32 * \left(\frac{E_c}{k_{efec}}\right)^{0.25}}\right)$$

La fórmula utilizada en la metodología AASHTO para el diseño de pavimentos delgados de concreto (Thin Whitetopping) considera los siguientes parámetros clave:

- W18: Tráfico, expresado en términos del número total de repeticiones de ejes equivalentes de 80 kN (18,000 libras) a lo largo de la vida útil del pavimento.
- ΔPSI: Cambio de serviciabilidad, que representa la variación en el Índice de Servicio del Pavimento (PSI) desde su condición inicial hasta su nivel terminal.
- D: Espesor de la losa de concreto, que es el objetivo principal del cálculo.
- Z<sub>r</sub>: Valor de desviación estándar normal, que depende del nivel de confiabilidad seleccionado para el diseño.
- S<sub>o</sub>: Desviación estándar total, que refleja la variabilidad inherente del diseño y los materiales utilizados.
- S'c: Módulo de rotura del concreto (flexión), que indica la capacidad del concreto para resistir esfuerzos de tracción.
- J: Coeficiente de transferencia de carga, que mide la eficiencia de la transmisión de cargas entre las losas adyacentes.
- Cd: Coeficiente de drenaje, que evalúa la capacidad del sistema de drenaje para manejar el agua dentro de las capas del pavimento.

- $E_c$ : Módulo de elasticidad del concreto, que refleja su rigidez y capacidad para resistir deformaciones bajo carga.
- $K_{efec}$ : Módulo de reacción efectivo de la subrasante, que combina las propiedades del suelo base y las capas de soporte del pavimento.

#### **a. Tránsito**

El estudio de tráfico es un análisis sistemático diseñado para evaluar los patrones de movimiento de vehículos y peatones en una zona específica. Este análisis tiene como objetivo optimizar el flujo vehicular y mejorar la seguridad vial. La recopilación de datos incluye información sobre la cantidad de vehículos que circulan, sus velocidades, los tiempos de viaje, la capacidad de las vías y las condiciones del tráfico en diferentes franjas horarias.

El propósito de este estudio es identificar problemas críticos, como congestiones y puntos conflictivos, para desarrollar soluciones prácticas que permitan una gestión más eficiente del tráfico. Este análisis es fundamental para la planificación y diseño de infraestructuras de transporte, además de ser una herramienta clave en la implementación de políticas de movilidad sostenible (Cynthia, et al., 2020).

#### **- Determinación del Espesor de Pavimentos: Basado en el Análisis de Tráfico**

El cálculo del espesor de los pavimentos, particularmente en diseños como el Thin Whitetopping, se basa en la evaluación de las cargas equivalentes acumuladas durante el periodo de diseño. Esto requiere un análisis exhaustivo del flujo vehicular, el cual debe incluir:





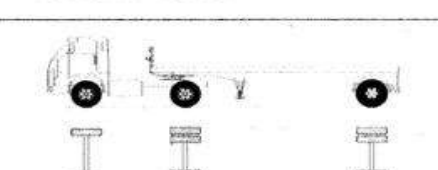
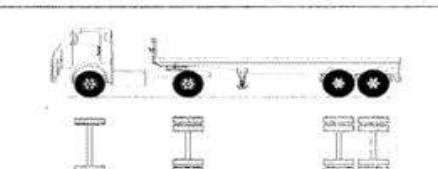
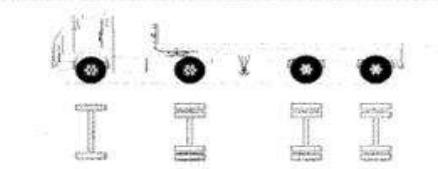
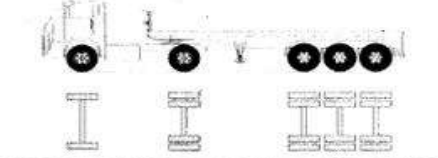
- Composición del tráfico: Tipos y proporciones de vehículos que transitan por la vía.
- Flujo promedio anual: Cantidad de vehículos que circulan por la carretera en un año.
- Factor de camiones: Influencia de los vehículos pesados en el desgaste del pavimento.
- Flujo acumulado: Medido en términos de número de ejes que impactan la superficie.

Para llevar a cabo este análisis, se utiliza un formato estándar proporcionado por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC). En este formato, se registra el conteo de vehículos que circulan en ambos sentidos de la carretera durante un periodo de tiempo específico.

- **Cálculo de Cargas Equivalentes de Eje Estándar (ESAL):**

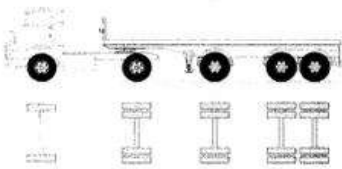
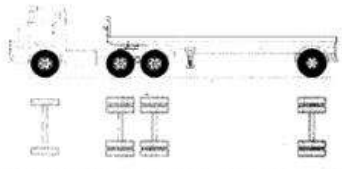
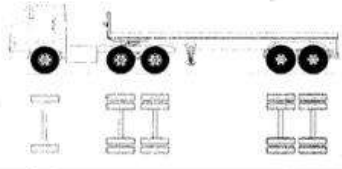
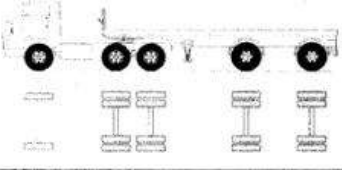
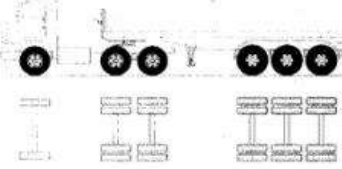
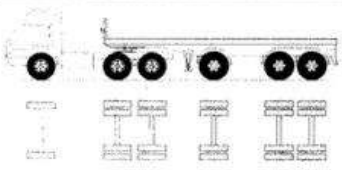
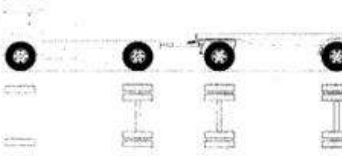
Con los datos recopilados, se identifica el tipo de vehículos que transitan por la vía y se realiza un análisis de las cargas que generan. Este proceso incluye el uso de figuras de referencia (Figura 27 a la Figura 32) que permiten calcular el valor de las Cargas Equivalentes de Eje Estándar (ESAL). Este valor es esencial para ser introducido en la fórmula general utilizada para determinar el espesor óptimo del pavimento.

En resumen, el estudio de tráfico no solo optimiza el diseño de las infraestructuras viales, sino que también garantiza que los espesores calculados sean adecuados para resistir las cargas generadas durante la vida útil del pavimento, contribuyendo a su durabilidad y funcionalidad.

TABLA DE PESOS Y MEDIDAS								
Configuración vehicular	Descripción gráfica de los vehículos	Long. Máx. (m)	Eje Delant	Peso máximo (t)				Peso bruto máx. (t)
				Conjunto de ejes posteriores				
				1º	2º	3º	4º	
C2		12,30	7	11	—	—	—	18
C3		13,20	7	18	—	—	—	25
C4		13,20	7	23 <sup>10</sup>	—	—	—	30
8x4		13,20	7+7 <sup>20</sup>	18	—	—	—	32
T2S1		20,50	7	11	11	—	—	29
T2S2		20,50	7	11	18	—	—	36
T2Se2		20,50	7	11	11	11	—	40
T2S3		20,50	7	11	25	—	—	43

**Figura 23** *Peso y medias máximas permitidas parte 01*

Fuente: Reglamento nacional de vehículos Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2003, pág. 91)

Configuración vehicular	Descripción gráfica de los vehículos	Long. Máx. (m)	Eje Delant	Peso máximo ( t )				Peso bruto máx. ( t )
				Conjunto de ejes posteriores				
				1º	2º	3º	4º	
T2Se3		20,50	7	11	11 <sup>(a)</sup>	18	—	47
T3S1		20,50	7	18	11	—	—	36
T3S2		20,50	7	18	18	—	—	43
T3Se2		20,50	7	18	11	11	—	47
T3S3		20,50	7	18	25	—	—	48 <sup>(a)</sup>
T3Se3		20,50	7	18	11 <sup>(a)</sup>	18	—	48 <sup>(a)</sup>
C2R2		23,00	7	11	11	11	—	40

**Figura 24** *Peso y medidas máximas permitidas parte 02*

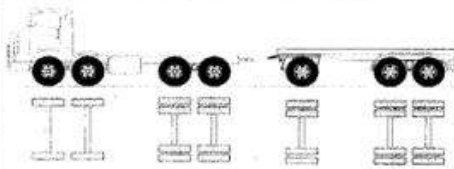
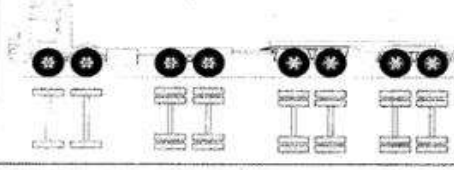
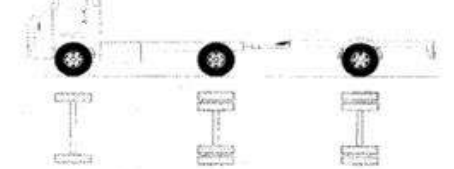
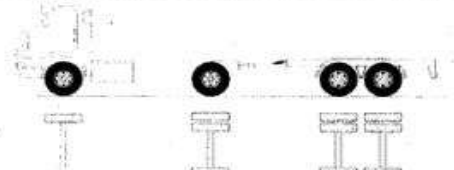
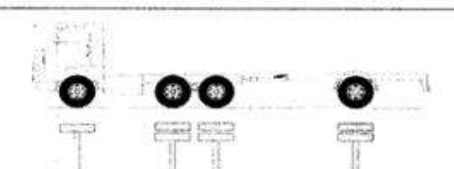
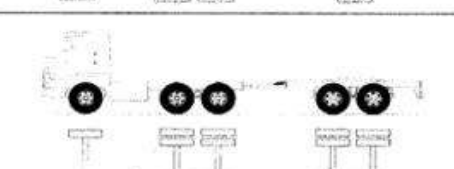
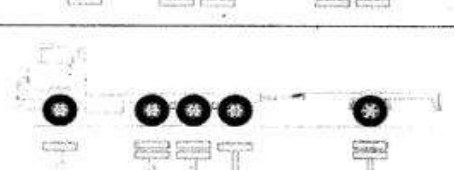
Fuente: Reglamento nacional de vehículos Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2003, pág. 92)

Configuración vehicular	Descripción gráfica de los vehículos	Long. Máx. (m)	Eje Delant	Peso máximo ( t )				Peso bruto máx. ( t )
				Conjunto de ejes posteriores				
				1º	2º	3º	4º	
C2R3		23,00	7	11	11	18	—	47
C3R2		23,00	7	18	11	11	—	47
C3R3		23,00	7	18	11	18	—	48 <sup>(2)</sup>
C3R4		23,00	7	18	18	18	—	48 <sup>(2)</sup>
C4R2		23,00	7	23 <sup>(1)</sup>	11	11	—	48 <sup>(2)</sup>
C4R3		23,00	7	23 <sup>(1)</sup>	11	18	—	48 <sup>(2)</sup>
8x4R2		23,00	7+7 <sup>(2)</sup>	18	11	11	—	48 <sup>(2)</sup>

**Figura 25.** *Peso y medidas máximas permitidas parte 03*

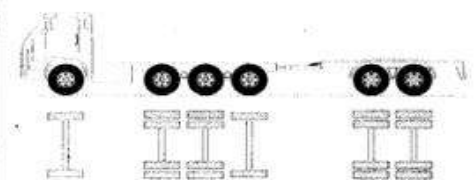
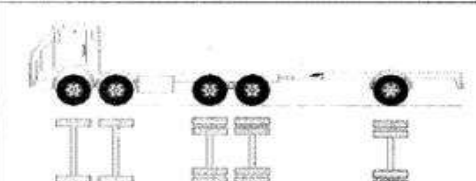
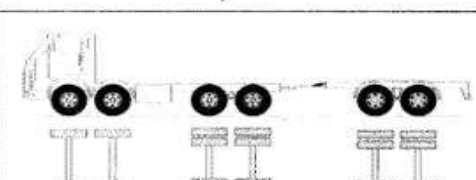
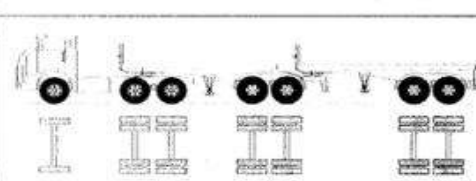
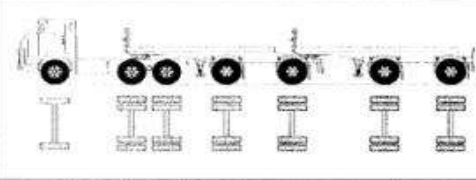
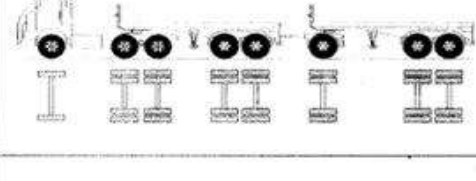
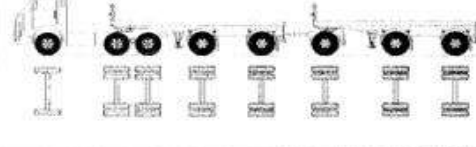
Fuente: Reglamento nacional de vehículos Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2003, pág. 93)



Configuración vehicular	Descripción gráfica de los vehículos	Long. Máx. (m)	Peso máximo (t)				Peso bruto máx. (t)	
			Eje Delant	Conjunto de ejes posteriores				
				1ª	2ª	3ª		4ª
8x4R3		23,00	7+7 <sup>02</sup>	18	11	18	—	48 <sup>02</sup>
8x4R4		23,00	7+7 <sup>02</sup>	18	18	18	—	48 <sup>02</sup>
C2RB1		20,50	7	11	11	—	—	29
C2RB2		20,50	7	11	18	—	—	36
C3RB1		20,50	7	18	11	—	—	36
C3RB2		20,50	7	18	18	—	—	43
C4RB1		20,50	7	23 <sup>02</sup>	11	—	—	41

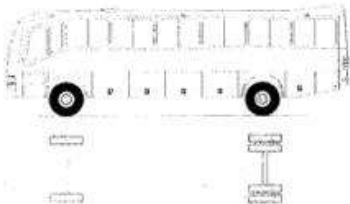
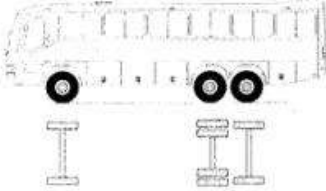
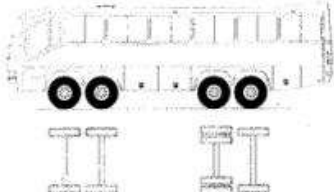
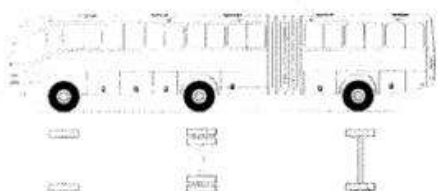
**Figura 26.** *Peso y medias máximas permitidas parte 04*

Fuente: Reglamento nacional de vehículos Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2003, pág. 94)



Configuración vehicular	Descripción gráfica de los vehículos	Long. Máx. (m)	Eje Delant	Peso máximo (t)				Peso bruto máx. (t)
				Conjunto de ejes posteriores				
				1º	2º	3º	4º	
C4RB2		20,50	7	23 <sup>(1)</sup>	18	—	—	48
8x4 RB1		20,50	7+7 <sup>(2)</sup>	18	11	—	—	43
8x4 RB2		20,50	7+7 <sup>(2)</sup>	18	18	—	—	48 <sup>(2)</sup>
T3S2 S2		23,00	7	18	18	18	—	48 <sup>(2)</sup>
T3Se2 Se2		23,00	7	18	11 + 11 <sup>(2)</sup>	11 + 11 <sup>(2)</sup>	—	48 <sup>(2)</sup>
T3S2 S1S2		23,00	7	18	18	11	18	48 <sup>(2)</sup>
T3Se2 S1Se2		23,00	7	18	11 + 11 <sup>(2)</sup>	11	11 + 11 <sup>(2)</sup>	48 <sup>(2)</sup>

**Figura 27.** *Peso y medidas máximas permitidas parte 05*

Fuente: Reglamento nacional de vehículos Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2003, pág. 95)

Configuración vehicular	Descripción gráfica de los vehículos	Long. Máx. (m)	Eje Delant	Peso máximo ( t )				Peso bruto máx. ( t )
				Conjunto de ejes posteriores				
				1º	2º	3º	4º	
B2		13,20	7	11	—	—	—	18
B3-1		14,00	7	16	—	—	—	23
B4-1		15,00	7+7 <sup>(B)</sup>	16	—	—	—	30
BA-1		18,30	7	11	7	—	—	25

Conjunto de eje(s)	Nomenclatura	Simbología	Nº de Neumáticos	GRÁFICO	Peso máximo por eje(s) ( t )
Simple	1RS		02		7

**Figura 28.** *Peso y medidas máximas permitidas parte 07*

Fuente: Reglamento nacional de vehículos Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2003, pág. 96)

## **b. Serviciabilidad**

De acuerdo con las directrices de diseño establecidas por Association of State Highway and Transportation Officials [AASHTO], (1993), el cálculo del porcentaje de pérdida de serviciabilidad ( $\Delta PSI \backslash \Delta PSI$ ) puede ser estimado en función de los niveles de tráfico y las cargas de ejes a las que se somete el pavimento. Se ha observado que la capacidad de carga del pavimento aumenta proporcionalmente al PSI inicial, lo que prolonga el tiempo antes de que comiencen a manifestarse fallas significativas.

Investigaciones recientes, como las realizadas por Smith et al. (2020), han subrayado la importancia de incorporar factores adicionales en la evaluación de la serviciabilidad del pavimento. Elementos como las condiciones climáticas y la composición del suelo pueden tener un impacto considerable en la velocidad y la magnitud de la degradación del pavimento. Por lo tanto, estos factores deben ser cuidadosamente analizados durante el diseño y el mantenimiento de las carreteras para garantizar un desempeño óptimo.

La capacidad de un pavimento para proporcionar un manejo seguro y confortable a los usuarios en un momento específico se denomina servicio. En las primeras etapas de desarrollo del índice de servicio (ppp), se recabaron opiniones de los conductores para evaluar la calidad percibida de las carreteras. Posteriormente, este índice fue refinado con base en calificaciones específicas relacionadas con el desempeño de la vía.

AASHTO llevó a cabo pruebas donde se evaluó la percepción de la serviciabilidad en transportistas, considerando el tipo de pavimento en el que operaban. Estas evaluaciones ayudaron a establecer una relación entre las características del pavimento y la experiencia de los usuarios, contribuyendo al

desarrollo de metodologías más precisas para el diseño y mantenimiento de las infraestructuras viales.

**Tabla 9**

*Índice de serviciabilidad según calificación*

Índice de Servicialidad	Calificación
0 - 1	Muy mala
1 - 2	Mala
2 - 3	Regular
3 - 4	Buena
4 - 5	Muy buena

Fuente: American Association of State Highway and Transportation Officials (1993)

**Tabla 10**

*Índice de serviciabilidad inicial y final recomendado*

INDICE DE SERVICIABILIDAD INICIAL	INDICE DE SERVICIABILIDAD FINAL
Po = 4.5 para pavimentos rígidos	Pt = 2.5 o más para caminos muy importantes
Po = 4.2 para pavimentos flexibles	Pt = 2.0 para caminos de tránsito menor

Fuente: American Association of State Highway and Transportation Officials (1993)

### **c. Índice de servicio inicial**

El Índice de Servicio Inicial (PSI inicial) se define como el nivel de servicio que ofrece un pavimento recién construido o rehabilitado. Este índice representa la condición óptima del pavimento en términos de calidad, funcionalidad y comodidad para los usuarios al momento de su puesta en operación.

Para pavimentos rígidos, la AASHTO establece un valor típico recomendado de 4.5 en la escala del PSI, indicando que el pavimento cumple con los estándares más altos de desempeño esperados. Este valor refleja no solo la uniformidad de la superficie y su capacidad de carga, sino también la experiencia

de manejo segura y confortable que se busca ofrecer a los usuarios desde el inicio de su vida útil.

#### **d. Índice de servicio final**

El Índice de Servicio Final (PSI final) representa el nivel más bajo de servicio aceptable que puede ofrecer un pavimento antes de que sea necesario realizar intervenciones de mantenimiento o rehabilitación. Este valor varía en función del tipo de vía y su uso previsto. Para calles residenciales, el PSI final recomendado es de 2.0, mientras que para vías colectoras y autopistas, el rango habitual se sitúa entre 2.5 y 3.0. Estos valores establecen el umbral crítico que garantiza la funcionalidad, seguridad y comodidad de la vía para los usuarios.

Estudios recientes, como los realizados por García et al. (2021), han señalado la relevancia de incluir factores adicionales en la determinación tanto del Índice de Servicio Inicial como del Índice de Servicio Final. Entre estos factores se encuentran la calidad y durabilidad de los materiales empleados en la construcción del pavimento, así como las condiciones climáticas específicas del área. Considerar estas variables permite un diseño más adaptado a las exigencias locales, prolongando la vida útil del pavimento y reduciendo la necesidad de intervenciones frecuentes.

#### **e. Pérdida o disminución del índice de serviciabilidad**

Los datos previamente mencionados permiten calcular la disminución en el índice de servicio ( $\Delta$ PSI), reflejando el deterioro progresivo en la calidad de las vías debido al desgaste acumulado y los daños en el pavimento. Este cálculo es fundamental para evaluar el desempeño del pavimento a lo largo de su vida útil y determinar el momento adecuado para realizar intervenciones.

La relación se expresa como:

$$\Delta PSI = PO - [PT]$$

Donde:

- PSII: Índice de servicio presente, que evalúa el estado actual del pavimento.
- $\Delta$ PSII: Diferencia entre el índice de servicio inicial y el índice de servicio final deseado, indicando el deterioro acumulado.
- PO: Índice de servicio inicial, correspondiente a la condición del pavimento recién construido o rehabilitado.
- PTT: Índice de servicio final, que representa el nivel mínimo aceptable de servicio antes de requerir mantenimiento o rehabilitación.
- Este análisis es esencial para planificar estrategias de mantenimiento preventivo y garantizar que la infraestructura vial cumpla con los estándares de calidad y seguridad establecidos.

#### **f. Confiabilidad**

La confiabilidad en el diseño de pavimentos se refiere a la probabilidad de que la estructura diseñada cumpla con su vida útil proyectada dentro del período de análisis establecido. Este concepto asegura que el pavimento funcione de manera adecuada bajo las condiciones de carga y tráfico esperadas. En el diseño, se define un nivel específico de confiabilidad (RRR) que busca garantizar la durabilidad de las secciones del pavimento, considerando las variaciones inherentes al modelo AASHTO y los posibles cambios en las condiciones de tráfico durante su vida útil.

Este parámetro es crucial, ya que tiene una relación directamente proporcional con el espesor de la losa del pavimento. Es decir, a medida que se selecciona un nivel más alto de confiabilidad, el espesor requerido del pavimento aumenta para soportar las cargas previstas y mantener un desempeño óptimo. Este enfoque asegura que el pavimento sea capaz de resistir las tensiones y el desgaste acumulado, cumpliendo con los estándares de calidad y funcionalidad establecidos a lo largo de su vida útil diseñada.

**Tabla 11**

*Niveles de confiabilidad según la clasificación funcional del camino*

Clasificación funcional	NIVELES DE CONFIABILIDAD R	
	Urbanas	Rurales
Autopista interestatal	85 - 99.9	80 - 99.9
Arterias principales	80 - 99	75 - 95
Colectoras de tránsito	80 - 95	76 - 95
Carreteras locales	50 - 80	50 - 80

Fuente: American Association of State Highway and Transportation Officials (1993)



**Tabla 12***Desviación estándar normal relacionado a la confiabilidad*

CONFIABILIDAD R (%)	(ZR )
50	0
60	-0.253
70	-0.524
75	-0.647
80	-0.841
85	-1.037
90	-1.282
91	-1.34
92	-1.405
93	-1.476
94	-1.555
95	-1.645
96	-1.751
97	-1.881
98	-2.054

Fuente: American Association of State Highway and Transportation Officials (1993)

**g. Desviación estándar del sistema (so)**

La desviación estándar del sistema (SoS\_oSo ) fue definida por AASHTO en 1993 como un parámetro que debe adaptarse a las condiciones locales para reflejar con precisión las variaciones inherentes al diseño y desempeño de los pavimentos en una región específica. Aunque estos valores pueden ajustarse según la experiencia y los datos disponibles a nivel local, AASHTO también proporcionó valores recomendados que se derivan de sus investigaciones y estudios previos.

Estos valores estándar sirven como guía para su aplicación general en situaciones donde no se dispone de datos locales detallados, permitiendo una

aproximación confiable en el diseño y análisis de pavimentos. No obstante, se sugiere que, siempre que sea posible, los valores de  $SoS_o$  sean recalibrados para alinearse con las condiciones reales del entorno donde se construirá el pavimento, garantizando así un diseño más preciso y adaptado a las necesidades específicas.

**Tabla 13**

*Valores recomendados para la desviación estándar ( $So$ )*

TIPO	( $So$ )
Pavimentos Rígidos	0.30 - 0.40
Construcción Nueva	0.35
En Sobre Capas	0.40

Fuente: American Association of State Highway and Transportation Officials (1993)

#### **h. Módulo k de la subrasante**

El módulo k de la subrasante es un parámetro esencial para evaluar las características mecánicas de este estrato en una estructura vial. Conocido como el módulo de reacción de la subrasante, este valor ofrece una estimación indirecta de la rigidez del suelo cuando se somete a una carga monotónica.

Para determinar k, se utilizó un procedimiento estándar que implica colocar una placa rígida de 30 cm de diámetro sobre la superficie del suelo. Durante este proceso, se aplica una fuerza controlada y se registra el desplazamiento resultante de la placa.

El módulo k se calcula como la relación entre el esfuerzo aplicado y la deformación registrada, bajo una carga unitaria que genera un desplazamiento de 5 mm, conforme a las especificaciones establecidas por AASHTO (1993).

Además, se ha recomendado el uso de tecnologías modernas, como dispositivos de medición láser y análisis de imágenes, para mejorar tanto la precisión como la eficiencia en la medición de este parámetro. Estas herramientas avanzadas permiten obtener datos más detallados y reducir posibles errores en el cálculo, tal como destacan Rodríguez et al. (2023). Este enfoque contribuye a un diseño más confiable y adaptado a las necesidades de cada proyecto vial.

$$k = 2.55 + 52.5 \times \log(CBR) \quad CBR \leq 10\%$$

$$k = 46 + 9.08 \times \log(CBR)^{4.34} \quad CBR > 10\%$$

### **i. Concreto**

La determinación de los parámetros mecánicos de la losa de concreto, como el módulo elástico y el módulo de rotura, es un aspecto clave para entender cómo el concreto responde ante las cargas aplicadas y su capacidad para resistir deformaciones y agrietamientos. Estos parámetros suelen evaluarse a los 28 días de curado, ya que este período permite que el material alcance su resistencia máxima, según lo indicado por AASHTO (1993). La precisión en la medición de estos valores proporciona información crucial para el diseño y análisis de pavimentos de concreto, asegurando tanto su durabilidad como su rendimiento a lo largo de su vida útil.

#### **- Módulo de elasticidad**

El módulo de elasticidad es un indicador fundamental de la rigidez del concreto y su capacidad para distribuir las cargas aplicadas. Este parámetro mide la relación entre la tensión aplicada y la deformación generada, siendo un factor clave para evaluar las deflexiones, curvaturas y tensiones que el concreto puede experimentar.

En pavimentos de concreto armado continuo, el módulo de elasticidad, junto con el coeficiente de expansión térmica y el de contracción, juega un papel esencial en la regulación de las tensiones dentro de la armadura estructural (AASHTO, 1993).

Para concretos de peso normal, el Instituto del Concreto Americano considera que el módulo de elasticidad es un parámetro crítico en el diseño y la evaluación de pavimentos. Su determinación precisa es indispensable para garantizar que la estructura del pavimento sea capaz de soportar las cargas previstas y proporcionar un desempeño estructural adecuado, minimizando deformaciones y fallas prematuras.

-

$$E = 57000(f'c)^{0.5}$$

Donde:

$f'c$  = Resistencia a la compresión del concreto en PSI

- El módulo de rotura, también denominado resistencia a la tracción por flexión del concreto, es un factor clave en el diseño de pavimentos rígidos. Este parámetro es fundamental para mitigar el agrietamiento por fatiga provocado por las cargas repetitivas de vehículos pesados y ligeros (AASHTO, 1993).

La medición del módulo de rotura se realiza mediante la prueba de carga aplicada en los tercios de la muestra, un método que permite obtener un valor promedio después de 28 días de curado. Este período asegura una evaluación precisa de la resistencia del concreto a la tracción por flexión. Durante el

ensayo, se aplica un momento flector constante equivalente a PL/3 sobre una sección del pavimento, lo que simula condiciones reales de uso y evalúa la capacidad del material para resistir las cargas aplicadas.

Este método de ensayo es especialmente útil, ya que permite identificar posibles debilidades en el concreto que podrían dar lugar a agrietamientos en el pavimento. En contraste, el ensayo de carga en el punto medio, donde la rotura sería inevitablemente en dicho punto de aplicación de la carga, proporciona información limitada sobre la capacidad de resistencia a la tracción del concreto en condiciones más realistas de uso y carga.

La estimación a través de la resistencia a compresión del concreto:

$$S'c = 8 a 10 (f'c)^{0.5}$$

Donde:

f'c = Resistencia a la compresión del concreto en PSI

#### **j. Drenaje**

Según AASHTO (1993), la capacidad de drenaje de un pavimento se evalúa considerando dos factores principales: el tiempo que el sistema requiere para evacuar el agua acumulada en su superficie y el porcentaje de tiempo durante el cual el pavimento está expuesto a altos niveles de humedad. Este coeficiente alcanza su punto más alto de saturación en determinados periodos del año, dependiendo de las condiciones climáticas locales y la eficiencia del sistema de drenaje.

AASHTO clasifica la capacidad de drenaje en cinco categorías, que se detallan en una tabla específica. Estas categorías se establecen con base en el porcentaje de tiempo que el pavimento permanece saturado y están influenciadas

por factores como la precipitación media anual y las características particulares del sistema de drenaje en la región evaluada.

Esta clasificación permite optimizar la planificación de las medidas de diseño y mantenimiento, asegurando que el pavimento sea capaz de manejar eficazmente la acumulación de humedad. Al reducir la exposición prolongada a condiciones de saturación, se mejora la durabilidad y el desempeño del pavimento a lo largo de su vida útil, disminuyendo el riesgo de fallas relacionadas con el exceso de agua.

**Tabla 14**

*Calidad de drenaje para pavimento*

Calidad de drenaje	Remoción del agua
Excelente	2 horas
Bueno	1 día
Regular	1 semana
Pobre	1 mes
Muy pobre	nunca

Fuente: American Association of State Highway and Transportation Officials (1993)

**Tabla 15**

*Porcentaje del tiempo de exposición del pavimento*

Calidad de drenaje	% de tiempo de exposición de la estructura de pavimento nivel de humedad próxima a la saturación			
	< 1%	1 - 5%	5 - 25%	> 25%
Excelente	1.4 - 1.35	1.35 - 1.30	1.30 - 1.20	1.20
Buena	1.35 - 1.25	1.25 - 1.15	1.15 - 1.00	1.00
Aceptable	1.25 - 1.15	1.15 - 1.05	1.00 - 0.80	0.80
Pobre	1.15 - 1.05	1.05 - 0.80	0.80 - 0.60	0.60
Muy pobre	1.05 - 0.95	0.95 - 0.75	0.75 - 0.40	0.40

Fuente: American Association of State Highway and Transportation Officials (1993)

**a. Coeficiente de transferencia de carga**

De acuerdo con AASHTO (1993), la transferencia de carga en pavimentos se define como la capacidad de una losa para distribuir las fuerzas cortantes generadas por las cargas vehiculares hacia las losas adyacentes. Este mecanismo tiene como objetivo principal reducir las deformaciones y los esfuerzos concentrados en la estructura del pavimento, prolongando su vida útil y mejorando su desempeño general.

Un mayor nivel de transferencia de carga asegura un comportamiento más eficiente de la losa, minimizando problemas como fisuras y hundimientos localizados. Para evaluar este aspecto, se utiliza el coeficiente J, cuyos valores están establecidos en una tabla específica proporcionada por AASHTO. Este coeficiente permite cuantificar la efectividad de la transferencia de carga y analizar el rendimiento del sistema de hombros en el pavimento.

El análisis del coeficiente J es esencial en el diseño y mantenimiento de pavimentos, ya que garantiza una distribución uniforme de las cargas aplicadas, mejorando la estabilidad y durabilidad de la infraestructura vial.

**Tabla 16**

*Coeficiente de transmisión de carga (J)*

Tipo de Pavimento	Hombro			
	Elemento de transmisión de carga			
	Con. Asfáltico		Con. Hidráulico	
	SI	NO	SI	NO
No reforzado o reforzado con juntas	3.2	3.8 - 4.4	2.5 - 3.1	3.6 - 4.2
Reforzado continuo	2.9 - 3.2	----	2.3 - 2.9	----

Fuente: American Association of State Highway and Transportation Officials (1993)

**1.2.10. Concreto geopolímero**

El geopolímero es un novedoso material de construcción que puede ser un aglutinante alternativo al cemento Portland. Los materiales geopolímeros representan una tecnología innovadora que está suscitando un gran interés en la industria de la construcción, sobre todo a la luz del énfasis que se está poniendo en la sostenibilidad. Se basan en materiales naturales mínimamente procesados o en subproductos industriales para reducir significativamente su huella de carbono, al tiempo que son muy resistentes a los problemas de durabilidad que pueden afectar al hormigón convencional. Un material de partida rico en sílice y alúmina reacciona con líquidos alcalinos para producir hormigón geopolímero.

Los metales alcalinos solubles que se utilizan para fabricar los líquidos alcalinos suelen tener una base de sodio o potasio. Todos los materiales activados con álcali se crean haciendo reaccionar un material de aluminosilicato, que suele suministrarse en forma de polvo como subproducto industrial, con un activador alcalino, que suele presentarse en forma de solución acuosa concentrada de hidróxido alcalino, silicato, carbonato o sulfato. (Alengaram & Ramasamy, 2021)



**Figura 29.** *Proceso de obtención de cemento geopolímero*

### **1.2.10.1. Componentes del concreto geopolímero**



Los elementos fundamentales del concreto geopolímero comúnmente consisten en arcillas calcinadas y cenizas volantes, ya sea de origen natural o creado artificialmente. Los materiales naturales se generan a través de la cocción de minerales a altas temperaturas en el interior de los volcanes, expulsándose durante erupciones y emisiones volcánicas (Cong & Cheng, 2021). También se incluyen desechos naturales y materiales no utilizados en procesos industriales, sin haber experimentado cambios sustanciales.

#### **1.2.10.2. Cenizas volantes**

Las cenizas volantes es un polvo fino producto de la combustión del carbón y también un desecho sólido de las centrales eléctricas de carbón, se compone de óxidos de aluminio, hierro calcio silicio y magnesio y se clasifica en clase F y clase C (DASWELL, 2023). Este material al no tratarse generará polvo y de esta manera contaminará el medio ambiente, en caso contrario puede ser utilizado como recurso para el sector de la construcción, además tiene una apariencia similar al cemento y su color se encuentra entre el blanco lechoso y negro grisáceo.

##### ***1.2.10.2.1. Características de la ceniza volante***

La ceniza volante se categoriza como una puzolana artificial, similar a la puzolana natural, y contiene concentraciones considerables de óxido de silicio, óxido de aluminio y óxido de hierro, con rangos que oscilan entre el 30% y el 70%, el 10% y el 40%, y el 5% y el 20% de la masa, respectivamente. La cantidad de óxido de calcio puede ser notable dependiendo de la clase de ceniza volante, ya sea de tipo C o tipo F. También se encuentran otros componentes en proporciones menores que representan hasta un 5% de la masa total. En cuanto a sus propiedades físicas, la ceniza volante es un polvo extremadamente fino,

típicamente de color gris debido a la presencia de óxido de hierro. Su granulometría muestra partículas de tamaño inferior a 250 micrómetros, siendo el 90% de ellas menores a 75 micrómetros (Cong & Cheng, 2021). Aunque las partículas son predominantemente esféricas, su tamaño, generalmente inferior a 100 micrómetros, impide su observación a simple vista, requiriendo el uso de microscopios especializados para su visualización.

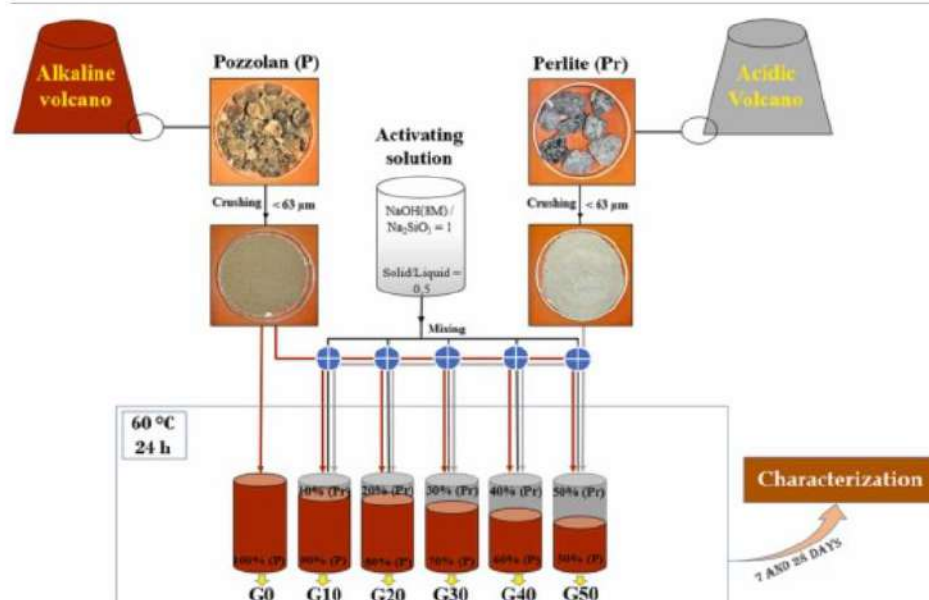
### **1.2.10.3. Propiedades del concreto geopolímero**

La industria del cemento contamina la atmósfera, mientras que los investigadores prefieren los geopolímeros debido a su limpieza única. Se puede decir que la aplicación de mortero geopolímero es la más estudiada. Y el concreto geopolímero es un desarrollo innovador y sostenible de materiales de ingeniería que, en comparación con el OPC, tiene muchas ventajas (Cong & Cheng, 2021). En este artículo se desarrollará el rendimiento de la mezcla, en estado fresco y endurecido, por ejemplo, ensayo de cono de Abrams, ensayos de resistencia a la compresión y flexión.

### **1.2.10.4. Preparación de geopolímeros**

El método de síntesis de cementos geopolímeros en este estudio se esquematiza en la Fig. 33 los compuestos geopolímeros a base de puzolana (P) y perlita (Pr) se sintetizan incorporando diversos porcentajes de perlita desde el 10% al 50% en la puzolana. Los dos precursores se trituraron usando un molino de bolas y se tamizaron hasta un tamaño de partícula inferior a 63  $\mu\text{m}$ , luego se prepararon 6 lotes de la mezcla seca reemplazando la puzolana con contenidos crecientes de perlita (0%, 10%, 20%, 30%, 40% y 50%). La solución activadora consistió en NaOH [8 M] y Na<sub>2</sub> SiO<sub>3</sub>: NaOH de 1, se añadió a cada lote con una

relación líquido/sólido igual a 0,5 y se homogeneizó durante 10 min en una mezcladora Hobart. Posteriormente, las mezclas se vertieron en moldes cilíndricos de plástico (CPVC; 20 mm de diámetro y 40 mm de altura) y se vibraron para eliminar las burbujas de aire insertadas en las mezclas. Los moldes llenos se curan térmicamente a una temperatura de 60 °C durante 24 h. Después de 24 h de curado, las muestras fueron retiradas de los moldes y empaquetadas en bolsas de plástico selladas hasta la edad de prueba.



**Figura 30.** Preparación de geopolímeros

### 1.3. Definición de Términos Básicos

#### 1.3.1. Concreto

El concreto es una combinación de cemento Portland, agregados finos, agregados gruesos y agua, a la que se pueden añadir aditivos dependiendo de los requerimientos específicos del proyecto. Al endurecer, esta mezcla se transforma en uno de los materiales de construcción más resistentes, ampliamente utilizado en la edificación de elementos estructurales como cimientos, columnas, vigas y losas (SENCICO, 2020).

#### 1.3.2. Control de calidad

El control de calidad del hormigón en obra es un proceso crucial para garantizar que el material cumpla con las especificaciones requeridas. Si estos procedimientos no se realizan de manera adecuada, siguiendo los estándares rigurosos establecidos en la normativa vigente, es probable que el hormigón presente deficiencias en su calidad, lo que podría derivar en decisiones incorrectas durante el proceso constructivo (Castillo-Mena, 2019).

### **1.3.3. Pavimento asfáltico**

El pavimento asfáltico se compone esencialmente de una carpeta asfáltica que trabaja en conjunto con otras capas estructurales, como la base, la subbase y la subrasante, las cuales proporcionan soporte y estabilidad al sistema vial (Pérez & Ramirez, 2018).

### **1.3.4. Juntas en pavimentos asfálticos bituminosos**

Las costuras son una parte importante del pavimento ya que son superficies de falla previamente controladas y diseñadas para lograr un efecto estéticamente funcional. (González Morgado, 2018)

### **1.3.5. Curado**

El endurecimiento y la madurez del concreto elaborado con cemento hidráulico son procesos fundamentales que permiten al material alcanzar su resistencia y propiedades mecánicas óptimas, asegurando su desempeño estructural (American Concrete Institute, 2016).

### **1.3.6. Diseño de mezcla**

El diseño de la mezcla de concreto es un proceso basado en métodos empíricos, que implica preparar una mezcla inicial con proporciones calculadas mediante diferentes técnicas, ajustándolas posteriormente para cumplir con los requisitos específicos del proyecto (SENCICO, 2020).

### **1.3.7. Mantenimiento vial**

El mantenimiento vial comprende una serie de acciones orientadas a conservar en buen estado los componentes físicos de una vía, asegurando condiciones óptimas de comodidad, seguridad y eficiencia para el tránsito vehicular y peatonal (Euroinnova, 2020).

### **1.3.8. Whitetopping**

El Whitetopping es una forma de reparación de pavimentos diseñada para prolongar la vida útil de los pavimentos asfálticos envejecidos. (Larios León, 2021)

### **1.3.9. Geopolímero**

Material de construcción que puede ser un aglutinante alternativo al cemento Portland (Alengaram & Ramasamy, 2021)

## CAPÍTULO II

### HIPÓTESIS Y VARIABLES

#### 2.1. Hipótesis

La formulación de hipótesis se realizó siguiendo un proceso estructurado que permite establecer suposiciones claras y comprobables sobre fenómenos específicos.

##### **2.1.1. Hipótesis general**

**HG:** El concreto con geopolímero como alternativa sostenible en Thin Whitetopping influye positivamente en su aplicación al pavimento flexible tramo carretera Arequipa – Yura.

##### **2.1.2. Hipótesis específicas**

**H1:** El **diseño de Thin Whitetopping** del concreto con geopolímero, requiere de un espesor de capa de 12 cm con una resistencia  $f_c' = 300 \text{ kg/cm}^2$ .

**H2:** El **diseño de mezcla** demuestra que el reemplazo de 25% de cemento por geopolímero es el óptimo.

**H3:** La **trabajabilidad** del concreto con geopolímero, presenta un asentamiento entre 3" - 4".

**H4:** El concreto con geopolímero con porcentaje de reemplazo del 25% respecto al cemento presenta una mejor característica mecánica (**resistencia a la compresión, flexión y tracción**)

**H5:** El concreto con geopolímero para Thin Whitetopping presenta un 20% menor costo en un periodo de 20 años, respecto a una capa bituminosa convencional para la rehabilitación del pavimento flexible.

**H6:** El concreto con geopolímero, presenta un 25% de reducción del consumo de cemento respecto al concreto patrón.

## **2.2. Importancia de la investigación**

### ***2.2.1. Impacto potencial de la investigación***

La investigación sobre la aplicación de concreto con geopolímero en Whitetopping para la rehabilitación de pavimentos asfálticos bituminosos tiene un impacto potencial transformador en el ámbito de la infraestructura vial.

Whitetopping, que consiste en la superposición de una capa de concreto sobre pavimentos asfálticos existentes, se ve significativamente mejorado con el uso de geopolímeros debido a sus propiedades excepcionales de durabilidad y sostenibilidad. Este enfoque innovador no solo podría incrementar la resistencia y prolongar la vida útil de los pavimentos, sino también reducir considerablemente la huella de carbono en comparación con los métodos tradicionales. Al investigar las características y beneficios específicos del concreto con geopolímero en Whitetopping, esta investigación podría establecer nuevos estándares para prácticas de rehabilitación más eficientes y ecológicas, impulsando avances significativos en la gestión de infraestructuras y promoviendo un desarrollo urbano más sostenible.

#### **2.2.1.1. Impacto teórico**

El concreto con geopolímero y la tecnología Whitetopping tienen un impacto teórico significativo en la industria de la construcción, tanto desde una perspectiva técnica como ambiental. A continuación, se analiza su impacto teórico en varios aspectos clave.

- **Impacto Teórico del Concreto con Geopolímero**

El concreto con geopolímero representa una innovación notable en el campo de los materiales de construcción. Teóricamente, su uso puede reducir significativamente la huella de carbono de la industria del concreto. A diferencia



del concreto tradicional, el concreto con geopolímero reemplaza al cemento Portland con un alto porcentaje de materiales aluminosilicatos, como cenizas volantes y escoria de alto horno, que emiten considerablemente menos dióxido de carbono durante su producción (Van Deventer et al., 2022). Esto podría ayudar a mitigar el cambio climático al disminuir las emisiones globales de gases de efecto invernadero, alineándose con los objetivos internacionales de reducción de emisiones establecidos en acuerdos como el Acuerdo de París (Provis & Bernal, 2020).

Desde un punto de vista técnico, el concreto con geopolímero ofrece una mayor resistencia y durabilidad en comparación con el concreto convencional. Investigaciones han demostrado que su resistencia a altas temperaturas, productos químicos agresivos y desgaste mecánico es significativamente superior, lo que lo hace ideal para aplicaciones en entornos agresivos y exigentes, como plantas industriales, áreas de almacenamiento de residuos y zonas costeras (Zhang et al., 2023). Por ejemplo, en aplicaciones donde el concreto está expuesto a temperaturas extremas, el geopolímero no solo mantiene su integridad estructural, sino que también puede actuar como una barrera protectora, minimizando los daños y prolongando la vida útil de la infraestructura (Wang et al., 2021).

Además, su capacidad para utilizar subproductos industriales no solo reduce la cantidad de residuos que terminan en vertederos, sino que también promueve una economía circular. Al integrar estos materiales de desecho en su composición, el concreto geopolímero contribuye a la sostenibilidad al cerrar el ciclo de materiales y reducir la dependencia de recursos naturales no renovables (Provis et al., 2022). Este enfoque no solo es ambientalmente responsable, sino

que también puede resultar en una reducción de los costos de producción, haciendo que el concreto geopolímero sea una opción económicamente viable y atractiva para la industria de la construcción (Smith et al., 2021).

Teóricamente, el estudio del concreto con geopolímero también amplía el conocimiento en el campo de la ciencia de los materiales y la ingeniería civil. La investigación en este ámbito puede proporcionar nuevas perspectivas sobre la química y la física de los materiales cementantes, desafiando y superando las limitaciones de los materiales tradicionales. Al explorar las propiedades mecánicas, térmicas y químicas del concreto con geopolímero, los científicos e ingenieros pueden desarrollar modelos más precisos para predecir su comportamiento en diversas condiciones ambientales y de carga (Davidovits, 2021).

Además, el concreto con geopolímero tiene el potencial de revolucionar las prácticas de construcción, ofreciendo alternativas más sostenibles y duraderas que pueden adaptarse a las necesidades de infraestructuras modernas y futuras. La comprensión teórica de su comportamiento puede guiar el desarrollo de estándares y códigos de construcción que maximicen sus beneficios y aseguren su aplicación segura y eficiente en proyectos de infraestructura a gran escala (Van Deventer et al., 2022).

- **Impacto Teórico de la Tecnología Whitetopping**

La tecnología Whitetopping, que involucra la superposición de una capa de concreto sobre pavimentos de asfalto existentes, ha sido objeto de estudios que destacan su impacto teórico considerable en la prolongación de la vida útil de las carreteras y en la reducción de costos de mantenimiento (Al-Hadidy et al., 2021). Esta técnica ha demostrado mejorar la capacidad estructural del pavimento,

incrementando su resistencia a la deformación y al tráfico pesado, lo cual podría traducirse en una disminución notable en la frecuencia de reparaciones y en un ciclo de vida más prolongado del pavimento, generando ahorros económicos a largo plazo.

Desde una perspectiva ambiental, el uso de Whitetopping puede contribuir a la sostenibilidad al reutilizar la infraestructura existente, evitando así la demolición y reconstrucción completa (Provis & Bernal, 2020). Este enfoque se alinea con la conservación de recursos materiales y la reducción de emisiones asociadas con la fabricación y transporte de nuevos materiales. Además, la superficie de concreto del Whitetopping puede mejorar la reflectancia solar, disminuyendo el efecto de isla de calor urbano y contribuyendo a entornos urbanos más frescos y confortables (Van Deventer et al., 2022).

La aplicación teórica de la tecnología Whitetopping también puede tener implicaciones en la seguridad vial al proporcionar una superficie más duradera y resistente, lo que reduce los riesgos asociados con el mantenimiento y las reparaciones frecuentes de pavimentos deteriorados (Smith et al., 2021). Esto puede tener un impacto positivo en la reducción de accidentes y en la mejora de la experiencia de conducción para los usuarios de las carreteras.

- **Sinergia entre el Concreto con geopolímero y el Whitetopping**

Desde una perspectiva teórica, la combinación del concreto con geopolímero y la tecnología Whitetopping muestra un potencial significativo para amplificar los beneficios de ambos en términos de sostenibilidad, durabilidad y eficiencia en la pavimentación de carreteras.

El uso de concreto con geopolímero en Whitetopping aprovecharía las ventajas estructurales y ambientales de este material avanzado. El geopolímero,

al tener una mayor resistencia a condiciones adversas y una menor huella de carbono, podría mejorar la vida útil y la resistencia de los pavimentos rehabilitados (Smith et al., 2021). Además, la utilización de subproductos industriales en la producción de geopolímeros reduce la dependencia de recursos naturales no renovables, lo que encaja con los objetivos de sostenibilidad y responsabilidad ambiental en el sector de la construcción de carreteras (Provis & Bernal, 2020).

Al combinar el concreto con geopolímero con la tecnología Whitetopping, se crearía una solución de pavimentación altamente eficiente y ecológica. El Whitetopping, al ser una técnica de rehabilitación que utiliza concreto de alta resistencia en capas delgadas sobre pavimentos existentes, proporciona una solución rentable y duradera para mejorar la capacidad estructural de los pavimentos asfálticos bituminosos (Turner & Collins, 2013). Esta técnica, combinada con el concreto geopolímero, podría ofrecer una mayor durabilidad frente a cargas pesadas, abrasión y condiciones climáticas extremas, lo que resulta en una reducción significativa en los costos de mantenimiento y reparación a lo largo del tiempo (Van Deventer et al., 2022).

Además, esta sinergia entre el concreto geopolímero y el Whitetopping puede ser especialmente relevante en el contexto actual de desafíos de infraestructura y cambio climático. La necesidad de pavimentos más duraderos y resistentes, que reduzcan la generación de residuos y minimicen las emisiones de carbono, es fundamental para garantizar una infraestructura vial sostenible y adaptable a las condiciones futuras (Wang et al., 2021).

#### **2.2.1.2. Impacto práctico**

- **Impacto Práctico del Concreto Geopolímero**

En la práctica, el concreto geopolímero ha demostrado ser una alternativa viable al concreto tradicional en diversas aplicaciones. Su producción utiliza subproductos industriales como cenizas volantes y escoria de alto horno, lo que reduce la necesidad de materias primas vírgenes y disminuye los desechos industriales (Provis et al., 2022). Esta reutilización de materiales no solo es beneficiosa desde el punto de vista ambiental, sino que también puede resultar en costos de producción más bajos debido a la reducción en el consumo de recursos naturales y la gestión de residuos.

Además, el concreto geopolímero ha mostrado una mayor resistencia a condiciones adversas, incluyendo altas temperaturas, productos químicos agresivos y desgaste mecánico (Wang et al., 2021). Estas propiedades lo hacen especialmente adecuado para aplicaciones en entornos industriales y en infraestructuras sometidas a condiciones extremas. Por ejemplo, en la industria petroquímica y de procesamiento de minerales, donde los materiales están expuestos a ambientes altamente corrosivos, el concreto geopolímero ofrece una durabilidad superior en comparación con el concreto tradicional (Davidovits, 2021).

En términos de durabilidad, el concreto geopolímero posee una notable capacidad para resistir el ataque de sulfatos y cloruros, dos de los agentes más destructivos para las estructuras de concreto (Zhang et al., 2023). La presencia de estos agentes en el agua subterránea y el ambiente marino puede causar una degradación significativa del concreto convencional, mientras que el concreto geopolímero mantiene su integridad estructural y funcionalidad por períodos prolongados. Esta resistencia a la degradación química prolonga significativamente la vida útil de las estructuras construidas con este material,

reduciendo la necesidad de reparaciones y reemplazos frecuentes, lo que resulta en ahorros considerables en los costos de mantenimiento y operación a largo plazo (Smith et al., 2021).

Otro aspecto importante del concreto geopolímero es su menor huella de carbono. Al evitar la calcinación del clínker, proceso necesario para la producción del cemento Portland, se reduce sustancialmente la emisión de CO<sub>2</sub> asociada a su fabricación (Van Deventer et al., 2022). Esta característica convierte al concreto geopolímero en una opción preferible en proyectos que buscan cumplir con objetivos de sostenibilidad y reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

Por último, el concreto geopolímero también ha demostrado una excelente capacidad para la encapsulación de desechos peligrosos, convirtiéndose en una solución viable para la gestión de residuos tóxicos (Provis & Bernal, 2020). Esta capacidad amplía su aplicabilidad en industrias donde la gestión de desechos es un desafío constante, aportando a la seguridad ambiental y la salud pública.

- **Impacto Práctico de la Tecnología Whitetopping**

La tecnología Whitetopping ha sido implementada con éxito en numerosas carreteras y autopistas, demostrando ser una solución eficaz para la rehabilitación de pavimentos. La aplicación de una capa de concreto sobre pavimento de asfalto existente mejora la capacidad estructural y la resistencia al tráfico pesado, reduciendo la frecuencia de reparaciones necesarias. Esto se traduce como beneficio a los transportistas con menores interrupciones del tráfico, calidad en la transitabilidad y mejor rendimiento por parte de los vehículos ligeros o pesados.

El Whitetopping también ofrece ventajas ambientales al reutilizar la infraestructura existente, minimizando la necesidad de materiales nuevos y

disminuyendo las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas con su producción y transporte. En zonas urbanas, la superficie de concreto puede contribuir a reducir las temperaturas locales mediante la reflexión de la radiación solar, mitigando el efecto de isla de calor.

No obstante, la implementación práctica de Whitetopping puede enfrentar ciertos desafíos. Las condiciones del pavimento de asfalto existente deben ser adecuadas para recibir la nueva capa de concreto, lo que puede requerir evaluaciones y preparaciones adicionales. Además, los costos iniciales de aplicación pueden ser más altos en comparación con otras técnicas de rehabilitación de pavimentos, aunque estos costos se compensen con los ahorros a largo plazo.

- **Sinergia Práctica entre el Concreto Geopolímero y el Whitetopping**

La combinación práctica del concreto con geopolímero con la tecnología Whitetopping puede ofrecer soluciones innovadoras para la rehabilitación de pavimentos. Utilizar concreto con geopolímero en Whitetopping podría maximizar las ventajas ambientales al reducir aún más las emisiones de CO<sub>2</sub> y promover la reutilización de materiales. Además, la durabilidad y resistencia mejoradas del concreto con geopolímero pueden extender aún más la vida útil de los pavimentos rehabilitados, proporcionando una solución robusta y sostenible.

En la práctica, esta combinación también podría presentar algunos desafíos, como la necesidad de adaptar las técnicas de aplicación y los equipos para manejar las propiedades específicas del concreto con geopolímero. Sin embargo, con el desarrollo de normativas y estándares adecuados, así como con

la experiencia acumulada en proyectos pilotos, es posible superar estas barreras y aprovechar plenamente los beneficios de ambas tecnologías.

En resumen, el concreto con geopolímero y la tecnología Whitetopping nos ofrece mejoras tangibles en términos de durabilidad, sostenibilidad y eficiencia en la rehabilitación de infraestructuras viales. Con una implementación adecuada por parte de profesionales y entidades públicas, pueden transformar la industria de la construcción y contribuir a un futuro más sostenible.

### **2.3. Variables y definición operacional**

En la presente investigación, se identificarán de manera clara las variables independientes y dependientes pertinentes para la investigación. La comprensión y manipulación adecuadas de estas variables son importantes para el diseño y desarrollo de la investigación, lo que permite una evaluación precisa y significativa de las relaciones y fenómenos investigados.

#### ***2.3.1. Definición conceptual***

**Variable Independiente:** Concreto con geopolímero

El concreto con geopolímero es un material avanzado y sostenible producido por la activación alcalina de materiales silíceos y aluminosos. Ofrece alta resistencia mecánica y química, durabilidad, y menor emisión de CO<sub>2</sub> en comparación con el concreto tradicional.

**Variable Dependiente:** Rehabilitación de pavimento flexible

La rehabilitación de pavimentos flexibles se refiere a las actividades y procesos diseñados para restaurar tanto la capacidad estructural como funcional de un pavimento flexible deteriorado. Este proceso implica evaluar el estado del pavimento, identificar los problemas existentes y aplicar soluciones como el fresado, reciclaje de materiales y la instalación de nuevas capas de asfalto.



### **2.3.2. Definición operacional**

La variable independiente "concreto con geopolímero" se define operativamente como la cantidad y calidad del concreto formulado a partir de materiales geopolímeros, utilizados en la mezcla y aplicación durante la rehabilitación del pavimento flexible (Davidovits, 2021). Esta variable se manipula al variar la proporción de geopolímero (cenizas volantes) y se mide a través de propiedades físicas, como la trabajabilidad; y mecánicas, la resistencia a la compresión, tracción simple y flexión del concreto con geopolímero.

En cuanto a la variable dependiente "rehabilitación de pavimento flexible", se define operativamente como el grado de mejora en las condiciones estructurales y funcionales del pavimento flexible tras la aplicación del concreto con geopolímero (Al-Hadidy et al., 2021). Esta variable se evalúa mediante técnicas de evaluación de pavimentos que incluyen la medición de la resistencia, la durabilidad y la vida útil del pavimento flexible después de la intervención con concreto con geopolímero.

### **2.4. Operacionalización de variables**

Esta operacionalización precisa es fundamental para la validez y la confiabilidad de los datos recolectados, lo que permite realizar análisis estadísticos y obtener conclusiones sólidas sobre las relaciones entre las variables investigadas.

**Tabla 17**

*Operacionalización de variables*

Variables	Dimensión	Indicador	Escala
V.I: Concreto Geopolímero	Diseño Whitetopping	- Método PCI - Guía AASTHO 93	Numérica (Cuantitativa)
	Propiedades Físicas	- Trabajabilidad	Numérica (Cuantitativa)
	Propiedades mecánicas	- Resistencia a la compresión - Resistencia a la flexión	Numérica (Cuantitativa)
	Diseño de mezcla	- Método ACI - Porcentaje Geopolímero	Numérica (Cuantitativa)
	Parámetros de Sostenibilidad económica	- Comparación de costos	Numérica
	Parámetros de Sostenibilidad ambiental	- Índice de cemento - Emisión de CO2	(Cuantitativa)
V.D: Pavimento Flexible	Análisis de la superficie	- Análisis visual	Numérica (Cuantitativa)
	Selección de metodología	- Superposición - Whitetopping - Reconstrucción	Numérica (Cuantitativa)
	Diseño y planificación	- Especificaciones técnicas - Presupuesto - Materia prima	Numérica (Cuantitativa)
	Control de calidad	- Ensayos de laboratorio	Numérica (Cuantitativa)
	Monitoreo	- Seguimiento visual	Numérica
			(Cuantitativa)

## CAPÍTULO III

### METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

#### 3.1. Diseño metodológico

##### 3.1.1. Enfoque de la investigación

El proyecto presentado cuenta con un enfoque cuantitativo porque al reemplazar cierto porcentaje de geopolímero por cemento en la mezcla de concreto, se tiene una secuencia la cual no es posible alterar, además de que la aplicación de dicho procedimiento estará enfocada en una futura implementación en campo.

Este enfoque se justifica debido a que se requiere medir y analizar datos numéricos precisos para evaluar el desempeño del concreto con geopolímero en comparación con el concreto convencional en aplicaciones de Whitetopping. Las actividades incluyen la evaluación de la trabajabilidad, resistencia a la compresión y flexión del concreto a través de pruebas de laboratorio controladas.

Así mismo al determinar este enfoque se tiene una aplicación de forma presencial, ya que para obtener y procesar datos se tuvo que incurrir a visitas de campo y laboratorio. Dichas características se pueden observar en la figura 35.



**Figura 31.** Características para un enfoque cuantitativo

### **3.1.2 Tipo de la investigación**

De acuerdo con el tipo de investigación este proyecto tiene una tipología experimental ya que se realizará una explicación de causa y efecto, principalmente al evaluar el efecto que tendrá el concreto con geopolímero en la rehabilitación del pavimento flexible.

La investigación planteada es de carácter aplicado ya que se cuenta con antecedentes de investigación, de los cuales se extraen conceptos teóricos, así como también resultados de aplicaciones prácticas similares. Por otro lado, el objeto de estudio es el concreto con geopolímero aplicado a la rehabilitación del pavimento flexible. Todo ello para brindar una rehabilitación duradera y sostenible al pavimento.

El carácter aplicado se justifica por el objetivo de implementar soluciones prácticas basadas en hallazgos teóricos y experimentales previos, mejorando la sostenibilidad y durabilidad del pavimento.

### **3.1.3 Nivel de la investigación**

El nivel de esta investigación es explicativo, lo que implica que se orienta a profundizar en el entendimiento de las relaciones de causa y efecto entre el uso de concreto con geopolímero y la reparación de pavimentos flexibles mediante la técnica de Thin Whitetopping. Este tipo de estudio busca no solo describir las características del concreto con geopolímero, sino también explicar cómo sus propiedades físicas, mecánicas y ambientales influyen en la eficiencia y sostenibilidad del proceso de rehabilitación de pavimentos.

Se realizará un análisis completo de la propiedad física del concreto con geopolímero, específicamente su asentamiento, lo cual permitirá entender su trabajabilidad y comportamiento en obra. Además, se estudiarán las propiedades

mecánicas del material, tales como la resistencia a la compresión, la flexión y la tracción simple, factores clave que determinarán la capacidad del concreto para soportar las cargas y tensiones a las que estará sometido en un entorno vial.

El estudio también incluirá un análisis ambiental, comparando la huella ecológica del concreto con geopolímero frente al concreto portland, evaluando aspectos como la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> y la sostenibilidad en el uso de recursos. Asimismo, se llevará a cabo un análisis económico, donde se analizarán los costos asociados a la implementación del concreto con geopolímero, tanto en términos de inversión inicial como de los posibles ahorros a largo plazo debido a su durabilidad y menor necesidad de mantenimiento.

El nivel explicativo de esta investigación permitirá no solo describir estas propiedades, sino también explorar cómo interactúan y contribuyen al desempeño general del pavimento, ofreciendo una visión integral que pueda servir de base para futuras aplicaciones y estudios en el campo de la ingeniería civil.

#### ***3.1.4 Diseño de la investigación***

De acuerdo con el diseño de investigación este proyecto tiene una tipología experimental ya que se realizará una explicación de causa y efecto, principalmente al evaluar el efecto que tendrá el concreto con geopolímero en la rehabilitación del pavimento flexible. Por otro lado, al formular un proyecto experimental se hace uso de simulaciones, así como experimentos, los cuales serán ensayos de laboratorio. Dichos ensayos permitirán realizar un diseño de mezclas adecuado, además permitirán evaluar resistencias requeridas para un correcto funcionamiento del Whitetopping. Además de que se establecerán criterios y razones por los cuales se podrían dar los resultados futuros.

Se realizarán ensayos controlados para evaluar la trabajabilidad (usando el cono de Abrams), resistencia a la compresión y otros parámetros del concreto con diferentes porcentajes de geopolímero. Los criterios de evaluación y los métodos de ensayo se basarán en normas técnicas establecidas (NTP, ASTM)

### **3.2. Población y muestra**

#### **3.2.1. Población**

La población de la investigación está compuesta por la mezcla de concreto del diseño patrón y tres porcentajes de reemplazo del geopolímero respecto al cemento.

Se establece el criterio mencionado porque la investigación trata de explicar la influencia del concreto con geopolímero en la reparación de pavimentos asfálticos bituminosos, por lo tanto, la variable que sufre modificaciones es la primera.

##### **3.2.1.1. Concreto Patrón.**

Se denomina concreto patrón al diseño de mezcla de un concreto convencional que estará diseñado en base a materiales de uso común, tales como cemento, arena, piedra chancada y agua, la dosificación de cada uno de estos dependerá de la resistencia a la compresión que se quiera alcanzar, así como el tipo de proyecto.

Para conocer la resistencia del diseño, se realizará primeramente un estudio de tráfico, para seguidamente establecer un espesor de losa que tendrá una relación directamente proporcional con la resistencia a la compresión requerida para ese tramo de carretera.

Este diseño patrón se realizará para tener cantidades exactas para un diseño de mezclas, principalmente para conocer la cuantía de cemento necesario para determinada resistencia.

### **3.2.1.2. Concreto con geopolímero.**

Como se sabe el geopolímero es un material cementicio, elaborado a base de materiales tales como cenizas volantes, el cual reacciona a raíz de la combinación de hidróxido y silicato de sodio en distintas proporciones. Este geopolímero según las investigaciones revisadas tiene la función similar a la de un cemento portland convencional. En la presente investigación se tomará ciertos porcentajes de cemento (20, 25 y 30%) del diseño de mezcla, los cuales serán reemplazados con geopolímero, de tal forma que se tendrá una mezcla de cemento, geopolímero, arena, piedra chancada y agua, la cual se denominará concreto con geopolímero y que será analizada para determinar la influencia en la metodología Whitetopping.

De esta forma la población del estudio está constituida por todas las posibles mezclas de concreto que pueden realizarse reemplazando diferentes porcentajes de cemento por geopolímero. Las probetas serán cilindros de 6" x 12" y las mezclas incluirán un diseño patrón y tres variantes con 20%, 25% y 30% de reemplazo de geopolímero.

### **3.2.2. Muestra**

#### **Muestra no probabilística.**

Una muestra no probabilística se define como un subconjunto de una población en la que los elementos se seleccionan sin recurrir a métodos basados en la probabilidad. En este tipo de muestra, no todos los miembros de la población tienen la misma oportunidad de ser incluidos, ya que la selección se

basa en criterios subjetivos o en la conveniencia del investigador. Las muestras no probabilísticas son comúnmente utilizadas cuando se desea realizar estudios exploratorios, obtener información rápida y económica, o cuando la investigación se enfoca en casos específicos y no en la generalización a toda la población. (Babbie, 2020)

Por lo tanto, la muestra utilizada en esta investigación es no probabilística y se define según el criterio de los investigadores y las directrices de la norma E.060 sobre Concreto Armado. Esta norma especifica que una prueba de resistencia se determina como el promedio de las resistencias medidas en dos probetas cilíndricas con un diámetro de 6 pulgadas y una altura de 12 pulgadas (150 mm por 300 mm), o en tres probetas cilíndricas con un diámetro de 4 pulgadas y una altura de 8 pulgadas (100 mm por 200 mm). Además, estas probetas deben ser moldeadas a partir de la misma muestra de concreto y sometidas a ensayo a los 28 días, o en el momento especificado para la determinación de la resistencia a compresión del concreto, conocida como  $f'c$ . (SENCICO, 2020).

Para definir el número exacto de probetas de concreto a ensayar, se establece que se ensayaran 4 tipos de concretos distintos: el primero será un concreto patrón que estará planteado en base a la resistencia requerida por la capa de concreto Whitetopping y los otros 3 que tendrán esa misma dosificación de materiales con la diferencia que se reemplazara geopolímero en cantidades de 20, 25 y 30% respecto al porcentaje de cemento, lo cual convertirá a la mezcla en concreto con geopolímero.



### **3.2.2.1. Prueba de trabajabilidad**

La Norma Técnica Peruana (NTP) 339.035:2009 especifica un método particular para medir el asentamiento del concreto de cemento Portland, aplicable tanto en laboratorio como en campo. Este método, conocido como el método del cono de Abrams, es esencial para evaluar la trabajabilidad del concreto fresco, ya que influye en su capacidad de ser colocado y compactado adecuadamente en el lugar de trabajo.

- **Propósito:** La norma estandariza el procedimiento para medir el asentamiento del concreto fresco, proporcionando una indicación de su consistencia, que está directamente relacionada con el contenido de agua en la mezcla. La consistencia del concreto es fundamental para su desempeño en términos de durabilidad, resistencia y apariencia final.
- **Aplicación:** Este método se aplica al concreto plástico de cemento hidráulico y es útil para verificar la uniformidad de diferentes lotes de concreto, asegurando que cumplen con las especificaciones de diseño establecidas. Es especialmente relevante en proyectos de construcción donde la homogeneidad del concreto es crucial para la integridad estructural y la longevidad de la obra.

#### **3.2.2.1.1. Procedimiento**

Preparación: el molde troncocónico se llena en tres capas aproximadamente iguales. Cada capa debe ser compactada con 25 golpes de una varilla de compactación de acero, con un diámetro de 16 mm (5/8 pulg.) y una longitud de 600 mm (24 pulg.), equipada con una punta hemisférica de 25 mm (1 pulg.) de diámetro. Por otro lado, la compactación debe hacerse distribuyendo los

golpes de manera uniforme sobre la superficie de cada capa, asegurando que la varilla penetre en la capa anterior para evitar la formación de vacíos.

Medición: una vez que el molde está lleno y compactado, se retira verticalmente de manera cuidadosa y continua en un lapso de 5 a 10 segundos, permitiendo que el concreto se asiente bajo su propio peso. Luego, La diferencia de altura entre el molde y el concreto asentado se mide utilizando una regla metálica. El valor de esta diferencia es el asentamiento, que se registra en milímetros o pulgadas

Equipos Necesarios: Se especifican los equipos, incluyendo el cono de Abrams, una varilla de compactación, una base no absorbente y una regla metálica donde realizar el ensayo.

#### **3.2.2.1.2. Cono de Abrams.**

Por lo tanto, para la prueba de trabajabilidad se ha considerado la elaboración de 4 ensayos de asentamiento del concreto, uno por cada tipo de mezcla, los cuales estarán desarrollados en base a lo establecido en la NTP 339.035:2009. En la Tabla 18 se detalla el número de unidades que también están expresadas en volumen de concreto.

**Tabla 18**

*Ensayo de trabajabilidad, unidades físicas y en volumen de concreto.*

Ensayos de laboratorio	Ensayo cono de Abrams	
Volumen del molde	0.005 m <sup>3</sup> /Und	
Descripción	Und	Vol. (m <sup>3</sup> )
Concreto patrón	1	0.0055
Concreto con 20% geopolímero	1	0.0055
Concreto con 25% geopolímero	1	0.0055
Concreto con 30% geopolímero	1	0.0055



**Figura 32.** *Cono de Abrahams para ensayo de trabajabilidad.*

### **3.2.2.1.3. Probetas de concreto – Norma ASTM C31**

Para realizar este procedimiento se hizo revisión de la Norma ASTM C31, en donde se expresa lo siguiente:

#### **a. Propósito:**

La norma tiene como objetivo estandarizar la preparación y curado de probetas cilíndricas de concreto para asegurar la uniformidad y reproducibilidad de los ensayos de resistencia. Este procedimiento es esencial para evaluar de manera precisa las propiedades mecánicas del concreto, como la resistencia a la compresión, en condiciones controladas.

#### **b. Equipos Necesarios:**

- Moldes: Los moldes deben ser de acero, hierro forjado, PVC u otro material no absorbente, y deben cumplir con las especificaciones dimensionales de la norma. Antes de usarlos, los moldes deben ser ligeramente cubiertos con

aceite mineral o un agente separador para facilitar la extracción de las probetas una vez endurecidas y evitar que el concreto se adhiera al molde.



**Figura 33.** *Moldes para probetas de concreto.*

- Varilla: hierro liso, con un diámetro de 5/8" y una longitud de 60 cm, con un extremo boleado para facilitar la compactación del concreto sin dañarlo.

- Mazo: mazo de goma con un peso entre 0.60 y 0.80 kg, empleado para golpear suavemente el molde y ayudar en la consolidación del concreto, eliminando posibles vacíos.

- Otros: badilejo, utilizado para manejar y distribuir el concreto dentro del molde; una plancha de metal, que proporciona una superficie rígida y plana para colocar los moldes durante el llenado y la compactación; y un depósito para la mezcla, como una carretilla de obra, que sirve para contener y mezclar el concreto antes de su colocación en los moldes.

**c. Procedimiento de Muestreo:**

1. Especímenes: Cilindros de concreto vaciado y fraguado en posición vertical, estándar de 6x12 pulgadas o 4x8 pulgadas para agregados  $\leq 2''$ .
2. Muestreo: Muestras obtenidas al azar sin considerar la calidad aparente del concreto. Se recomienda tomar una muestra por cada 120 m<sup>3</sup> de concreto producido o por cada 500 m<sup>2</sup> de superficie vertida, al menos una vez al día.
3. Preparación del Molde: Es crucial colocar el molde sobre una superficie rígida, horizontal y sin vibraciones para asegurar la integridad y precisión de los especímenes.
4. Colocación del Concreto: Depositar el concreto en el molde con cuidado, se distribuye en tres capas iguales, y se compacta por cada capa 25 penetraciones de la varilla, con la técnica de espiral.
5. Compactación y Acabado: Golpear los lados del molde con un mazo de goma con el fin de liberar burbujas de aire del interior. Enrasar el exceso de concreto y terminar la superficie superior con una llana metálica.
6. Identificación y Protección: Etiquetar los especímenes con información relevante y proteger la superficie descubierta con telas húmedas o películas plásticas.
7. Transporte y Almacenamiento: Transportar las probetas a su lugar de almacenamiento, donde permanecerán sin perturbaciones durante el curado inicial.
8. Condiciones de Curado Inicial: Mantener las probetas entre 20-26°C para concretos  $f'c > 422 \text{ kg/cm}^2$  y entre 16-27°C para  $f'c < 422 \text{ kg/cm}^2$ .

**d. Curado Inicial: NTP 339.034:2014 - Curado de Probetas de Concreto**

1. Condiciones Inmediatas después del Moldeo:

- Las probetas deben ser protegidas inmediatamente después del moldeo para prevenir la pérdida de humedad.

- Durante las primeras 24 horas, las probetas deben mantenerse en un ambiente controlado con una temperatura de  $20 \pm 5$  °C.

2. Protección contra la Pérdida de Humedad:

- Las probetas deben ser cubiertas con materiales húmedos o encerradas en cámaras húmedas.

- Pueden también ser envueltas en plástico o colocadas en contenedores herméticos.

**e. Curado Definitivo:**

1. Desmoldado:

- Las probetas deben ser desmoldadas entre 24 y 48 horas después del moldeo, asegurándose de que se han alcanzado las condiciones de rigidez necesarias para su manipulación.

2. Condiciones de Curado:

- Las probetas deben ser curadas en agua a una temperatura de  $23 \pm 2$  °C hasta el momento de la prueba.

- Alternativamente, pueden ser almacenadas en una cámara húmeda que mantenga una humedad relativa de al menos el 95% y la misma temperatura de  $23 \pm 2$  °C.

**f. Recomendaciones Adicionales:**

1. Control de Calidad:

- Se deben llevar registros detallados de las condiciones de curado, incluyendo la temperatura y humedad ambiente.

- Es importante verificar regularmente que las condiciones de curado se mantengan dentro de los rangos especificados.

## 2. Variabilidad de Resultados:

- La variabilidad en las condiciones de curado puede afectar significativamente los resultados de las pruebas de resistencia. Por ello, es crucial asegurar que las probetas se curen bajo condiciones controladas y uniformes.

### **g. Resumen**

La NTP 339.034:2014 establece procedimientos específicos para el curado de probetas de concreto en Perú, asegurando que las condiciones de humedad y temperatura sean controladas rigurosamente para obtener resultados de ensayo representativos y confiables. El cumplimiento de estas normas es esencial para la evaluación precisa de la resistencia y otras propiedades mecánicas del concreto utilizado en las construcciones.

#### **3.2.2.2. Resistencia a la compresión del concreto.**

La NTP 339.034 especifica el procedimiento estandarizado utilizado para medir la resistencia a la compresión del concreto en muestras cilíndricas, la cual se detalla a continuación:

1. Propósito. tiene como propósito principal obtener una medida precisa de la resistencia a la compresión del concreto, tanto en especímenes cilíndricos como en extracciones diamantinas.
2. Resumen del Método. el proceso implica la aplicación gradual de una carga de compresión axial sobre los especímenes de concreto, ya sea cilindros moldeados o muestras extraídas, a una velocidad predefinida

hasta que se produce la falla o rotura del material. La resistencia a la compresión se determina dividiendo la carga máxima registrada durante el ensayo por el área de la sección transversal del espécimen.

3. Aparatos. Máquina de ensayo: Para realizar estos ensayos, es necesario contar con una máquina de ensayo adecuada que tenga la capacidad suficiente y sea capaz de proporcionar la velocidad de carga indicada en la norma técnica, siendo de 8.5.

Las 4 muestras anteriormente mencionadas serán ensayadas a los 7, 14 y 28 días, lo cual indicará si cumplen o no con las características mecánicas de resistencia en base a lo requerido por el diseño de Whitetopping.

Se ha considerado la elaboración de 24 probetas de concreto para luego ensayarlas de acuerdo a los días previstos. En la Tabla 19 se puede observar el número de probetas, por cada dosificación de concreto y para el ensayo de resistencia a la compresión, así como también el volumen de concreto a utilizar.

**Tabla 19**

*Ensayo de resistencia a la compresión, unidades físicas y en volumen de concreto.*

Ensayos de laboratorio	Ensayo de resistencia a la compresión	
Volumen del molde	0.005 m <sup>3</sup> /und	
Descripción	und	Vol. (m <sup>3</sup> )
Concreto patrón	6	0.0106
Concreto + 10% geopolímero	6	0.0106
Concreto + 15% geopolímero	6	0.0106
Concreto + 20% geopolímero	6	0.0106
TOTAL	24	0.0424



### **3.2.2.3. Norma NTP 339.078: Ensayo de Resistencia a la Flexión del Concreto**

#### **a. Propósito**

La norma NTP 339.078 establece el procedimiento para determinar la resistencia a la flexión del concreto mediante un ensayo que mide la resistencia del concreto a la tensión indirecta cuando se somete a una carga en un punto específico. Este ensayo es crucial para evaluar la capacidad del concreto para soportar cargas flexionantes, especialmente en pavimentos y estructuras similares.

#### **b. Equipos Necesarios**

1. Máquina de Ensayo: Capaz de aplicar cargas de flexión de manera controlada y continua.
2. Apoyos y Cuchillas de Carga: Dos rodillos de apoyo y dos cuchillas de carga, colocados a 1/3 de la distancia entre los apoyos.
3. Probetas: Vigas de concreto prismáticas, generalmente de dimensiones 15x15x50 cm o 10x10x40 cm.

#### **c. Preparación de Probetas**

1. Moldeo y Curado: Las probetas deben ser moldeadas y curadas conforme a las especificaciones estándar (NTP 339.034) para asegurar uniformidad y representatividad.
2. Dimensiones y Superficies: Las probetas deben tener dimensiones y superficies uniformes, sin irregularidades que afecten la distribución de la carga.

#### **d. Procedimiento**

1. Colocación de la Probeta:

- La probeta se coloca sobre dos rodillos de apoyo, separados por una distancia específica (usualmente 45 cm para probetas de 15x15x50 cm).

- Las cuchillas de carga se colocan a 1/3 de la distancia entre los apoyos, aplicando la carga en dos puntos equidistantes desde el centro de la probeta.

## 2. Aplicación de la Carga:

- La carga se aplica a una tasa constante, incrementándola de manera continua hasta la falla de la probeta.

- Es fundamental asegurar que la carga se distribuya uniformemente y que no haya desplazamientos bruscos durante el ensayo.

## 3. Medición y Registro:

- Durante el ensayo, se registra la carga máxima aplicada hasta que la probeta falle.

- La deformación y el comportamiento de la probeta bajo carga se observan y registran para el análisis posterior.

## e. Cálculo de la Resistencia a la Flexión

La resistencia a la flexión se calcula usando la fórmula:

Fórmula para el cálculo de la resistencia a la flexión.

$$M_r = \frac{3PL}{2bh^2}$$

Fuente: Tomado de la Norma Técnica Peruana **339.078**

Donde:

- Mr: es el módulo de rotura, en MPa

- P: es la carga máxima de rotura indicada por la máquina de ensayo, en N

- L: es la distancia entre los apoyos (en mm).

- b: es el ancho promedio de la viga en la sección de la falla (en mm).

- h: es la altura promedio de la viga en la sección de falla (en mm).

#### **f. Interpretación de Resultados**

- Resistencia a la Flexión: Proporciona una medida de la capacidad del concreto para resistir fuerzas flexionantes, lo cual es crucial para aplicaciones como pavimentos y otras estructuras de soporte.

- Patrón de Falla: Se analiza el patrón de falla para identificar posibles problemas en la mezcla del concreto o en la preparación de las probetas.

#### **g. Precauciones**

- Alineación Correcta: Asegurarse de que la probeta y los equipos de carga estén correctamente alineados para evitar resultados inexactos.

- Tasa de Carga Constante: Mantener una tasa de carga constante y evitar cambios bruscos durante el ensayo, que podrían influir en el resultado.

#### **Conclusión**

El ensayo de resistencia a la flexión según la norma NTP 339.078 es fundamental para evaluar la durabilidad y capacidad de carga del concreto en aplicaciones estructurales. Proporciona datos esenciales que ayudan a garantizar que el concreto utilizado en pavimentos y otras estructuras cumpla con los estándares de calidad y desempeño requeridos.

#### **3.2.2.4. Norma Técnica Peruana NTP 339.084 para el Ensayo de Tracción simple del Concreto**

La norma establece el método estandarizado para evaluar la resistencia a tracción simple del concreto mediante la compresión diametral de probetas cilíndricas. Este ensayo es fundamental para determinar la capacidad del concreto para resistir esfuerzos de tracción, proporcionando resultados confiables y reproducibles que son clave en el diseño y evaluación de estructuras de concreto.

**a. Preparación:** Las probetas cilíndricas deben ser moldeadas y curadas según las especificaciones estándar para asegurar la uniformidad y calidad de las muestras. Y, las probetas deben tener dimensiones específicas según lo establecido en la norma, con superficies lisas y sin defectos que puedan afectar el resultado del ensayo.

Equipos Necesarios: los equipos que se utilizan en el procedimiento de ensayo de tracción simple son la máquina de ensayo y equipo de medición.

**b. Procedimiento:**

1. Colocación de la probeta: La probeta cilíndrica se coloca en el dispositivo de compresión diametral de la máquina de ensayo, asegurando que la carga se aplique de manera uniforme en dirección diametral.
2. Aplicación de la carga: Se aplica gradualmente una carga de compresión diametral sobre la probeta hasta que esta falle. Durante el ensayo, se registran la carga aplicada y las deformaciones sufridas por la probeta.
3. Registro de resultados: Se registra la carga máxima soportada por la probeta antes de la falla, así como cualquier otra información relevante, como la deformación máxima alcanzada.

Análisis de resultados: Los resultados obtenidos se utilizan para calcular la resistencia a tracción simple del concreto, expresada en términos de la carga máxima aplicada dividida por el área nominal de la sección transversal de la probeta. Estos datos son fundamentales para evaluar la calidad y capacidad de resistencia del concreto en proyectos de construcción y diseño de estructuras.

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

Para determinar el enfoque del objeto de investigación, se recopiló información visual de una sección del pavimento, la cual previamente se había

identificado. Dicho procedimiento se realizará con la metodología PCI, que ayuda a evaluar la condición del pavimento según un rango del 1 al 100.

Este dato obtenido servirá para saber y sustentar la condición del pavimento, la cual ayudará que se conozca el tipo de rehabilitación adecuada para el tramo en observación.

Los instrumentos utilizados en la investigación son los siguientes:

- Guías de diseños: se utilizó como medio bibliográfico para verificar el procedimiento de los diferentes diseños que se realiza en la investigación.
- Formulario (método PCI): se utiliza para registrar y analizar información primaria a partir de la visualización del pavimento flexible que se va a estudiar para realizar una propuesta de diseño de whitetopping.

Además, los resultados de los diferentes ensayos se generarán en laboratorios especializados, cumpliendo con los estándares técnicos necesarios para cada prueba. Estos laboratorios contaban con el equipo adecuado y con supervisión para realizar los diferentes ensayos a realizar

### **3.4. Técnicas estadísticas para el procesamiento de la información**

- Elaboración de especímenes. Para una correcta elaboración se procede hacer un diseño de mezcla para cada tipo y así cuantificar cada material y pesarlo, se hace la mezcla de agua con cada tipo de aditivo respectivamente en una mezcladora, añadiendo cemento, agregado grueso y fino.

Una vez se tenga una mezcla uniforme se continua a hacer el uso de las probetas, haciendo el fraccionamiento en 3 divisiones y hacer 25 golpecitos por capa, y colocar 79 excedentes de concreto en la última capa para nivelación final

encima del molde. Como paso final, coloque cada muestra en un nivel para que cada altura coincida y así posea alineamiento y sea homogéneo.

Luego de curar la probeta por 3 horas y media se procedió al desmoldeo, y luego de media hora de desmoldado, luego realizando este mecanismo, la muestra se colocó en lugar seguro para su posterior ensayo de resistencia a la compresión pasada las 24 horas al 3er día 7, 14 y 28 días respectivamente.

Realizar el ensayo de resistencia a la compresión en estado templado, de acuerdo con la norma ASTM C39/C39M, tomar los datos de la muestra como diámetro, altura, peso, etc., y luego realizar el ensayo en una prensa hidráulica digital, Para esta prueba se utilizó el cloro contenido en la cápsula metálica. Los discos de caucho de butadieno se utilizan para mejorar la distribución de la carga porque la superficie de contacto de la muestra no es uniforme en todos los ámbitos.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS

En este capítulo, se describen los resultados obtenidos de manera detallada, los cuales fueron formulados en función de los objetivos planteados en esta investigación. Además, se realizará un análisis general de estos resultados para comprender su significado y relevancia en el contexto del estudio.

#### 4.1. Procedimiento

En esta sección se explicará y detallará el procedimiento realizado para el desarrollo de este trabajo de investigación, el cual estará ilustrado por el siguiente diagrama de flujo mostrado en la Figura 40

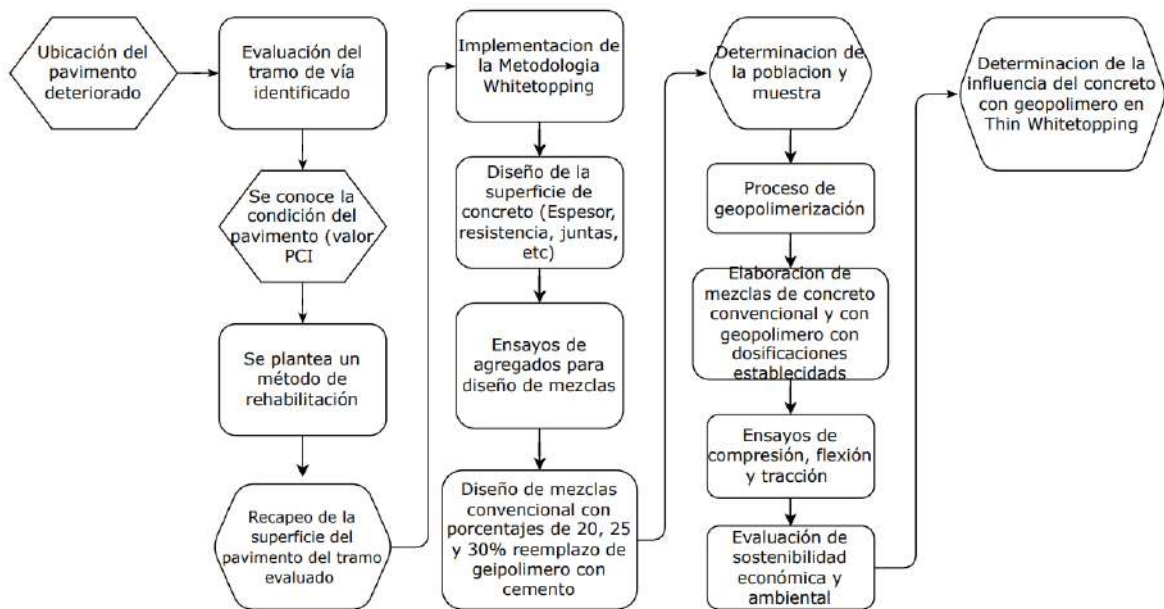


Figura 34. Diagrama de flujo del procedimiento para cumplir el objetivo general

Respecto a la figura 40, es que se pasara a detallar de forma general el procedimiento empleado para la presente investigación, el cual es el siguiente.

### - Ubicación del pavimento deteriorado.

Como es de conocimiento general, en el área nacional, regional y local, existen un número muy extenso de km de vías asfaltadas con pavimento flexible, el cual según a la observación e investigación es la estructura más común en la red viaria nacional. De tal forma que cada una de estas vías, necesitan de cierto grado de mantenimiento y reparación dependiendo de su uso y de las condiciones del lugar.

En tal sentido se tomó como aplicación del proyecto, a un kilómetro del pavimento deteriorado de la vía Arequipa – Yura, desde el km 59+780.00 hasta el km 60+780, el cual se le denominara ingreso hacia Yura.



**Figura 35.** Inicio del tramo de evaluación vial



**- Evaluación del tramo de vía seleccionada y conocimiento del valor PCI.**

Luego de haber establecido la ubicación y la vía, se procedió a evaluar el pavimento con el método PCI, el cual permite hacer una evaluación superficial del pavimento en base a valores y calificaciones de cada sección de vía. En la Figura 42 se puede ver la identificación y medida de algunas fallas encontradas.

Posteriormente se desarrollará el método PCI detalladamente y se definirá el valor obtenido de cada sección evaluada.



**Figura 36.** *Tipo de Falla: Agrietamiento en bloque tramo de estudio*



**Figura 37.** *Tipo de Falla: Grieta de borde Tramo de la carretera Arequipa-entrada a Yura*

**- Planteamiento del Método de Rehabilitación y estudio de tráfico**

Luego de conocer el estado del pavimento en su forma superficial, se procede a escoger y precisar el método de mantenimiento o rehabilitación óptimo por cada sección el tramo evaluado. En esta situación se prevee que el tramo

evaluado requiera de una rehabilitación en donde se requiera sustituir el pavimento deteriorado por una estructura nueva.

En caso el pavimento requiera una sustitución, el método planteado requiere de un estudio de tráfico, el cual también se realizó con participación de los tesisistas y ayuda de personas del lugar.



**Figura 38.** *Día número 1 de conteo de vehículos*

#### **- Implementación y de la metodología Whitetopping**

En términos simples la metodología de rehabilitación Whitetopping consiste en superponer una capa de concreto en la estructura del pavimento ya existente, de tal forma que se pueda brindar una mayor durabilidad a toda la estructura, y

alargar su vida útil por un periodo más extenso que al utilizar un pavimento con características bituminosas.

Respecto al diseño se consideraron el espesor del pavimento, la resistencia requerida, la longitud y separación de juntas, las cuales son características principales que se definirán de acuerdo a la condición de la estructura deteriorada.

**- Ensayos de agregados para el diseño de mezclas.**

Para cumplir con este procedimiento se tomó en consideración los siguientes ensayos, para los cuales se tomaron de guía las Normas Peruanas, especificadas a continuación.

- Análisis Granulométrico (NTP 400.012)
- Peso Específico y Absorción (NTP 400.022)
- Contenido de Humedad (NTP 400.018)
- Método de ensayo estándar para determinar el peso unitario y el porcentaje de vacíos en agregados. (NTP 400.017:2000)

Dichos ensayos son esenciales para garantizar que los agregados a utilizar en el diseño de mezcla de concreto cumplan con las especificaciones necesarias para lograr una mezcla de calidad y con las propiedades mecánicas adecuadas

**- Diseño de mezclas convencional y con porcentajes de reemplazo del 20, 25 y 30% de geopolímero por cemento.**

En este proceso, se tomará en consideración los datos obtenidos del ensayo de agregados en el laboratorio, para así poder realizar un buen diseño de mezclas que cumpla con la resistencia y trabajabilidad requerida.

El diseño de mezclas se realizó en base a la metodología ACI 211, en donde luego de tener las proporciones finales de cada uno de los elementos

necesarios para la mezcla, se procederá a calcular otras tres dosificaciones con reemplazo de 20, 25 y 30% de geopolímero con cemento.

### **Determinación de población y muestra**

Estos datos son relevantes ya que de este proceso dependerá el número de probetas y la cantidad de muestras necesarias. Es así que al ser probetas de concreto se tomó en referencia tanto los ensayos necesarios para la Metodología Whitetopping, así como también normas de ensayos de la calidad del concreto.

#### **- Proceso de geopolimerización.**

Este proceso es muy importante ya que es donde se realiza la reacción química de elementos tales como el hidróxido y silicato de sodio, los cuales harán reaccionar al material denominado como cenizas volantes, de tal forma que se obtenga un compuesto denominado geopolímero, el cual reemplazara al cemento en diferentes porcentajes, respecto a lo considerado en el diseño de mezclas.

#### **- Elaboración de concreto para probetas**

Para la elaboración de la mezcla de concreto, se considerado el diseño de mezclas previamente ya establecido, para que luego de tener la pasta con diferentes dosificaciones se proceda a moldear de acuerdo a lo premeditado en el capítulo de población y muestra.

#### **Ensayos del concreto en estado fresco y endurecido**

Al tener ya la mezcla de concreto, se procederá a moldear el material, en probetas cilíndricas y prismáticas de acuerdo con la norma, además se tomaron datos del cono de Abrahams, todo ello para evaluar las características mecánicas y físicas del concreto respectivamente.

#### **- Evaluación de sostenibilidad económica y ambiental.**

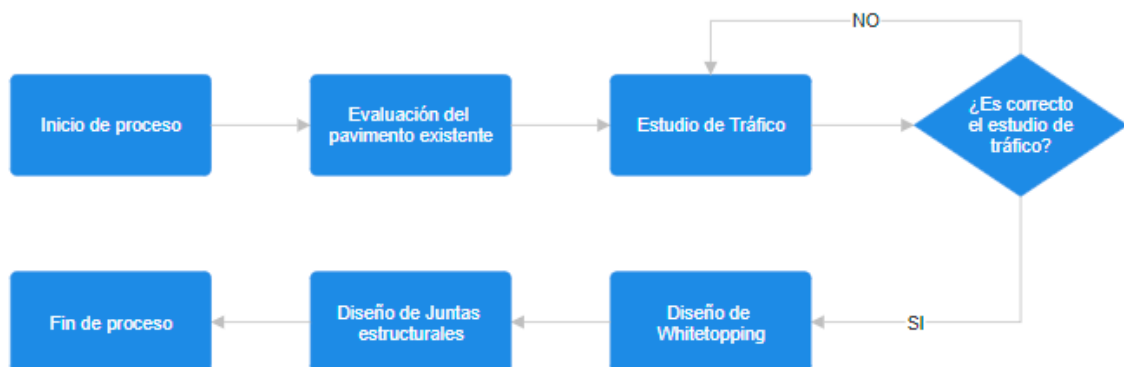


Como ultimo procedimiento se procederá a hacer una evaluación económica para ver el costo respecto al ciclo de vida del pavimento, para poder determinar diferencias de costos respecto a rehabilitaciones tradicionales y a la propuesta por este proyecto. Así mismo se hará una evaluación ambiental respecto al material planteado como sustituto del cemento, el cual se denomina como geopolímero.

## 4.2 Diseño Whitetopping

### 4.2.1 Diagrama de Flujo

El presente diagrama de flujo de actividades visualiza el procedimiento que se llevara a cabo para lograr, satisfactoramente, el diseño de whitetopping. Las etapas son las siguientes:



**Figura 39.** *Diagrama de Flujo del diseño Whitetopping*

**a. Evaluación de pavimento existente:** antes de comenzar cualquier trabajo de rehabilitación, se realizó una evaluación exhaustiva del pavimento existente con el método de Pavement condition Index (PCI), para determinar su estado actual de un tramo específico, incluyendo la presencia de grietas, deformaciones y ahuellamiento, entre otros.

**b. Estudio de tráfico:** Luego de conocer la condición del pavimento, se realizó la cuantificación de vehículos ligeros y pesados en los dos sentidos que

presenta el tramo de estudio, se clasificó por categoría y días de la semana, de esta manera se determina el ESAL para poder desarrollar el diseño de mezcla, es clave que este proceso se realice correctamente para tener un diseño del Whitetopping lo más adecuado a la realidad.

**c. Diseño Whitetopping:** se realizó un diseño detallado del espesor y la composición del whitetopping, teniendo en cuenta la resistencia requerida, calidad de drenaje, la durabilidad y otros criterios de rendimiento.

**d. Diseño de juntas estructurales:** a partir del procedimiento anterior, se realizó el diseño de juntas de acuerdo al espesor obtenido y sus características, con el fin de determinar el diámetro, espaciamiento y longitud de las barras de acero que componen las juntas estructurales de una capa de concreto para carretera.

#### **4.2.2 Método Pavement Condition Index (PCI)**

Como punto de partida para la investigación se tuvo que identificar la ubicación del proyecto, la cual está posicionada desde del km 59+780 de la carretera Arequipa – Yura que es el punto de partida, hasta el desvío hacia la entrada a la planta de cemento de yura, tal como se evidencia en la figura 46

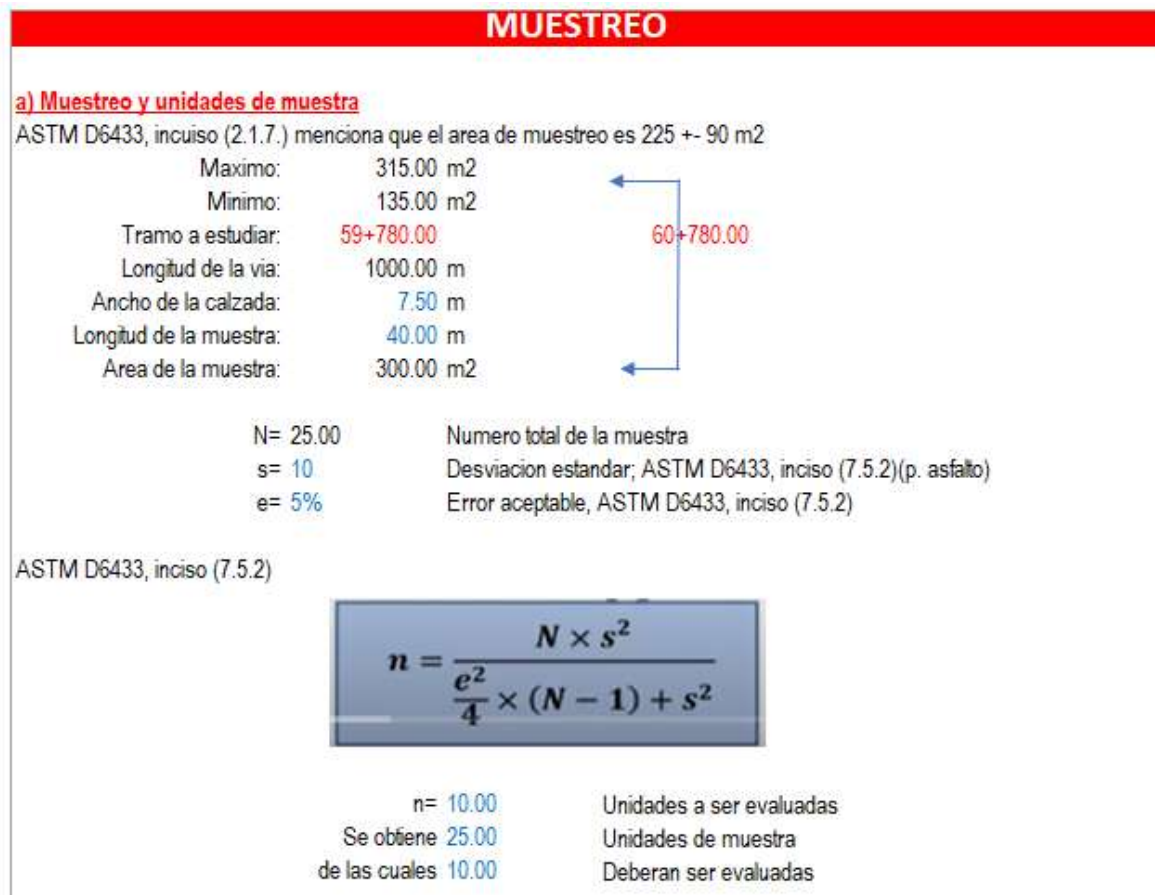


**Figura 40.** Tramo de evaluación Arequipa entrada a Yura.

Fuente: Google Earth (2024)

**- Seccionamiento de la vía.**

La longitud del tramo de la vía considerada es de 1km, la cual según las indicaciones para desarrollar el método PCI tuvo que seccionarse mediante un muestreo y unidades de muestra, tal como se ve en la figura 37.



**Figura 41. Cálculo de muestreo y unidades de muestra.**

Tal como se precisa en la figura 47 existen distintos datos a tener en cuenta al momento de evaluar las unidades y sus características, por lo que, al considerar una longitud de vía de 1000 m, con un ancho de calzada de 7.50m y también una longitud de muestra de 40m, se obtiene que existen 25 unidades de muestra, de las cuales 10 deberán ser evaluadas.

Posteriormente siguiendo el método PCI se procedió a seleccionar las unidades de muestreo tal como se muestra en la figura 48.



### b) Selección de unidades de muestreo

ASTM D6433, inciso (7.5.3)

$$i = \frac{N}{n}$$

$i = 2.50$  intervalo de muestreo

Por lo tanto el intervalo de muestreo será:

$i = 2.00$  intervalo de muestreo

**Figura 42.** Cálculo para selección de unidades de muestreo

Respecto a la figura 48 se puede ver que el intervalo de muestreo tomado será de 2, esto quiere decir que se evaluará una sección de 40m, para luego tomar otra que este 80m después de esta primera sección. También cabe resaltar que no se consideraron secciones aleatorias, por lo que finalmente se tuvo un tramo de evaluación de 1000 m, de los cuales se evaluaron 10 secciones de 40 m con un intervalo de muestro de 2.00. Dicho seccionamiento se puede observar en la figura 49.



**Figura 43.** Seccionamiento cada 40.00 metros

### - Aplicación del Método PCI

Posteriormente al muestreo y seccionamiento se aplica el método tomando en consideración las 10 secciones anteriormente previstas. Al ser un poco extenso, para este capítulo se desarrollará una sección al azar para fines

explicativos porque el procedimiento adoptado es repetitivo. Además, que, las fichas utilizadas para el resto de las secciones, así como el trabajo de campo será anexado en la parte final del proyecto.

Etapa 01: Reconocimiento del cuerpo superior de la ficha de evaluación.

1. Como procedimiento inicial se registraron los datos, tanto del proyecto, los evaluadores y la fecha, también se plasmó la unidad de muestra, que en este caso será la UM-1. Posteriormente se pasó a revisar los 19 tipos de falla para el conocimiento y aplicación en campo.

USMP		FICHA PARA EL ANALISIS DEL INDICE DE CONDICIÓN DE PAVIMENTO					
METODO PCI							
PROYECTO		APLICACIÓN DE CONCRETO GEOPOLIMERO COMO ALTERNATIVA SOSTENIBLE EN THIN WHITE TOPPING APLICADO A PAVIMENTOS FLEXIBLES EN EL TRAMO DE LA CARRETERA AREQUIPA - YURA					
EVALUADORES:		TITO ITO JHEAN CARLOS TEJADA VERA JHORDAN LUIS		UNIDAD DE MUESTRA UM - 1			
FECHA:		19/04/2024		INICIO DE PROGRESIVA (KM) 58+700.00			
				FIN DE PROGRESIVA (KM) 58+820.00			
				ANCHO DE VIA (m) 7.50			
				AREA DE LA UNIDAD (m2) 300.00			
N°	TIPO DE FALLA	COD	UNIDAD	N	TIPO DE FALLA	COD	UNIDAD
1	Piel de cocodrilo	PDC	m2	11	Parcheo	PDC	m2
2	Exudación	EXU	m2	12	Pulimento de agregados	EXU	m2
3	Agrietamiento en bloque	AEB	m2	13	Huecos	AEB	und
4	Abultamientos y hundimientos	AHU	m	14	Cruce de via ferrea	AHU	m2
5	Corrugacion	COG	m2	15	Ahuellamiento	COG	m2
6	Depresion	DPS	m2	16	Desplazamiento	DPS	m2
7	Grieta de borde	GBD	m	17	Grieta Parabolica	GBD	m2
8	Grieta de reflexion de junta	GJIJ	m	18	Hinchamiento	GJIJ	m2
9	Desnivel carril/Berma	DES	m	19	Desprendimiento de Agregados	DEA	m2
10	Grietas longitudinales/transversales	GTR	m				
NIVEL DE SEVERIDAD		BAJA (LOW)	MEDIA (MEDIUM)	ALTA (HIGH)			
		L	M	H			

Figura 44. Información superior de la ficha de evaluación

Etapa 02. Cálculo de valores deducidos.

1. Se llenó el formato tomando en consideración la inspección visual de la sección evaluada, de este modo se identificó el tipo de falla, así como también su nivel de severidad. En la figura 51 a la figura 55, se logró identificar fallas importantes como agrietamiento, grieta en borde y ahuellamiento en el tramo de la carretera



**Figura 45.** *Falla tipo agrietamiento en bloque*



**Figura 46.** *Medición para la falla tipo agrietamiento en bloque*



**Figura 47.** *Medición para el nivel de severidad de la falla*



**Figura 48.** *Falla tipo grieta de borde*





**Figura 49.** *Medición de la falla tipo grieta de borde*

2. Posteriormente se calculó el total, sumando las cantidades parciales de cada falla, para luego calcular la densidad, la cual se halla dividiendo el total de cada falla entre el área de muestreo en evaluación, dicha densidad es expresada en porcentaje. Ejemplificando, la primera falla la cual es Agrietamiento en bloque, cuya cantidad parcial y total es de 50.40, se divide entre 300, por lo que como resultado se obtuvo una densidad de 16.8%. Dicho calculo se realiza para todas las fallas identificadas.

3. Luego se calculó el valor deducido, por lo que se tomaron las curvas de valor deducido propuestas por la ASTM-D6433. En este caso volviendo a tomar como ejemplo la primera falla de la figura 51, se tiene un porcentaje de incidencia de 16.8%, el cual se toma para interceptarlo con la curva de severidad Media, en consecuencia, se obtiene un valor deducido de 21.5. Dicho procedimiento se observa en la figura 56





**Figura 53. Cálculo corregido de valor deducido**

2. Finalmente teniendo los VDC se realiza una suma de para obtener un máximo VDC el cual posteriormente deberá de restarse al valor de 100 para así obtener el valor de PCI. Para la UM-1 se obtuvo un MAXVDC de 87, por lo que el valor del PCI se obtendrá restando 100 menos 87, resultando un valor de PCI=13, el cual deduce que la condición del pavimento en esa sección es Muy mala. Ver Figura 44.

INDICE DE CONDICION DEL PAVIMENTO (PCI) :	PCI= 100 - (Max VDC O total VD)
	PCI= 13
CONDICION DEL PAVIMENTO:	MUY MALO

**Figura 54. Nivel de Condición del Pavimento (PCI)**

### Resultados del Método PCI

Finalmente, tal como se había mencionado se hizo el análisis de 10 secciones en el tramo Arequipa entrada a Yura, desde el Km 59+780.00 hasta el km 60+780.00, a las cuales se les aplico el mismo procedimiento detallado anteriormente. Por lo que en la figura 45 se detallara la unidad de muestreo, el PCI, la clasificación y también la posible categoría de acción recomendada según el método PCI.

Categoría de acción	Rango	Clasificación	Simbología
Mantenimiento Preventivo	100-85	Excelente	
Mantenimiento Preventivo Rutinario y/o Periódico	85-70	Muy bueno	
	70-55	Bueno	
Mantenimiento Correctivo	55-40	Regular	
Rehabilitación - Refuerzo Estructural	40-25	Malo	
Rehabilitación - Reconstrucción	25-10	Muy malo	
	10-0	Fallado	

**Figura 55. Correlación de categoría de acción con un rango de PCI**

Fuente: Tomado de (Jugo, 2005)



El proceso ejemplificado anteriormente, solo representa la evaluación de una de las secciones del pavimento, la evaluación de las 9 secciones restantes, estarán plasmadas en la parte de anexos.

**Tabla 20***Hoja resumen para el análisis del índice de condición de pavimento*

N	AREA (m2)	UNIDAD DE MUESTREO	VDC	PCI	CLASIFICACION	ACCION
1	300.00	1.00	70.00	30.00	MALO	Rehabilitación, Nueva estructura
2	300.00	2.00	65.00	35.00	MALO	Rehabilitación, Nueva estructura
3	300.00	3.00	70.50	29.50	MALO	Rehabilitación, Nueva estructura
4	300.00	4.00	66.00	34.00	MALO	Rehabilitación, Nueva estructura
5	300.00	5.00	65.50	34.50	MALO	Rehabilitación, Nueva estructura
6	300.00	6.00	61.00	39.00	MALO	Rehabilitación, Nueva estructura
7	300.00	7.00	60.00	40.00	MALO	Rehabilitación, Nueva estructura
8	300.00	8.00	59.00	41.00	REGULAR	Mantenimiento correctivo
9	300.00	9.00	87.00	13.00	MUY MALO	Reconstrucción
10	300.00	10.00	66.00	34.00	MALO	Rehabilitación, Nueva estructura

Finalmente, en la Tabla 20 se puede ver que la mayoría de las secciones presenta una clasificación de MALA a MUY MALA, además según el método se recomienda que la acción a tomar sea una rehabilitación o en este caso se construya una nueva estructura.

Es así que para esta sección se concluye que la acción recomendada para el mejoramiento de esta vía, deberá ser una rehabilitación o la construcción de una nueva estructura superficial. Además, cabe resaltar que, según la inspección y evaluación visual, todos los daños mencionados están a nivel superficial, mas no estructural.

### 4.2.3 Diseño de capa de concreto

#### a. Estudio de tráfico

El estudio de tráfico es fundamental, ya que permite estimar la carga vehicular prevista para determinar los espesores adecuados de las distintas capas del pavimento.

#### c. Índice de tránsito semanal

Para conocer la carga vehicular que circulará sobre la capa de concreto durante todo el plazo de vida del pavimento rígido, debemos realizar un registro de flujo vehicular de los sentidos Arequipa – Yura y Yura – Arequipa y se realizó el registro en el horario de 06:00 a 20:00 horas. Se tiene en cuenta que la vía de estudio es un ingreso a zonas agrícolas y urbanas. A continuación, en la tabla 22 se muestra el conteo de vehículos resumido por días, el cual se encuentra anexado los resultados detallados en la presente investigación

**Tabla 21**

*Conteo de vehículos por días*

Fecha	Sentido	VEHICULOS LIGEROS				BUS		CAMIONES UNITARIOS			SUB TOTAL	TOTAL
		Autos	Pick up	C. Rural	Micros	B2	B3-1	C2	C3	C4		
21-Abr	E	31	9	5	5	0	0	5	0	0	55	97
	S	19	8	5	5	0	0	5	0	0	42	
22-Abr	E	62	12	9	5	0	0	2	0	0	90	188
	S	73	5	14	4	0	0	2	0	0	98	
23-Abr	E	53	14	7	3	0	0	5	0	0	82	170
	S	55	15	6	7	0	0	5	0	0	88	
24-Abr	E	64	22	6	6	0	0	5	0	0	103	230
	S	89	19	6	9	0	0	4	0	0	127	
25-Abr	E	70	17	0	8	0	0	4	0	0	99	201
	S	74	18	0	6	0	0	4	0	0	102	
26-Abr	E	39	16	7	5	0	0	2	4	0	73	181
	S	86	6	4	7	0	0	2	3	0	108	
27-Abr	E	54	10	6	4	0	0	1	0	0	75	167
	S	70	9	3	5	0	0	5	0	0	92	
Total		839	180	78	79	0	0	51	7	0		

#### d. Cálculo de ESAL

A partir del conteo de vehículos, de acuerdo a su categoría, que transitan en la vía de estudio se realiza el cálculo de ESAL con la metodología de la AASTHO, para poder completar con el proceso debemos considerar los siguientes parámetros:

- Periodo de diseño : 20 años
- Espesor de pavimento : 200 mm (asumido)
- Índice de serviciabilidad inicial : 4.5
- Índice de serviciabilidad final : 2.0
- $\Delta\text{PSI} = P_o - P_t$  : 2.5
- Factor de Distribución por dirección : 0.5
- Factor de Distribución por carril : 1 un carril por sentido

Nota: los valores de los parámetros fueron obtenidos de las siguientes tablas.

**Tabla 22**

*Periodo de Diseño en relación al tipo de carretera*

TIPO DE CARRETERA	PERIODO DE DISEÑO
Urbana con altos volúmenes de tránsito	30 - 50 años
Interurbana con altos volúmenes de tránsito	20 -50 años
Pavimentada con bajos volúmenes de tránsito	15 - 25 años
Revestidas con bajos volúmenes de tránsito	10 - 20 años

Fuente: American Association of State Highway and Transportation Officials (1993)

**Tabla 23***Determinación del factor por dirección*

Número de carriles en ambas direcciones	LD 10
2	0.50
4	0.45
6 o más	0.40

Fuente: American Association of State Highway and Transportation Officials (1993)

**Tabla 24***Determinación del facto carril*

Nº DE CARRIL EN CADA SENTIDO	PORCENTAJE DE W18 EN EL CARRIL DE DISEÑO
1	100
2	80 - 100
3	60 - 80
4 o más	50 - 75

Fuente: American Association of State Highway and Transportation Officials (1993)

La AASHTO ofrece una fórmula precisa para calcular el número de ejes equivalentes (ESAL), basada en la información recopilada sobre los ejes que transitarán por la carretera durante su vida útil. Este cálculo es fundamental para evaluar la carga y el desgaste que la carretera experimentará a lo largo del tiempo, permitiendo así diseñar una estructura vial duradera y resistente.

$$Fec = -\frac{W_{t18}}{W_{tx}}$$

$$\text{Log} \left( \frac{W_{t18}}{W_{tx}} \right) = 4.62 \text{Log}(18 + 1) - 4.62 \text{Log} (L_x + L_2) + 3.28 \text{Log}(L_2) + \frac{G_t}{\beta_x} - \frac{G_t}{\beta_{18}}$$

$$G_t = \text{Log} \left( \frac{4.5 - Pt}{4.5 - 1.5} \right) \quad \beta_x = 1 + \frac{3.63(L_x + L_2)^{5.20}}{(D+1)^{8.46} \cdot (L_2)^{3.62}}$$

En Donde:

Wü = # Aplicaciones de carga definida al final del tiempo t

$W_{tte} = \#$  Aplicaciones de carga equivalente al final del tiempo  $t$

A partir de las ecuaciones anteriores, se reemplazó variables y como resultado se obtuvo los ejes equivalentes para continuar con el diseño de Whitetopping.

**Tabla 25**

*Cálculo de ESAL para la capa de concreto Whitetopping*

Tipo de Vehículo	VEHICULOS LIGEROS								BUS				CAMIONES UNITARIOS					
	Autos		Pick up		C. Rural		Micros		B2		B3-1		C2		C3		C4	
	delant.	post.	delant.	post.	delant.	post.	delant.	post.	delant.	post.	delant.	post.	delant.	post.	delant.	post.	delant.	post.
CARGA	1	0.8	1.2	1.5	1.5	2	2	3	7	11	7	16	7	11	7	18	7	23
Lx (kips)	2.2059	1.7647	2.6471	3.3089	3.3089	4.4118	4.4118	6.6177	15.441	24.265	15.441	35.294	15.441	24.265	15.441	39.706	15.441	50.736
no	120	120	26	26	11	11	11	11	7	7	2	2	7	7	4	4	0	0
r%	0.0449	0.0449	0.041	0.041	0.0309	0.0299	0.0299	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.045	0.045	0.04	0.04
Gt	-0.0792	-0.0792	-0.0792	-0.0792	-0.0792	-0.0792	-0.0792	-0.0792	-0.0792	-0.0792	-0.0792	-0.0792	-0.0792	-0.0792	-0.0792	-0.0792	-0.0792	-0.0792
L2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	2	1	3
B18	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Bx	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
log(Wtx/Wt)	3.5704	3.8674	3.3117	2.9771	2.9771	2.5198	2.5198	1.8338	0.2902	-0.5718	0.2902	-0.3658	0.2902	-0.5718	0.2902	-0.5901	0.2902	-0.521
G = Wt/Wtx	0.0003	0.0001	0.0005	0.0011	0.0011	0.003	0.003	0.0147	0.5126	3.7307	0.5126	2.3215	0.5126	3.7307	0.5126	3.8914	0.5126	3.3191
G Y	31.339	31.339	30.089	30.089	27.118	26.843	26.843	26.870	26.870	26.870	26.870	26.870	26.870	26.870	31.371	31.371	29.778	29.778
ESAL	184.57	93.134	69.661	150.51	57.387	162.81	162.81	790.89	17596	128063	5027.5	22769	17596	128063	11739	89118	0	0
PARCIAL	1671.770703								173455.6028				246516.273					
TOTAL	421643.6465																	

### e. Diseño de la cobertura de concreto

El diseño de la cobertura de concreto es un aspecto crucial en la planificación y construcción de infraestructuras viales y pavimentos. La metodología propuesta por AASHTO en su guía de diseño de pavimentos de 1993 ha sido ampliamente adoptada en la ingeniería de pavimentos por su enfoque detallado y exhaustivo. Esta metodología ofrece un método estructurado para determinar el espesor óptimo de la losa de concreto, teniendo en cuenta factores críticos como las características del tráfico, las propiedades del concreto y las condiciones ambientales.

La metodología de AASHTO propone una ecuación específica para calcular el espesor y las dimensiones de la capa de concreto:

$$\log_{10} W_{18} = z_R \times S_o + 7.35 \times \log_{10}(D + 1) - 0.06 + \frac{\log_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4.5 - 1.5}\right)}{1 + \frac{1.624 \times 10^7}{(D + 1)^{8.46}}} + (4.22 - 0.32 p_t) \times \log_{10}\left(\frac{s'_c \times c_d (D^{0.75} - 1.132)}{215.32 \times j (D^{0.75} - \frac{18.42}{(\frac{E_c}{k_{effect}})^{0.25}})}\right)$$

Como una opción adicional para determinar el espesor óptimo de la capa de concreto, se puede recurrir al nomograma sugerido por la Guía de diseño de AASHTO. Este recurso proporciona una herramienta visual que permite calcular de manera precisa el espesor necesario de la capa de concreto. La utilización de este nomograma puede ayudar a optimizar el diseño y asegurar que el espesor de la capa de concreto sea el adecuado.

### f. Datos de entrada

Para desarrollar un diseño efectivo y duradero, es esencial tener en cuenta una variedad de parámetros clave establecidos por la metodología. Estos parámetros no solo influyen en la calidad y funcionalidad del diseño, sino que también tienen un impacto directo en el nivel de servicio deseado a lo largo de la



vida útil del proyecto. Entre los parámetros fundamentales que deben considerarse se encuentran:

- Periodo de diseño

Se ha definido un periodo de diseño de 20 años, siguiendo el mismo criterio utilizado en el estudio de tráfico.

- Confiabilidad

La confiabilidad es un factor crucial que evalúa el comportamiento potencial de la estructura durante su vida útil, abarcando tanto su capacidad estructural como funcional. Para una arteria principal urbana, se ha optado por una confiabilidad del 90%, conforme a lo indicado en la tabla N° 12.

- Desviación estándar

Este parámetro está directamente relacionado con la confiabilidad seleccionada para el proyecto. Con una confiabilidad del 90%, según la Tabla 13, la desviación estándar correspondiente es de -1.282.

- Desviación estándar combinada o total

La AASHTO propone un rango óptimo, y en base a la tabla 14, se ha seleccionado un valor de 0.34 para pavimentos rígidos, teniendo en cuenta previamente el conteo y clasificación de los vehículos que transitan por la vía existente.

- Perdida de servicio

En el caso de pavimentos rígidos, la AASTHO establece un nivel de serviciabilidad inicial de 4.5. Con base en el tráfico promedio (ADT) estimado para la autopista, se ha fijado un valor final de 2. Por lo tanto, la pérdida de serviciabilidad para el proyecto se estima en 2.5.

- Módulo de elasticidad del concreto

Se requiere comprender la capacidad de deformación dentro del rango elástico del concreto, para lo cual se ha utilizado la relación propuesta por el Instituto Americano del Concreto, la cual se expresa de la siguiente manera:

$$E = 57000(f'c)^{0.5}$$

Resolviendo la ecuación con una resistencia a la compresión  $f'c = 300$  kg/cm<sup>2</sup> se obtiene como resultado  $E_c = 3'723,370.037$  psi ó 25,691.3 Mpa del módulo de elasticidad.

- Módulo de rotura del concreto

Para determinar el módulo de rotura se utilizó la siguiente ecuación propuestas por AASTHO:

$$S'c = 8 a 10 (f'c)^{0.5}$$

Resolviendo la ecuación anterior con una resistencia a la compresión  $f'c = 300$  kg/cm<sup>2</sup> se obtuvo como resultado del módulo de rotura  $S'c = 653.2$  psi = 4.51 Mpa.

- Número de ejes equivalentes (ESAL)

A partir del análisis de tráfico previo, se obtuvo un valor de 421,643.6465 o  $0.421 \times 10^6$  ejes equivalentes de 8.2 toneladas.

- Coeficiente de transferencia de carga

Se determinó utilizando la tabla 17, la cual indica el tipo de estructura de la capa del pavimento. Para la capa de concreto con reforzamiento continuo de concreto hidráulico, se obtuvo un valor de  $J = 2.70$ .

- Coeficiente de drenaje

Este parámetro permite medir la capacidad de drenaje necesaria en el pavimento para un porcentaje específico de saturación experimentado durante su vida útil. Tras evaluar la exposición a la humedad cercana a la saturación, se

determinó que la capa de concreto muestra una calidad satisfactoria o buena calidad y superando el 25% de tiempo de exposición de la estructura. Basándose en las relaciones proporcionadas en la tabla 14 y tabla 15, se seleccionó un valor de 1.00 con el fin de que el agua no quede atrapada en las capas internas y no afecte la resistencia del pavimento.

Calidad de drenaje	% de tiempo de exposición de la estructura de pavimento nivel de humedad próxima a la saturación			
	< 1%	1 - 5%	5 - 25%	> 25%
Excelente	1.4 - 1.35	1.35 - 1.30	1.30 - 1.20	1.20
Buena	1.35 - 1.25	1.25 - 1.15	1.15 - 1.00	1.00
Aceptable	1.25 - 1.15	1.15 - 1.05	1.00 - 0.80	0.80
Pobre	1.15 - 1.05	1.05 - 0.80	0.80 - 0.60	0.60
Muy pobre	1.05 - 0.95	0.95 - 0.75	0.75 - 0.40	0.40

- Módulo de reacción efectivo

A partir de la metodología de AASTHO, se asume un valor de CBR de 20.00% y 5.00% para la sub-base y base, respectivamente. Resolviendo la ecuación de la reacción compuesta de la subrasante (K) se obtiene 46.84 Mpa/m.

**Tabla 26**

*Resumen de datos de diseño requeridos*

Recopilación de datos de diseño		
Módulo de reacción efectivo (K)	Mpa/m	46.84
Módulo de elasticidad del concreto (Ec)	Mpa	25691
Módulo de rotura del concreto (s'c)	Mpa	5
Coefficiente de transferencia de carga (J)	-	2.7
Coefficiente de drenaje (Cd)	-	1
Desviación estándar combinada o total (So)	-	0.34
Confabilidad (R)	-	90%
Desviación estándar combinada o total (So)	-	-1.282
Índice de serviciabilidad inicial (Po)	-	4.5
Índice de serviciabilidad final (Pf)	-	2
Pérdida de servicio (PSI)	-	2.5
ESAL	x 10 ^ 6	0.42164

### g. Cálculo de losa de concreto Whitetopping

Haciendo uso de la ecuación general propuesta por metodología de AASHTO 93, se realizó el reemplazo de las variables con los valores obtenidos

demostrado anteriormente. Para resolver la ecuación se realizó por tanteo con espesor de la capa, con ayuda de Excel y su función de buscar objetivo, se tiene como resultado de espesor el concreto  $e=124$  mm ó 4.88 pulgadas, lo que se va a asumir un espesor de 13 cm para mayor practicidad.

Así mismo, para la determinación de la dimensión de la losa de concreto se establece tres condiciones

$$L_{m\acute{a}x} = 1.25 * \text{ancho de carril (m)}$$

$$L_{m\acute{a}x} = 25 * \text{espesor de losa (m)}$$

$$L_{m\acute{a}x} = 6.00 \text{ metros}$$

Resolviendo las ecuaciones anteriores, considerando ancho de carril de 3.60 metros y espesor de losa obtenido anteriormente (0.124 m), se obtiene los siguientes valores: 4.39 m, 3.125 m y 6.00 m, respectivamente. Por lo tanto, la longitud de la losa de concreto corresponde el valor mínimo de las tres ecuaciones, es decir el valor adecuado es 3.125 metros. Lo que significaría que el paño de diseño es de 3.60 metros de ancho por 3.125 metros de largo

#### **4.2.4. Diseño de juntas**

El pavimento de concreto está expuesto a una variedad de fuerzas, que incluyen las cargas del tráfico, la contracción y expansión del concreto (que se reduce de volumen al fraguar en comparación con su estado fresco) y las fluctuaciones de temperatura o humedad entre la parte superior e inferior del pavimento, entre otras. Para contrarrestar estos efectos, no basta con proporcionar un espesor adecuado, sino que también es necesario diseñar juntas longitudinales y transversales que eviten la formación temprana de fisuras en el concreto. Estas juntas deben ser diseñadas de manera técnica y se dividen en longitudinales y transversales.

Para la determinación del diámetro, separación y longitud de las barras de transferencia se realizará a partir tabla 27 donde se muestra los requisitos mínimos propuestos por AASTHO.

**Tabla 27**

*Requisitos mínimos para pasadores en juntas de pavimentos*

Diametro de pasador	Longitud total	Separación
pulg	cm	cm
1/2	25	30
5/8	30	30
3/4	35	30
7/8	35	30
1	35	30
1 1/8	40	30
1 1/4	45	30
1 3/8	45	30
1 1/2	50	30

Fuente: American Association of State Highway and Transportation Officials (1993)

En la guía para Capas de Refuerzo con Concreto de Harrington, D., & Fick, G. (2014), se recomienda el uso de barras con un diámetro de 1/2 pulgada (13 mm) para aplicaciones de refuerzo de concreto. Esta recomendación se basa en estándares convencionales y prácticas de ingeniería establecidas para pavimentos de 125 mm (5 pulgadas) de espesor o más.

Dentro de este contexto, para determinar las características de los pasadores utilizados en las capas de refuerzo, se selecciona pasadores de 1/2 pulgada de diámetro con una longitud de 25 cm y una separación de 30 cm. Estas especificaciones se alinean con las directrices proporcionadas en la tabla 27, las cuales están diseñadas para garantizar la efectividad y durabilidad de las capas de refuerzo de concreto en pavimentos existentes.

### 4.3. Diseño de mezcla de concreto

#### 4.3.1 Diagrama de Flujo

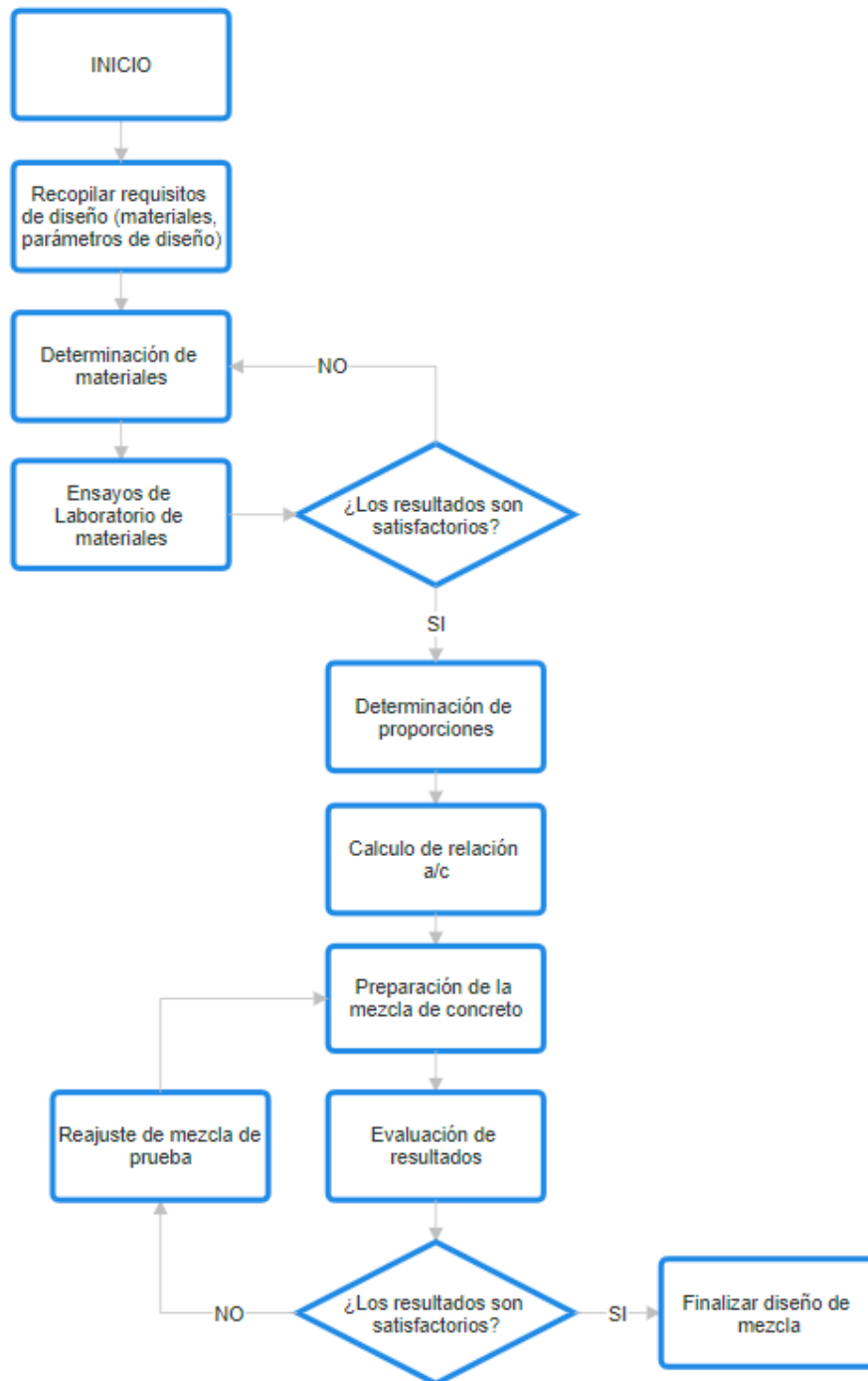


Figura 56. Diagrama de Flujo de Diseño de mezcla de concreto

**a. Recopilar requisitos de diseño:** se realiza la obtención de los materiales como agregado grueso, agregado fino, cemento y agua. Así mismo, se recopila los parámetros principales para poder realizar desarrollar el diseño.

**b. Determinación de materiales:** se realiza la obtención de la muestra de materiales a partir de las características recomendadas por especialistas y posteriormente su preparación para poder continuar con el proceso.

**c. Ensayos de Laboratorio de materiales:** Se comienzan realizando ensayos de laboratorio para evaluar el agregado grueso y fino. Estos ensayos abarcan el peso unitario, tamaño máximo y nominal, módulo de finura, contenido de humedad, peso unitario en estado suelto y compactado, peso específico y absorción.

**d. Determinación de proporciones:** Una vez validados los resultados de estos ensayos, se procede a determinar las proporciones ideales de los materiales. Este proceso tiene como objetivo alcanzar una resistencia a la compresión específica requerida para el proyecto en cuestión.

**e. Cálculo de relación a/c:** se lleva a cabo el cálculo de la relación agua/cemento (a/c). Este cálculo es crucial para determinar la cantidad óptima de cemento y agua que se necesita en la mezcla de concreto. Esto garantiza que se alcance la resistencia deseada en el concreto final.

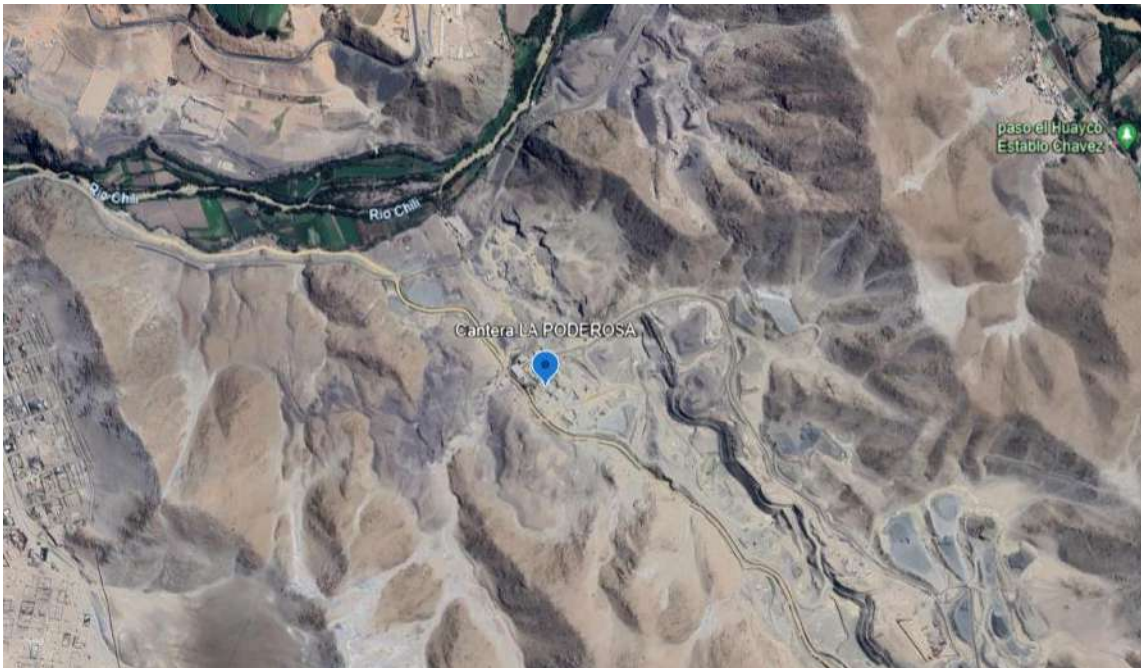
**f. Preparación de mezcla de concreto:** se realiza la mezcla de los materiales dosificados que se obtuvieron en los procedimientos anteriores, además se realiza forma correcta de mezclar el concreto, recomendado por ACI.

**g. Evaluación de resultados:** se verifica que la mezcla de concreto no este, visualmente, pobre en agua o que tenga elevados valores de aire incorporado. En este caso se procede a realizar el reajuste de las dosificaciones

de los materiales y se continua con el procedimiento hasta conseguir una relación optima de diseño de mezcla. De este modo se culmina el presente procedimiento.

#### **4.3.2. Características de los agregados**

Los agregados naturales utilizados en la presente investigación proceden de la cantera denominada "La Poderosa" ubicada en el distrito de Uchumayo. Esta empresa cuenta con los permisos necesarios para la comercialización de agregados naturales. De este modo, garantiza la confiabilidad que cumple con los estándares mínimos depara la elaboración del concreto.



**Figura 57.** Ubicación de la cantera denominada LA PODEROSA

Fuente: Google Earth (2024)

##### **4.3.2.1. Análisis del agregado grueso**

Se llevó a cabo un análisis del agregado grueso utilizando una muestra de 27,722.0 gramos extraída de la cantera "La Poderosa", la cual fue empleada en todos los ensayos relacionados.

- Granulometría: Se realizó siguiendo el procedimiento especificado en la norma NTP 400.12:2013, con el propósito de determinar la

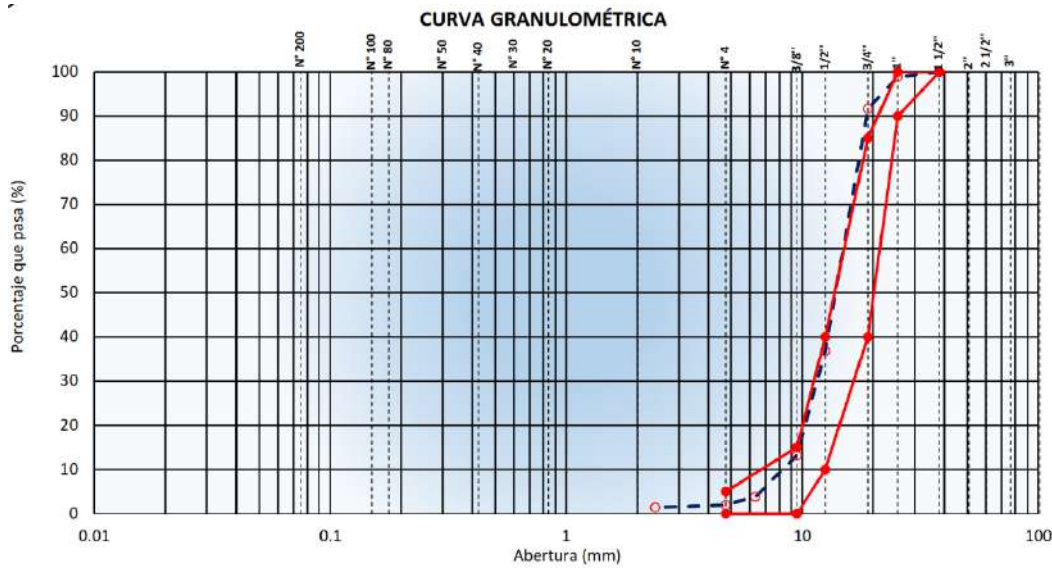


distribución de tamaño del agregado grueso (grava), obteniendo los siguientes resultados:

**Tabla 28**

*Granulometría del agregado grueso*

TAMIZ	ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO	% RETENIDO PARCIAL	% RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA	ESPECIF. ASTM C 33
5"	127.000					
4"	101.600					
3"	76.200					
2 1/2"	60.350					
2"	50.800					
1 1/2"	38.100				100	100
1"	25.400	305	1.1	1.1	98.9	90-100
3/4"	19.000	2019	7.3	8.4	91.6	40-85
1/2"	12.500	15190	54.8	63.2	36.8	10-40
3/8"	9.500	6554	23.6	86.8	13.2	0-15
1/4"	6.325	2598	9.4	96.2	3.8	
N°4	4.750	517	1.9	98.1	1.9	0-5
N°8	2.380	139	0.5	98.6	1.4	
N°10	2.000					
N°20	0.840					
N°40	0.425					
N°50	0.300					
N°100	0.150					
N°200	0.075					
< N°200	FONDO					



**Figura 58.** *Curva granulométrica del agregado grueso*

- **Peso unitario:** Se presentan los resultados del peso unitario del agregado fino en su estado suelto y compactado, siguiendo los criterios establecidos por la norma NTP 400.017.

**Tabla 29**

*Peso unitario suelto del agregado grueso*

MUESTRA	1	2	3
PESO MOLDE + MATERIAL	15432	15411	15415
PESO PROMEDIO		15419.3	
VOLUMEN DEL MOLDE		6340	
PESO DEL MOLDE		6471	
PESO UNITARIO (kg/m <sup>3</sup> )		1411.4	

**Tabla 30**

*Peso unitario compacto del agregado grueso*

MUESTRA	1	2	3
PESO MOLDE + MATERIAL	16491	16528	16510
PESO PROMEDIO		16509.7	
VOLUMEN DEL MOLDE		6340	
PESO DEL MOLDE		6471	
PESO UNITARIO (kg/m <sup>3</sup> )		1583.4	

- **Peso específico y absorción del agregado grueso:** con la técnica de la norma NTP 400.022, se obtuvo los siguientes resultados:

**Tabla 31**

*Peso específico y absorción del agregado grueso*

MUESTRA DMC-002		ARENA
A	Peso Mat. Sat. Su . Seca (En Aire) (gr.)	1301.6
B	Peso Frasco + H20 (gr)	1871.9
C	Peso Frasco + H20(gr) + A	3173.5
D	Peso del Material + H20 en el frasco (gr)	2697.7
E	Volumen de Masa + Volumen de Vacío = C-D (gr)	475.8
F	Peso de material Seco en estufa (105°C) (gr)	1292.8
G	Volumen de Masa = E-(A-F)(gr)	467
Peso Seco Material Bulk Base seca = F/E		2.717
Peso Seco Material Bulk (Base saturada) = A/E		2.736
Peso Seco Material Bulk Aparente (Base seca) = F/G		2.768
% de Absorción = ((A-F)/F) x 100		0.68%

- Características generales del agregado grueso

**Tabla 32**

*Características generales del agregado grueso*

Características del Agregado Grueso		
T.M.	:	3/4"
T.M.N.	:	3/4" a 3/8"
M.F.	:	6.9161
P.E.	:	2717 kg/m <sup>3</sup>
%W	:	1.042 Humedad

#### 4.3.2.2. Análisis del agregado fino

Se procedió a analizar las propiedades del agregado fino utilizando una muestra representativa de 805.6 gramos extraída de la cantera "La Poderosa".

Esta muestra fue sometida a una serie de ensayos exhaustivos en el laboratorio.

- Granulometría: el análisis se llevó a cabo siguiendo el procedimiento indicado en la norma NTP 400.12, El objetivo fue determinar la distribución del tamaño de las partículas del agregado grueso (grava). Los resultados obtenidos son los siguientes:

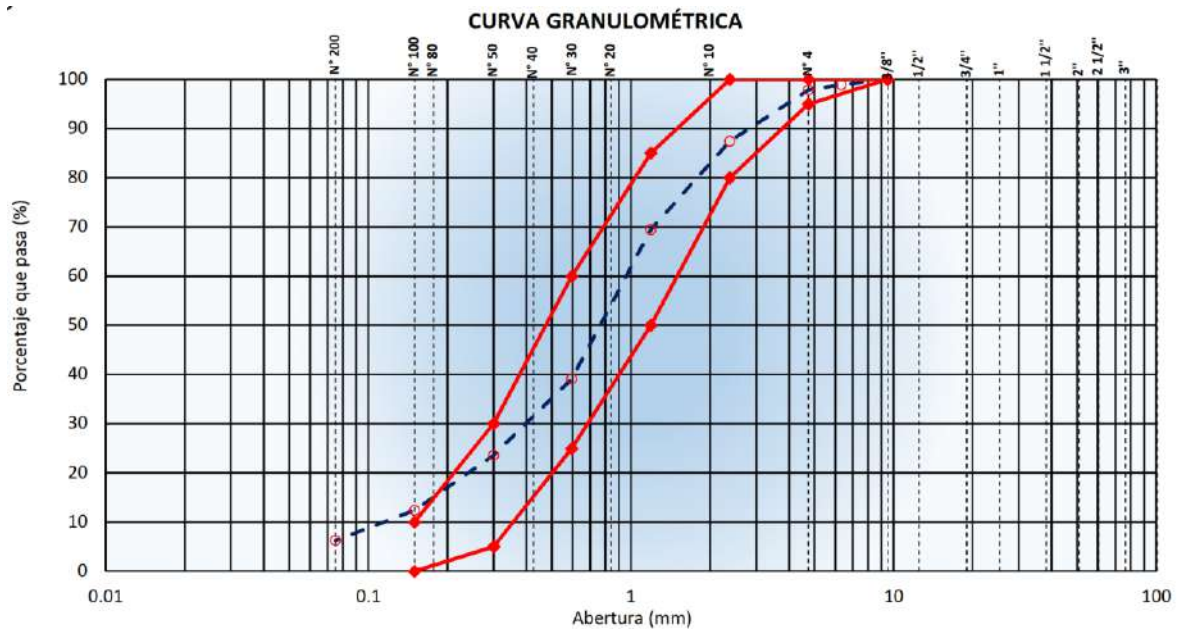
**Tabla 33**

*Granulometría del agregado fino*

TAMIZ	ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO	% RETENIDO PARCIAL	% RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA	ESPECIF. ASTM C 33
1"	25.400					
3/4"	19.000					
1/2"	12.500					
3/8"	9.500				100	100
1/4"	6.325	8.4	1	1	99	
N°4	4.750	8.8	1.1	2.1	97.9	95-100
N°8	2.380	84.3	10.5	12.6	87.4	80-100
N°10	2.000	0	0	12.6	87.4	
N°16	1.190	144.6	17.9	30.5	69.5	50-85
N°20	0.840	0	0	30.5	69.5	
N°30	0.595	244.5	30.4	60.9	39.1	25-60
N°40	0.425	0	0	60.9	39.1	
N°50	0.300	124.7	15.5	76.4	23.6	5-30
N°80	0.177	0	0	76.4	23.6	
N°100	0.150	90.6	11.2	87.6	12.4	0-10
N°200	0.075	49.3	6.1	93.7	6.3	
< N°200	FONDO	50.4	6.3	100	0	

**Tabla 34**

*Curva granulométrica del agregado fino*



- Características del agregado fino: se evaluó el agregado grueso conforme a las normas correspondientes de Tamaño Máximo y Tamaño Máximo Nominal, módulo de finura (NTP 400.012), y contenido de humedad (NTP 339.185), obteniendo los siguientes valores:

**Tabla 35**

*Características generales del agregado fino*

Características del Agregado Fino		
M.F.	:	2.701
P.E.	:	2627.0 kg/m <sup>3</sup>
%W	:	4.65 Humedad

- Peso unitario: Se muestra el resultado del peso unitario suelto y compactado del agregado fino de acuerdo a la norma NTP 400.017.

**Tabla 36***Peso unitario suelto del agregado fino*

MUESTRA	1	2	3
PESO MOLDE + MATERIAL	9346.0	9317.0	9338.0
PESO PROMEDIO		9333.7	
VOLUMEN DEL MOLDE		2110	
PESO DEL MOLDE		6123	
PESO UNITARIO (kg/m <sup>3</sup> )		1521.6	

**Tabla 37***Peso unitario compacto del agregado fino*

MUESTRA	1	2	3
PESO MOLDE + MATERIAL	9723.0	9747.0	9749.0
PESO PROMEDIO		9739.7	
VOLUMEN DEL MOLDE		2110.0	
PESO DEL MOLDE		6123.0	
PESO UNITARIO (kg/m <sup>3</sup> )		1714.1	

- Peso específico y absorción del agregado fino: con el procedimiento de la norma NTP 400.022, se obtuvo los siguientes resultados:

**Tabla 38***Peso específico y absorción del agregado fino*

MUESTRA DMC-002		ARENA
A	Peso Mat. Sat. Su . Seca (En Aire) (gr.)	300.8
B	Peso Frasco + H <sub>2</sub> O (gr)	656.4
C	Peso Frasco + H <sub>2</sub> O(gr) + A	957.2
D	Peso del Material + H <sub>2</sub> O en el frasco (gr)	845.0
E	Volumen de Masa + Volumen de Vacío = C-D (gr)	112.2
F	Peso de material Seco en estufa (105°C) (gr)	294.8
G	Volumen de Masa = E-(A-F)(gr)	106.2
Peso Seco Material Bulk Base seca = F/E		2.627
Peso Seco Material Bulk (Base saturada) = A/E		2.681
Peso Seco Material Bulk Aparente (Base seca) = F/G		2.776
% de Absorción = ((A-F)/F) x 100		2.035%

En la tabla 38, se muestra los datos resumidos que fueron obtenidos anteriormente.

**Tabla 39***Cuadro resumen de las características de los agregados*

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	GRAVA	ARENA
Peso Específico	(kg/m <sup>3</sup> )	2717.0	2627.0
Peso Unitario Suelto	(kg/m <sup>3</sup> )	1411.4	1521.6
Peso Unitario Compacto	(kg/m <sup>3</sup> )	1583.4	1714.1
Contenido de humedad	(%)	1.042	4.650
Absorción	(%)	0.681	2.035
Módulo de Fineza		6.961	2.701
Módulo de Fineza Combinado		4.715	

**4.3.3. Diseño de mezcla**

El diseño de la mezcla de concreto se llevó a cabo utilizando el método del American Concrete Institute (ACI). Este enfoque permitirá determinar la dosificación adecuada del concreto para la presente investigación. Es fundamental tener en cuenta los siguientes parámetros para asegurar la precisión y efectividad del diseño.

**Tabla 40***Parámetros inicial para el diseño de mezcla*

Descripción	Valor
Resistencia a la compresión	$f_{c'} = 300 \text{ kg/cm}^2$
Cemento	Yura Portland Tipo I
Tamaño Máximo Nominal (pulgadas)	3/4" a 3/8"
Tamaño Máximo (pulgadas)	3/4"
Asentamiento Slymp (pulgadas)	3" - 4"
Relación agua/cemento	0.45

Los porcentajes necesarios para determinar el volumen de agregados se establecieron utilizando el método ACI, resultando en un 53% para el agregado fino y un 47% para el agregado grueso. Estos porcentajes provienen del balance entre los agregados fino y grueso, que el ACI sugiere para maximizar la compacidad y minimizar los vacíos en la mezcla, logrando así una distribución



óptima. Con estos datos en mano, se puede proceder con el desarrollo del diseño de la mezcla de concreto, destinada a alcanzar una resistencia de  $f'c=300\text{kg/cm}^2$ .

#### 4.3.3.1. Valores de diseño

En primer lugar, se estima la cantidad de agua necesaria, que es de 205.0 litros por metro cúbico de concreto, considerando un valor teórico de 2% de aire incluido, según la tabla 41. Esta tabla proporciona la cantidad aproximada de agua en función del asentamiento (slump) y el tamaño máximo del agregado. Estos parámetros son esenciales para asegurar la trabajabilidad y las propiedades deseadas del concreto fresco, optimizando así su desempeño durante la aplicación y la durabilidad estructural.

**Tabla 41**

*Cantidad aproximada de agua para diferentes slump, tamaño máximo de agregado y cantidad de aire*

Slump	Tamaño máximo de agregado							
	3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/2"	2"	3"	4"
Concreto sin aire incorporado								
1" a 2"	207	199	190	179	166	154	130	113
3" a 4"	228	216	205	193	181	169	145	124
6" a 7"	243	228	216	202	190	178	160	-
% Aire atrapado	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2
Concreto con aire incorporado								
1" a 2"	181	175	168	160	150	142	122	107
3" a 4"	202	193	184	175	165	157	133	119
6" a 7"	216	205	197	184	174	166	154	-
% de Aire incorporado en función del grado de exposición								
Normal	4.5	4	3.5	3	2.5	2	1.5	1
Moderada	8	5.5	5	4.5	4.5	4	3.5	3
Extrema	7.5	7	6	6	5.5	5	4.5	4

Fuente: AASTHO (1993)

El procedimiento de determinación de valores del diseño son los siguiente:

Agua de mezclado : 205.0 lt/m<sup>3</sup> → 0.205 m<sup>3</sup>

Aire atrapado : 2.0 % → 0.020 m<sup>3</sup>

Contenido de cemento :  $205 \div 0.45 = 455.56 \text{ kg}$  → 0.145 m<sup>3</sup>

Volumen = 0.370 m<sup>3</sup>

Se establece que el volumen total ocupado por el agua, el aire y el cemento es de 0.370 metros cúbicos. Por lo tanto, el volumen restante para completar un metro cúbico, que es de 0.630 metros cúbicos, se asigna a los agregados. Este volumen se distribuye de acuerdo con los porcentajes previamente determinados para el agregado fino y el agregado grueso.

Agregado grueso	:	$47\% \times 0.630 =$	$0.2961 \text{ m}^3$	$\rightarrow$	$804.4 \text{ kg}$
Agregado fino	:	$53\% \times 0.630 =$	$0.3339 \text{ m}^3$	$\rightarrow$	$877.0 \text{ kg}$
Volumen	=	$0.6300 \text{ m}^3$			

En resumen, se muestra los resultados preliminares del diseño de mezcla de concreto de  $f'c=300 \text{ Kg/ cm}^2$

Cemento	:	$455.56 \text{ kg/m}^3$
Agua	:	$205.00 \text{ kg/m}^3$
Agregado grueso	:	$804.40 \text{ kg/m}^3$
Agregado fino	:	$877.00 \text{ kg/m}^3$
Peso unitario	:	$2342.00 \text{ kg/m}^3$

#### **4.3.3.1.1. Corrección de humedad y absorción**

Después de obtener los datos preliminares sobre las dosificaciones del diseño de la mezcla, se inicia el proceso de corrección por humedad y absorción de los agregados. Se ha determinado que el contenido de humedad del agregado grueso es del 1.042% y su absorción es del 0.681%. Por otro lado, el agregado fino presenta un contenido de humedad del 4.650% y una absorción del 2.035%. Estas correcciones resultan fundamentales para ajustar las proporciones de los materiales y asegurar la coherencia y calidad del concreto final. La presencia de agua en los agregados puede tener un impacto significativo en la trabajabilidad y



las propiedades mecánicas del concreto. A continuación, se expone el procedimiento detallado para la corrección de humedad y absorción.

$$\text{Agregado grueso} : 804.40 \text{ kg/m}^3 \times 1.01042 = 812.80 \text{ kg/m}^3 \rightarrow 2.9 \text{ lt}$$

$$\text{Agregado fino} : 877.00 \text{ kg/m}^3 \times 1.04650 = 917.80 \text{ kg/m}^3 \rightarrow 22.9 \text{ lt}$$

Entonces:

$$\text{Agua efectiva} : 205.0 \text{ lt/m}^3 - 25.8 \text{ lt/m}^3 = 179.2 \text{ lt/m}^3$$

Luego de realizar la corrección de la humedad y absorción de los agregados se obtiene los siguientes resultados por metro cúbico:

$$\text{Cemento} : 455.56 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Agua} : 179.20 \text{ lt/m}^3$$

$$\text{Agregado grueso} : 812.8 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Agregado fino} : 917.80 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Peso unitario} : \mathbf{2365.36 \text{ kg/m}^3}$$

#### **4.3.3.2. Peso por una bolsa de cemento**

Se detallan minuciosamente los pesos de los agregados y el volumen de agua necesarios para la elaboración de una bolsa de cemento. Este enfoque tiene como objetivo facilitar el proceso de dosificación, permitiendo una manipulación más sencilla y precisa de los materiales.

Para llevar a cabo este proceso, es necesario obtener un factor de unidad de cemento. Este factor se calcula dividiendo el peso del cemento utilizado por el peso de la bolsa comercial de cemento, que es de 10.72 kg por bolsa, luego se divide con los demás materiales.

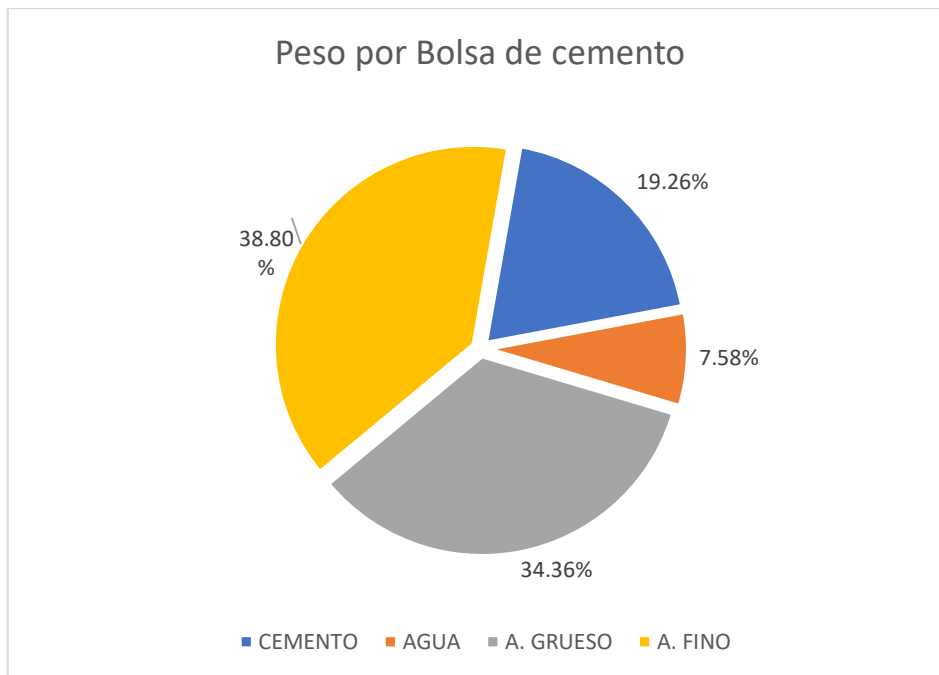
$$\text{Cemento} : 455.56 \text{ kg} \div 10.72 = 42.50 \text{ kg/bl}$$

$$\text{Agua} : 179.20 \text{ kg} \div 10.72 = 16.72 \text{ lt/bl}$$

$$\text{Agregado grueso} : 812.80 \text{ kg} \div 10.72 = 75.83 \text{ kg/bl}$$

Agregado fino :  $917.80 \text{ kg} \div 10.72 = 85.62 \text{ kg/bl}$

**Peso total = 220.67 kg/bl**



**Figura 59.** *Peso de componentes en porcentaje*

En términos de proporciones, la cantidad de agua representa aproximadamente el 7.57% del peso total de la mezcla, mientras que el agregado grueso y el agregado fino constituyen alrededor del 34.36% y 38.80% del peso total, respectivamente. Estas proporciones son fundamentales para lograr la resistencia, la trabajabilidad y otras propiedades deseadas en el concreto final.

#### **4.3.3.3. Concreto con geopolímero.**

El geopolímero es un material cementicio, elaborado a base de materiales tales como cenizas volantes, el cual reacciona a raíz de la combinación de hidróxido y silicato de sodio en distintas proporciones. Este geopolímero según las investigaciones revisadas tiene la función similar a la de un cemento portland convencional. Según la investigación realizada por Singh et al., (2023), menciona que la mayor resistencia a la compresión (52,15 MPa), flexión (5.81 MPa) y tracción dividida (5.23 Mpa) fue exhibida por el concreto geopolímero con una

relación de sustitución de **cemento por cenizas volantes (25%)**, escoria de alto horno granulada molida (50%) y humo de sílice (15%).

Por lo tanto, en base a la investigación mencionada, en el presente proyecto se tomarán los porcentajes reemplazo de 20, 25 y 30% de geopolímero respecto al peso del cemento en el diseño de mezcla, de tal forma que se tendrá una mezcla de cemento, geopolímero, arena, piedra chancada y agua, la cual se denominará concreto con geopolímero y que será analizada para determinar la influencia en la metodología Whitetopping.

#### **4.3.3.4. Reemplazo de geopolímero**

Para finalizar el diseño, se calcula el peso del geopolímero, en base a los porcentajes planteados inicialmente en la muestra de la presente investigación siendo 20%, 25% y 30%, a continuación, se detalla los resultados.

Peso del cemento	: 42.5 kg/bl
20% de geopolímero	: $42.5 \times 0.20 = 8.50$ kg/bl
25% de geopolímero	: $42.5 \times 0.25 = 10.63$ kg/bl
30% de geopolímero	: $42.5 \times 0.30 = 12.75$ kg/bl

#### **4.3.4. Resultado de dosificación por tipo de concreto**

En la tabla 42 se encuentran registradas las dosificaciones del concreto estándar, así como del concreto con porcentajes de reemplazo de geopolímero del 20%, 25% y 30% en relación con el cemento. Estos datos proporcionan información detallada sobre la proporción de cemento, agua, agregado grueso y agregado fino utilizados en cada dosificación, lo que permite evaluar la influencia del geopolímero en la formulación de la mezcla y su impacto en la resistencia, trabajabilidad y sostenibilidad del concreto.

**Tabla 42***Dosificación de materiales por tipo de concreto*

Tipo de concreto	Cemento	Agua	Agregado grueso	Agregado fino	Geopolímero
	kg	lt	kg	kg	kg
Concreto Patrón	42.50	16.72	75.83	85.62	-
Concreto con 20% de geopolímero	34.00	16.72	75.83	85.62	8.50
Concreto con 25% de geopolímero	31.87	16.72	75.83	85.62	10.63
Concreto con 30% de geopolímero	29.75	16.72	75.83	85.62	12.75

Se evidencia una relación directamente proporcional entre el volumen de geopolímero y el volumen de cemento en las dosificaciones analizadas. Esto sugiere que a medida que aumenta el porcentaje de reemplazo de cemento por geopolímero, disminuye el volumen de cemento utilizado en la mezcla. Además, se destaca que la dosificación del diseño de mezcla, en términos de agua, agregado fino y agregado grueso, se mantiene constante, ya que el efecto del geopolímero se limita solamente al cemento. Este conocimiento detallado sobre las interacciones entre los materiales permite optimizar el diseño de mezcla y garantizar un desempeño óptimo del concreto en la aplicación de Thin Whitetopping.

### **4.3.5. Proceso de geopolimerización**

#### **4.3.5.1. Cenizas volantes**

**Tabla 43.**

*Composición química de la Ceniza volante*

Composición	Ceniza volante Ilo
CaO	3.44
SiO <sub>2</sub>	51.6
Al O <sub>23</sub>	20.5
Fe O <sub>23</sub>	6.69
MgO	1.58
K O <sub>2</sub>	2.01
Na O <sub>2</sub>	2.4
TiO <sub>2</sub>	0.919
P205	0.145

La tabla 43 presenta la composición química del material precursor del geopolímero, se consideran de gran importancia porque de estos depende la reacción con la solución alcalina planteada. Cabe resaltar que el certificado de estos datos se encuentra en la parte de anexos.

#### **4.3.5.2. Solución alcalina y agua**

El activador alcalino utilizado en este estudio está compuesto por hidróxido de sodio y silicato (SiO<sub>2</sub> = 29%, H<sub>2</sub> O= 55,9%, y Na<sub>2</sub> O= 13,7% en peso) (Cheah et al., 2015). La solución alcalina se preparó a partir de una probeta de laboratorio, la cual fue proporcionada por el laboratorio INGECNSA después de ser disueltos en agua durante 24 h (Figurax). Cabe resaltar que la solución alcalina ya forma parte del agua de la mezcla.



**Figura 60.** *Preparación de una solución alcalina a partir de hidróxido de sodio y gránulos de silicato.*

#### **4.3.5.3. Proporción de la mezcla**

El diseño de la mezcla se desarrolló con el objetivo de cumplir con los estándares del grado de concreto con geopolímero  $f'_c=300$  kg/cm<sup>2</sup>. Al no existir una norma peruana que rijá parámetros de utilización de geopolímeros, para el desarrollo del mismo se tomó en cuenta el artículo científico de Sathvik (2023), en el cual se desarrolla el material planteado en esta investigación. Este diseño se planteó para alcanzar una resistencia a la compresión de  $f'_c=300$  kg/cm<sup>2</sup> y una trabajabilidad del 3-4" tal como se estableció en el diseño. Los parámetros utilizados para preparar el geopolímero fueron los siguientes

La finura de la ceniza volante se describió en términos de superficies específicas, como activadores alcalinos se emplearon hidróxido sódico y silicato sódico. Además, se evaluaron diferentes concentraciones de hidróxido de sodio,

la relación en masa entre el hidróxido de sodio y el silicato de sodio se estableció en 1,0. Y para la mezcla de materiales, se utilizaron las siguientes proporciones: 400 kg/m<sup>3</sup> de cenizas volantes, 60 kg/m<sup>3</sup> de hidróxido sódico y silicato sódico, 60 kg/m<sup>3</sup>.

#### 4.4 Propiedades físicas

En esta sección se explicará el procedimiento, así como los resultados obtenidos dando cumplimiento el tercer objetivo planteado



**Figura 61.** Diagrama de flujo para el análisis de características físicas del concreto.

En esta sección se explicará el procedimiento, así como los resultados obtenidos dando en cumplimiento el objetivo N° 3, el cual sirve para analizar las características físicas del concreto en sus diferentes dosificaciones.

##### 4.4.1. Preparación de mezcla.

Para poder realizar una evaluación física, primeramente, se tuvo que preparar la mezcla en dosificaciones ya establecidas, las cuales fueron: concreto patrón y concretos con geopolímero a un 20, 25 y 30% de reemplazo de cemento.

En la figura 68 se pueden ver lo materiales e instrumentos utilizados para la preparación de la mezcla.



**Figura 62.** *Materiales e instrumentos utilizados*

Posteriormente se procedieron a mezclar todos los materiales previamente establecidos en el diseño de mezclas, cabe resaltar que, para cada porcentaje de reemplazo de cemento, se estableció un diferente proceso.





**Figura 63.** Proceso de mezcla fecha 02 y 16 de mayo del 2023

#### **4.4.2. Llenado del cono de Abrahams**

Quando ya se tiene la mezcla lista, se procede a realizar la prueba de Slump, la cual consta de llenar un cono de Abrahams en tres capas, cada una con 25 golpes. Tal como se muestra en la Figura 70.



**Figura 64.** Llenado del cono de Abrahams

Retiro vertical del molde y medida de diferencia de altura

Una vez hecho el procedimiento de llenado se procede a retirar el cono para que la mezcla interior asiente libremente. Ver figura 71



**Figura 65.** Retiro del cono de Abrahams

Como paso final, se registra la diferencia de altura entre la base del molde y la superficie del concreto asentado para calcular el asentamiento, según lo presentado en la Tabla N° 44.

**Tabla 44**

*Medida de asentamiento del concreto (Slump)*

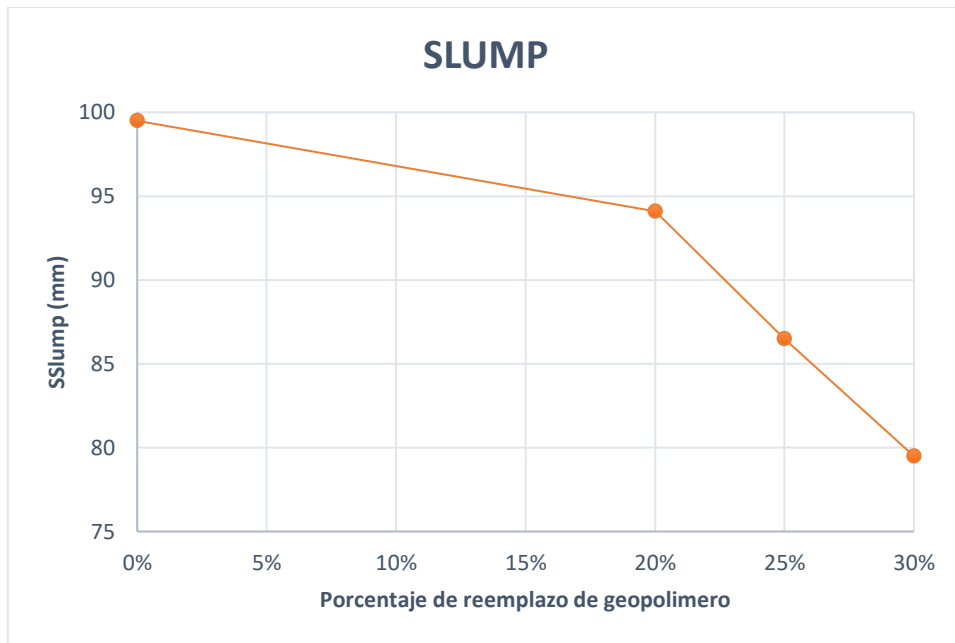
N° DE MEZCLA	NOMENCLATURA	ASENTAMIENTO	
		(MM)	PULGADAS
1	Concreto Patrón	99.5	3.11"
2	Concreto con reemplazo de 20% de geopolimero.	94.1	3.39"
3	Concreto con reemplazo de 25% de geopolimero.	86.5	3.7"
4	Concreto con reemplazo de 30% de geopolimero.	79.5	3.96"



**Figura 66.** *Medición de la diferencia de altura (con porcentajes de 20% y 25% de geopolímero)*

Tal como se explicó anteriormente, el procedimiento indicado se realizó tanto para el concreto patrón, y para los concretos con reemplazo de geopolímero del 20, 25 y 30% respecto al cemento. Los resultados para cada tipo de asentamiento respecto a cada dosificación se muestran en la Tabla 44.

Tal como se puede observar en la tabla la tendencia expuesta tiene una tendencia de reducción de trabajabilidad, lo cual significa que mientras más reemplazo haya de geopolímero por cemento se tendrá una menor trabajabilidad de la mezcla. En la figura 73 se muestra la tendencia representada en un gráfico para un mejor entendimiento.



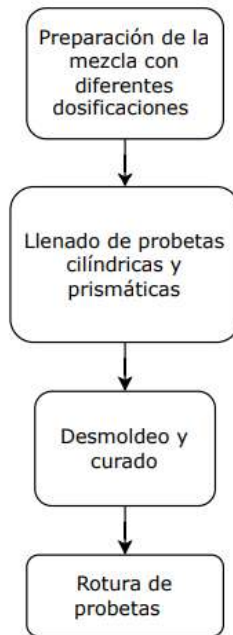
**Figura 67.** Representación de porcentaje de geopolímero con su respectivo slump.

Tal como se puede apreciar existe una tendencia marcada respecto a las dosificaciones y su asentamiento. Por lo que se concluye que mientras exista más reemplazo de geopolímero por cemento, menor será la trabajabilidad.

Cabe resaltar que las 4 muestras tomadas cumplieron con el asentamiento establecido en el diseño de mezclas.

#### **4.5 Propiedades mecánicas**

En esta sección se explicará el procedimiento, así como los resultados obtenidos dando cumplimiento al cuarto. objetivo planteado



**Figura 68.** *Diagrama de flujo para el análisis de características mecánicas del concreto.*

Para el cumplimiento del objetivo N° 4 relacionado con el análisis de las características mecánicas del concreto con geopolímero, se siguió el procedimiento mencionado en la figura 74. De tal forma que en esta sección se mencionara el procedimiento realizado, así como los resultados obtenidos.

#### **4.5.1. Preparación de mezclas con diferentes dosificaciones.**

En base al diseño de mezclas se elaboraron diferentes cantidades de concreto, dependiendo del porcentaje de reemplazo. Es así que en la se mostraran los procedimientos realizados, tanto en el proceso de dosificación como de mezcla.

En la figura 75 se puede visualizar el procedimiento empleado del reemplazo y mezcla del geopolímero.





**Figura 69.** Mezcla de cemento con geopolímero

Posteriormente se hizo la dosificación de los materiales necesarios de acuerdo al diseño de mezclas.



**Figura 70.** Materiales utilizados para una determinada dosificación

Al tener ya los materiales en sus dosificaciones exactas, se procede a realizar la mezcla, asegurando que todos los componentes se integren de manera homogénea para obtener una mezcla uniforme y consistente..

#### **4.5.2. Llenado y preparación de probetas cilíndricas y prismáticas.**

Al tener ya la mezcla de cada dosificación se realiza la preparación tanto de las probetas cilíndricas como prismáticas, para posteriormente curarlas y someterlas a cargas axiales para conocer su resistencia.

En primer lugar, se aplica un recubrimiento interior de petróleo en los moldes para prevenir que la mezcla se adhiera a sus superficies, como se ilustra en la Figura 77.



**Figura 71.** *Proceso de limpieza y recubrimiento de petróleo de los moldes*





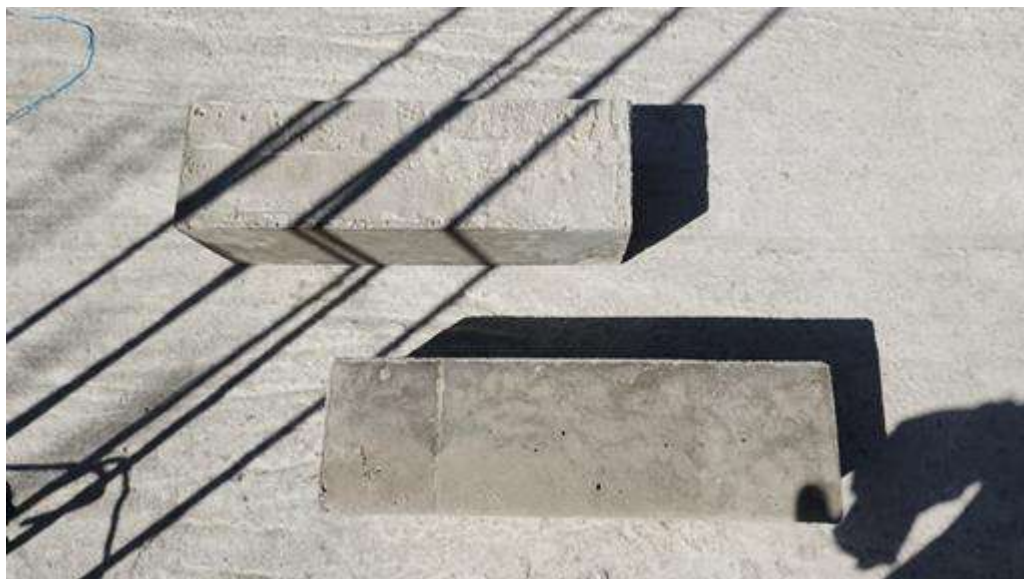
**Figura 72.** *Proceso de moldeado de probetas cilíndricas*

#### **4.5.3. Desmoldeo y curado.**

Al tener ya las probetas realizadas, se procede a desmoldear y también a realizar el curado, de acuerdo a la NTP 339.034:2014.



**Figura 73.** *Probetas cilíndricas desmoldadas*



**Figura 74.** *Probetas prismáticas desmoldadas*





**Figura 75.** *Extracción de las probetas, luego del proceso de curado.*

#### **4.5.4. Rotura de probetas.**

Como parte final de este proceso, al ya tener las probetas cilíndricas y prismáticas, se procede a realizar las roturas, lo cual consiste en la aplicación de cargas axiales, las cuales, al llegar a una carga máxima, hacen fallar a las muestras, quienes podrían llegar a diversos tipos de fallas. De esta forma se conocerá si el diseño de mezclas y las probetas cumplen con lo premeditado en este proyecto.

Los ensayos de laboratorio se realizaron en el laboratorio INGECONSA LAB MGM S.R.L., ubicada en la Avenida Sepulveda número 522 en el distrito de Miraflores, provincia y departamento de Arequipa, para garantizar la precisión de los resultados. Las probetas se ensayaron bajo condiciones controladas, con equipos certificados y calibrados, siguiendo procedimientos estandarizados y bajo supervisión especializada.



**Figura 76.** Marca de la máquina de ensayo para compresión



**Figura 77.** *Probeta del concreto patrón próxima a ser colocada en la máquina.*



**Figura 78.** *Probetas próximas a ser ensayadas*



**Figura 79.** Valor de compresión de una probeta.

#### **4.5.5. Resistencia a la compresión**

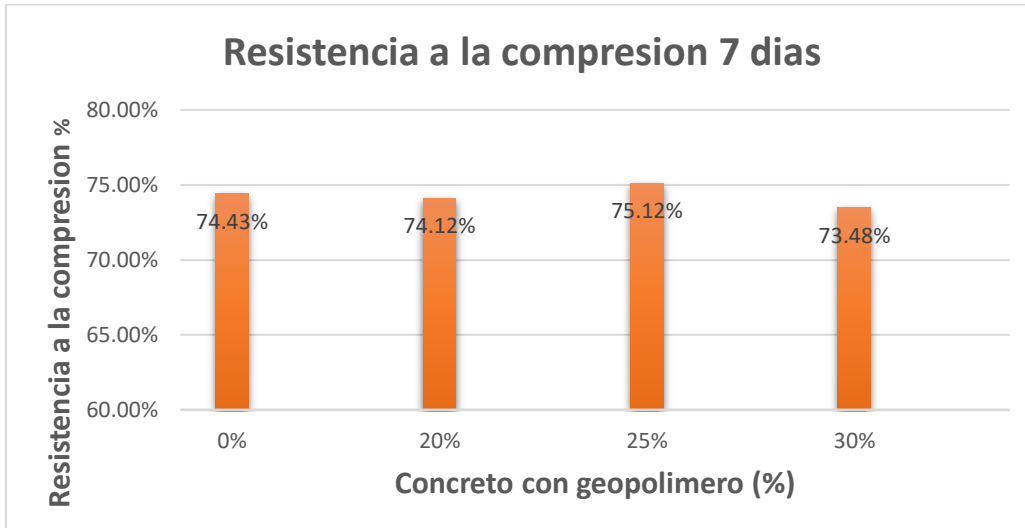
Finalmente, luego de haber sometido las 24 probetas a cargas axiales, en sus diferentes edades, tales como 7, 14 y 28 días, se obtienen los siguientes resultados. Ver Tabla 45.

**Tabla 45**

*Resultados de la resistencia a la compresión a los 7 días*

MUESTRA	ELEMENTO	EDAD	RESISTENCIA (KG/CM2)	RESISTENCIA PROMEDIO	RESISTENCIA PROMEDIO EN PORCENTAJE
P1A	CONCRETO PATRON	7 DIAS	224.30	223.30	74.43%
P2B	CONCRETO PATRON	7 DIAS	222.30		
P3C	CONCRETO CON 20% DE GEOPOLIMERO	7 DIAS	221.70	222.35	74.12%
	CONCRETO CON 20% DE GEOPOLIMERO		223.00		
P4D	CONCRETO CON 25% DE GEOPOLIMERO	7 DIAS	223.00	225.35	75.12%
P5A	CONCRETO CON 25% DE GEOPOLIMERO	7 DIAS	225.50		
P6B	CONCRETO CON 30% DE GEOPOLIMERO	7 DIAS	225.20	220.45	73.48%
	CONCRETO CON 30% DE GEOPOLIMERO		220.20		

Nota: El porcentaje de resistencia promedio se calcula comparando la resistencia de diseño con la resistencia alcanzada en los distintos días de ensayo.



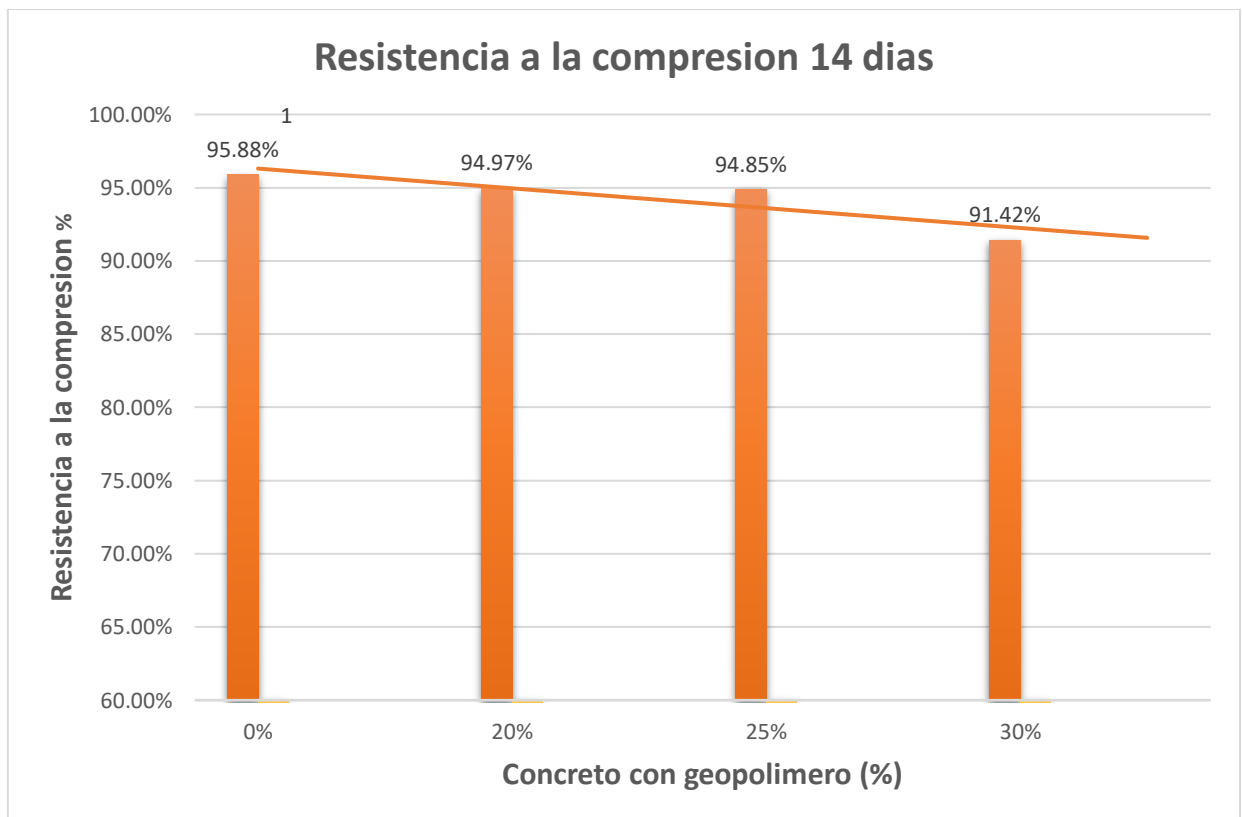
**Figura 80.** Resistencia promedio de compresión, 07 días

Según la Figura 86, se puede ver que tanto las dosificaciones de concreto patron, así como las muestras con reemplazo de 20, 25 y 30% de geopolimero respecto al cemento tienen resistencias de entre 73 y 75%. Lo cual indica que el reemplazo de concreto geopolimero no afecta en gran cantidad resistencia para la cual las probetas fueron diseñadas. Por lo que hasta el momento se concluye que el reemplazo de geopolimero por cemento mantiene la resistencia a los siete días de prueba.

**Tabla 46**

*Resultados de la resistencia a la compresión a los 14 días*

MUESTRA	ELEMENTO	EDAD	RESISTENCIA A (KG/CM2)	RESISTENCIA PROMEDIO	RESISTENCIA PROMEDIO EN PORCENTAJE
P1A	CONCRETO PATRON	14 DIAS	289.20	287.65	95.88%
P2B	CONCRETO PATRON	14 DIAS	286.10		
P3C	CONCRETO CON 20% DE GEOPOLIMERO	14 DIAS	282.90	284.90	94.97%
P4D	CONCRETO CON 20% DE GEOPOLIMERO	14 DIAS	286.90		
P5A	CONCRETO CON 25% DE GEOPOLIMERO	14 DIAS	287.20	284.55	94.85%
P6B	CONCRETO CON 25% DE GEOPOLIMERO	14 DIAS	281.90		
P7C	CONCRETO CON 30% DE GEOPOLIMERO	14 DIAS	272.90	274.25	91.42%
P8D	CONCRETO CON 30% DE GEOPOLIMERO	14 DIAS	275.60		



**Figura 81.** Resistencia promedio de compresión, 14 días

Según la figura 87, se puede ver que tanto las dosificaciones de concreto patron, así como las muestras con reemplazo de 20 y 25% de geopolimero

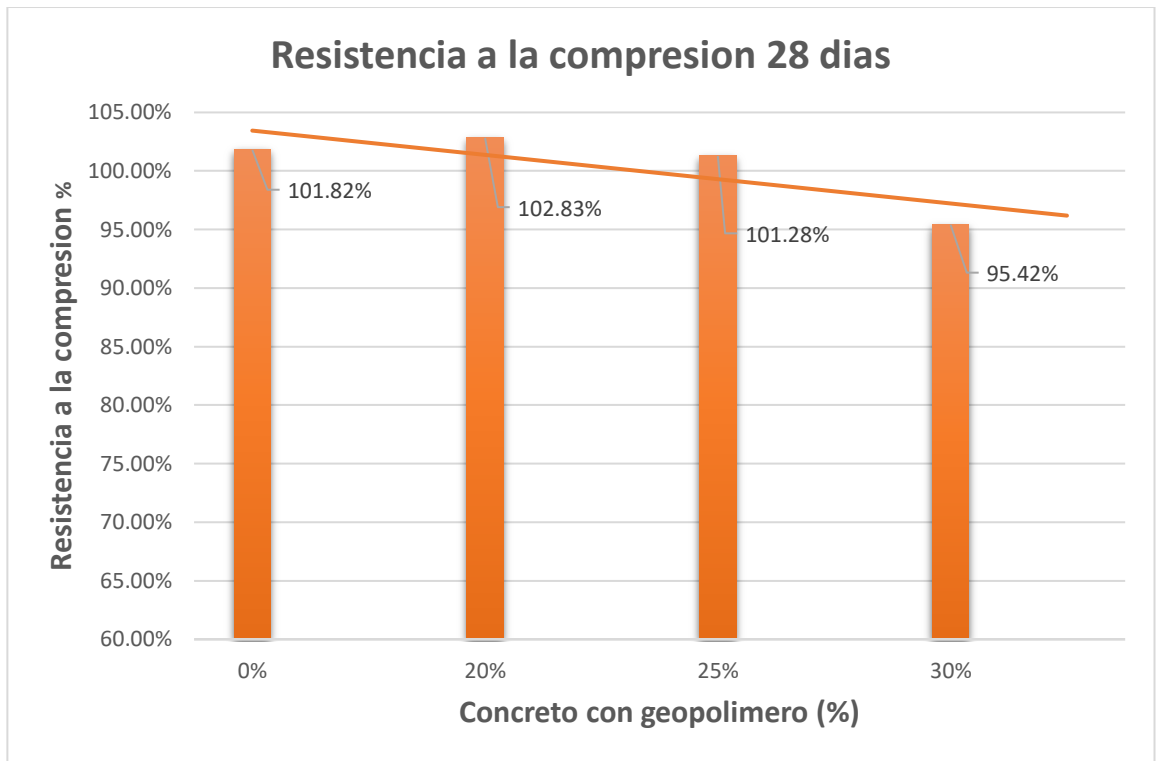
respecto al cemento tienen resistencias de entre 94 y 95%. Lo cual indica que el reemplazo de concreto geopolimero no afecta en gran cantidad resistencia para la cual las probetas fueron diseñadas, además que no es una diferencia significativa. Por otro lado se puede observar que el concreto con geopolimero a un 30% ya presenta una diferencia más marcada con respecto a las demás muestras. De tal forma que por los resultados obtenidos a los 14 días, se concluye que mientras más geopolimero se reemplace, la resistencia podría tender a la reducción.

**Tabla 47**

*Resistencia promedio del ensayo a la compresión, 28 días*

MUESTRA	ELEMENTO	EDAD	RESISTENCIA (KG/CM <sup>2</sup> )	RESISTENCIA PROMEDIO	RESISTENCIA PROMEDIO EN PORCENTAJE
P1A	CONCRETO PATRON	28 DIAS	306.39	305.45	101.82%
P2B	CONCRETO PATRON	28 DIAS	304.40		
P3C	CONCRETO CON 20% DE GEOPOLIMERO	28 DIAS	309.60	308.50	102.83%
P4D	CONCRETO CON 20% DE GEOPOLIMERO	28 DIAS	307.40		
P5A	CONCRETO CON 25% DE GEOPOLIMERO	28 DIAS	305.20	303.85	101.28%
P6B	CONCRETO CON 25% DE GEOPOLIMERO	28 DIAS	302.50		
P7C	CONCRETO CON 30% DE GEOPOLIMERO	28 DIAS	286.50	286.25	95.42%
P8D	CONCRETO CON 30% DE GEOPOLIMERO	28 DIAS	286.00		



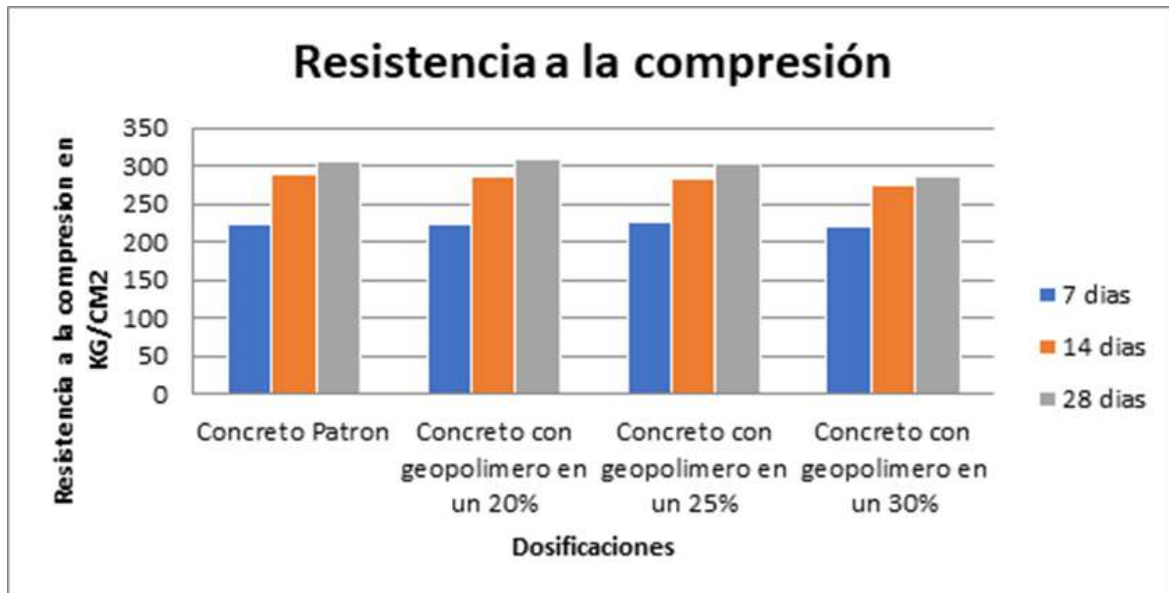


**Figura 82.** Resistencia a la compresión a los 28 días del concreto con geopolímero

Según la figura 88, se puede ver que tanto las dosificaciones de concreto patron, así como las muestras con reemplazo de 20 y 25% de geopolimero respecto al cemento tienen resistencias de entre 101% y 102%, cumpliendo la resistencia para lo cual fueron diseñados. Por otro lado se evidencia que el concreto con geopolimero a un 30% no alcanzó la resistencia, por lo tanto se concluye que al reemplazar mayor cantidad de geopolimero reduce la resistencia del concreto. Cabe resaltar que esta variación de resistencia puede darse por distintos factores, tales como la molaridad de activadores alcalinos empleados en este estudio, la cantidad de hidróxido y silicato utilizado, el curado, entre otros factores que se definirán más adelante.



Finalmente, se presentara en la figura 89 el resumen de los promedios de las resistencias obtenidas para todas las dosificaciones planteadas respecto a los periodos de evaluacion tales como 7, 14 y 28 dias.



**Figura 83.** Cuadro resumen de ensayo de resistencia a la compresión

Es así que la interpretación de los resultados para la resistencia a la compresión, es la siguiente.

#### 1. Evolución de la Resistencia

- Todos los tipos de concreto muestran un incremento en la resistencia a la compresión con el tiempo.

- La mayor parte del incremento ocurre entre los 7 y 14 días, con un incremento adicional más leve entre los 14 y 28 días.

#### 2. Comparación entre Mezclas:

- A los 7 días: Todas las mezclas tienen resistencias muy similares, con valores entre 220.45 y 225.35. La mezcla con 25% de geopolímero muestra la mayor resistencia.

- A los 14 días: Las diferencias siguen siendo mínimas. El concreto patrón muestra la mayor resistencia (287.65), seguido muy de cerca por las mezclas con 20% y 25% de geopolímero.

- A los 28 días: La mezcla con 20% de geopolímero alcanza la mayor resistencia (308.50), superando al concreto patrón (305.45). La mezcla con 30% de geopolímero muestra la menor resistencia (286.25).

Por lo tanto se concluye lo siguiente:

- Efectividad del Geopolímero: La adición de geopolímero en un 20% parece ser óptima, ya que esta mezcla muestra una resistencia a la compresión ligeramente superior al concreto patrón a los 28 días. Pero también cabe resaltar que la muestra con reemplazo de 25% de geopolímero, cumple con la resistencia de diseño.

- Cantidad de Geopolímero: Aumentar la cantidad de geopolímero al 30% parece disminuir la resistencia a la compresión a largo plazo, lo cual puede indicar una posible disminución en la calidad o cohesión del concreto con mayor contenido de geopolímero.

- Recomendación: Para mantener o mejorar la resistencia a la compresión sin deteriorar la calidad del concreto, una adición de hasta el 25% de geopolímero parece ser efectiva, siendo el 20% la mezcla óptima en este caso específico por la resistencia obtenida. Pero en el contexto de reducción de cemento, la óptima será la muestra con reemplazo de 25% de geopolímero.

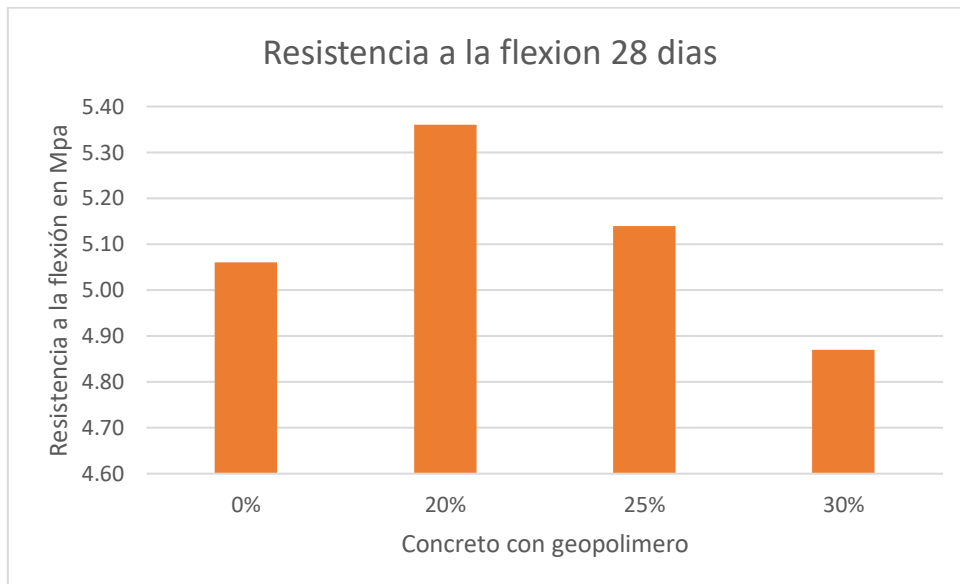
#### **4.5.6. Resistencia a la flexión**

Finalmente, luego de haber sometido las 4 probetas prismáticas a cargas axiales, a los 28 días, se obtienen los siguientes resultados

**Tabla 48**

*Resistencia a la flexión de los 28 días*

MUESTRA	ELEMENTO	EDAD	RESISTENCIA PROMEDIO (Mpa)
P25A	CONCRETO PATRON	28 DIAS	5.06
P26B	CONCRETO CON 20% DE GEOPOLIMERO	28 DIAS	5.36
P27C	CONCRETO CON 25% DE GEOPOLIMERO	28 DIAS	5.14
P29D	CONCRETO CON 30% DE GEOPOLIMERO	28 DIAS	4.87



**Figura 84.** *Gráfico de resistencia a la flexión de 28 días*

Se puede visualizar que existe diversas variaciones respecto a la dosificación y resistencia a la flexión alcanzada. De tal forma, se concluye que el concreto con un reemplazo de 20% de geopolimero por cemento, es la muestra que mejor resultados a flexión obtuvo, siendo 5.36 Mpa.

La resistencia a la flexión del concreto en Thin Whitetopping es un aspecto crítico que debe ser cuidadosamente especificado y verificado para asegurar el éxito y la durabilidad del pavimento. Generalmente, se busca una resistencia a la flexión en el rango de 4.5 a 6.0 MPa, ajustándose según las condiciones específicas del tráfico y el entorno.

La recomendación de una resistencia a la flexión en el rango de 4.5 a 6.0 MPa para Thin Whitetopping se basa en una combinación de normas de prueba de resistencia (como ASTM C78/C78M), guías de diseño de la Federal Highway Administration (FHWA) y la American Concrete Pavement Association (ACPA), y estudios de casos prácticos. Estas fuentes combinadas proporcionan una base sólida para establecer especificaciones que aseguren la durabilidad y el desempeño del pavimento bajo condiciones de uso real.

#### **4.5.7. Resistencia a la tracción simple**

Finalmente, luego de haber sometido 24 probetas cilíndricas en sección transversal a cargas axiales, de 7 días, 14 días y 28 días, se obtienen los siguientes resultados:

**Tabla 49**

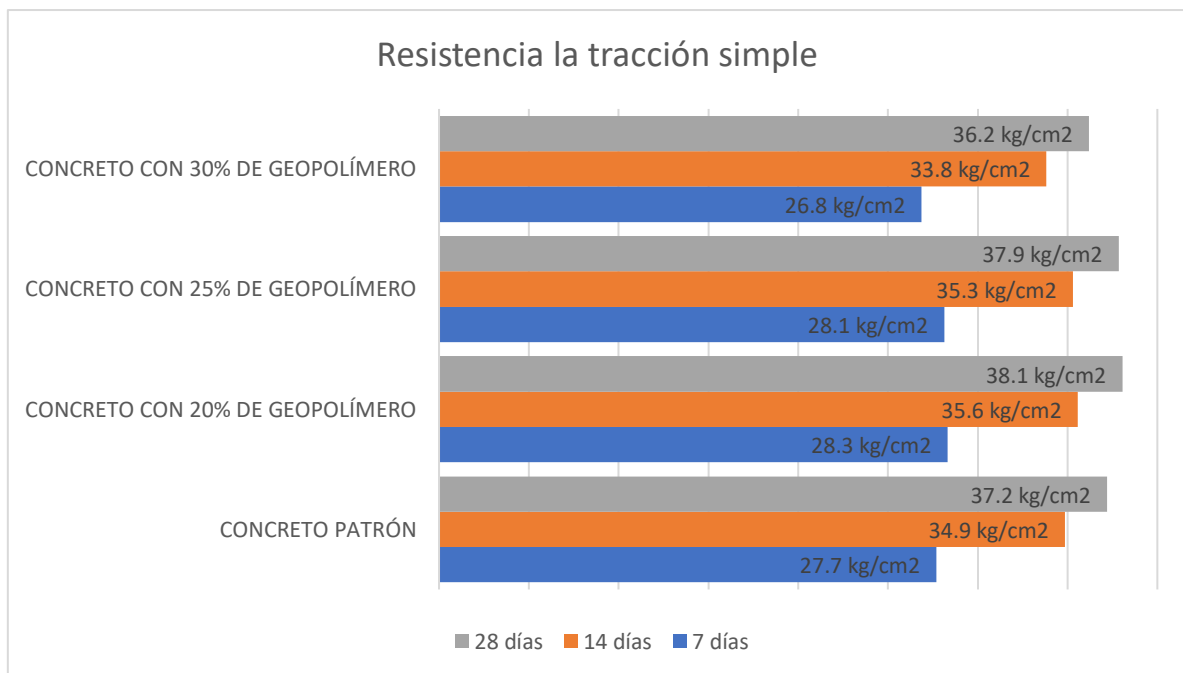
*Resistencia a la tracción simple de 7, 14 y 28 días*

MUESTRA	ELEMENTO	7 días		14 días		28 días	
		RESISTENCIA (kg/cm <sup>2</sup> )	RESISTENCIA (Mpa)	RESISTENCIA (kg/cm <sup>2</sup> )	RESISTENCIA (Mpa)	RESISTENCIA (kg/cm <sup>2</sup> )	RESISTENCIA (Mpa)
P30A	CONCRETO PATRÓN	27.6	2.71	35.0	3.44	37.3	3.66
P31A		27.7	2.72	34.7	3.41	37.1	3.64
P32B	CONCRETO CON 20% DE	28.2	2.77	35.5	3.48	37.9	3.72
P33B	GEOPOLÍMERO	28.4	2.79	35.7	3.50	38.2	3.75
P34C	CONCRETO CON 25% DE	28.0	2.75	35.1	3.45	37.7	3.70
P35C	GEOPOLÍMERO	28.2	2.77	35.5	3.48	38.0	3.73
P36D	CONCRETO CON 30% DE	26.7	2.62	33.6	3.30	36.0	3.53
P37D	GEOPOLÍMERO	27.0	2.65	34.1	3.34	36.4	3.57

**Tabla 50**

*Promedio de resistencia a la tracción simple en 7, 14 y 28 días.*

ELEMENTO	PROMEDIO RESISTENCIA		
	7 días	14 días	28 días
CONCRETO PATRÓN	27.7 kg/cm <sup>2</sup>	34.9 kg/cm <sup>2</sup>	37.2 kg/cm <sup>2</sup>
CONCRETO CON 20% DE GEOPOLÍMERO	28.3 kg/cm <sup>2</sup>	35.6 kg/cm <sup>2</sup>	38.1 kg/cm <sup>2</sup>
CONCRETO CON 25% DE GEOPOLÍMERO	28.1 kg/cm <sup>2</sup>	35.3 kg/cm <sup>2</sup>	37.9 kg/cm <sup>2</sup>
CONCRETO CON 30% DE GEOPOLÍMERO	26.8 kg/cm <sup>2</sup>	33.8 kg/cm <sup>2</sup>	36.2 kg/cm <sup>2</sup>



**Figura 85.** Resistencia a la tracción simple del concreto en 7, 14 y 28 días

De acuerdo a la guía ACI 325.9R-15 ("Guide for Construction of Concrete Pavements") establece relaciones empíricas para pavimentos de concreto, aplicables a Thin Whitetopping. Según esta norma, la resistencia a la tracción indirecta generalmente es 10-15% de la resistencia a compresión, es decir en un rango de 30 y 45 Kg/cm<sup>2</sup>.

El gráfico anterior se evidencia las variaciones de la resistencia a la tracción de los 7, 14 y 28 días, donde se concluye que, en el periodo de 28 días, el concreto con 25% de geopolímero presenta un mejor resultado con 37.9 kg/cm<sup>2</sup>, mientras que el concreto con 30% de geopolímero, con un resultado de 36.2 kg/cm<sup>2</sup>, es el menor resultado.

#### **4.6 Parámetros de sostenibilidad económica**

Dando cumplimiento al objetivo N° 05 es que se evaluarán los parámetros de sostenibilidad económica, ya que dicho aspecto contribuirá a conseguir el objetivo de la investigación, el cual está dado por la influencia del concreto con geopolímero en Whitetopping, para la rehabilitación del pavimento flexible.

Para este apartado se ha calculado el costo por kilómetro de longitud del tramo establecido en el presente proyecto. En donde se tienen los siguientes datos:

El ancho de la calzada es de 7.50 metros, los cuales incluyen las bermas de los bordes.

Para el cálculo de la muestra se utiliza un periodo de análisis de veinte años a partir de 2024. Se considera una tasa de inflación del 2.5%, la cual fue tomada en base a Statista Research Department en donde indica que en Perú en un periodo hasta 2029 el valor de inflación se mantendría con el valor indicado anteriormente. Así mismo, según la Cámara Peruana de la Construcción (CAPECO, 2024) la tasa de descuento para proyectos de construcción en Perú suele ubicarse entre 8% y 12%, adaptándose a la percepción de riesgo y los costos de financiamiento en el mercado local, según recomendaciones del sector, por lo tanto, se utilizará una tasa de descuento de 10%.

Los espesores de diseño de las distintas capas del pavimento asfáltico bituminoso se determinan siguiendo las directrices de AASHTO. Sin embargo, para obtener una estimación aproximada en la comparación de costos, se considerarán los siguientes espesores para las capas del pavimento bituminoso:

#### 4.6.1. Capa Bituminosa

Una capa de refuerzo de 5 cm de espesor de capa correctora de perfil bituminoso (DBM), incluida la capa de nivelación y 4.0 cm de espesor de hormigón bituminoso, se consideran desde el momento del primer tratamiento de recubrimiento. Se propone repetir las mismas capas de refuerzo una vez transcurridos diez años desde la superposición inicial (es decir, en el año 11), ya que según Venugopalan, (2023) la vida útil del pavimento flexible, en condiciones normales y con tráfico de alta intensidad, su durabilidad promedio es de entre 10 y 15 años.

**Tabla 51**

*Costo recubrimiento bituminoso cada 11 años (junio-2024)*

Recubrimiento bituminoso de carpeta asfáltica	Longitud (m)	Anchura (m)	Espesor (m)	Cantid ad	Unid ad	Tarifa (S/.)	Costo Total (S/.)
Limpieza de terreno	1000	7.5		7500	m2	S/ 3.57	S/ 26,775.00
Capa de nivelacion con DBM	1000	7.5	0.075	375	m3	S/ 403.50	S/ 151,312.50
Recapeo con hormigón bituminoso	1000	7.5	0.04	300	m3	S/ 702.01	S/ 210,603.00
						Costo Directo	S/ 388,690.50
						Gastos Generales (10%)	S/ 38,869.05
						Costo Total	S/ 427,559.55

Además, se considerará un tratamiento superpuesto de hormigón bituminoso de 30 cm de espesor en cada lapso de 5 años debido a la

degradación de la capa de rodadura existente. En consecuencia, se considerará un recubrimiento de hormigón bituminoso en los periodos de 6, 16 y 21 años.

**Tabla 52**

*Costo reasfaltado periódico cada 5 años (junio-2024)*

Reasfaltado periodico cada 5 años	Longitud (m)	Anchura (m)	Espesor (m)	Cantidad	Unidad	Tarifa (S/.)	Costo Total (S/.)
Limpieza de terreno con equipo	1000	7.5		7500	m2	S/ 3.57	S/ 26,775.00
Imprimación asfáltica	1000	7.5		7500	m3	S/ 3.18	S/ 23,850.00
Recapeo de pavimento e=3cm	1000	7.5	0.03	225	m3	S/ 703.32	S/ 158,247.00
						Costo Directo	S/ 208,872.00
						Gastos Generales (10%)	S/ 20,887.20
						Costo Total	S/ 229,759.20

#### **4.6.2. Capa Thin Whitetopping**

Los parámetros empleados para la ejecución de la capa Thin Whitetopping, junto con el espesor de rodadura considerado en el cálculo, son los siguientes: fresado de la superficie bituminosa existente en espesores variables de 25 mm a 50 mm para obtener una superficie uniforme y un recubrimiento blanco fino de 13 cm de espesor, tal como se había diseñado anteriormente.

**Tabla 53**

*Costo de recubrimiento TWT de concreto con 25% de geopolímero (junio-2024)-*

Capa de Thin Whitetopping	Longitud (m)	Anchura (m)	Espesor (m)	Cantidad	Unidad	Tarifa (S/.)	Costo Total (S/.)
Fresado de pavimento flexible c/equipo E=0.05m	1000	7.5		7500	m2	S/ 3.83	S/ 28,875.00
Encofrado y desencofrado de Thin Whitetopping	2150			2150	m	S/ 11.65	S/ 25,047.50
Losa de concreto FC=300 KG/CM2	1000	7.5	0.12	900	m3	S/ 694.74	S/ 625,266.00
Corte y sellado de juntas de contraccion	2252.5			2252.5	m	S/ 17.54	S/ 39,508.85



	S/
Costo Directo	718,697.35
Gastos Generales	S/
(10%)	71,869.74
	S/
Costo Total	790,567.09

Para la capa Thin Whitetopping se considerará el costo de reparación de las juntas agrietadas en el año 11 después de su construcción, ya que según Venugopalan (2023), hormigón se daña en una anchura de unos 25 cm a cada lado de la junta cada 10 años. La reparación de la junta desgastada se hará con hormigón epoxídico y presenta el siguiente detalle

**Tabla 54**

*Costo de reparación de juntas (junio-2024)*

Reparacion de juntas en Thin Whitetopping	Longitud (m)	Anchura (m)	Espesor (m)	Cantid ad	Unid ad	Tarifa (S/.)	Costo Total (S/.)
Sellado de juntas de contraccion	2252.5			2252.5	m	S/ 17.54	S/ 39,508.85
						S/	S/
						Costo Directo	39,508.85
						Gastos Generales	S/
						(10%)	3,950.89
						S/	S/
						Costo Total	43,459.74

Tal como se visualiza en las tablas anteriores se tiene ya los precios estimados de cada partida para los dos tipos de recubrimiento planteados, de tal forma que, en la tabla 55 se podrá visualizar la comparación del costo de ciclo de vida de la capa de rodadura bituminosa, así como también de la capa Thin Whitetopping, ya con datos de inflación de materiales y de precios establecidos según cálculos de valor actual neto.

**Tabla 55**

*Comparación del costo del ciclo de vida (valor actual neto) de la capa de rodadura bituminosa y de la capa Thin Whitetopping*

RECUBRIMIENTO BITUMINOSO				RECUBRIMIENTO CON THIN WHITETOPPING					
N° DE AÑO	AÑO	MANTENIMIENTO	VALOR ACTUAL NETO	N° DE AÑO	AÑO	CONSTRUCCION Y MANTENIMIENTO	VALOR ACTUAL NETO		
1	2024	S/	427,559.55	S/	427,559.55	1	2024	S/	790,402.09
2	2025					2	2025		
3	2026					3	2026		
4	2027					4	2027		
5	2028					5	2028		
6	2029	S/	259,951.45	S/	163,813.51	6	2029		
7	2030					7	2030		
8	2031					8	2031		
9	2032					9	2032		
10	2033					10	2033		
11	2034	S/	547,312.37	S/	234,732.89	11	2034	S/	57,022.95
12	2035					12	2035	S/	24,456.16
13	2036					13	2036		
14	2037					14	2037		
15	2038					15	2038		
16	2039	S/	332,759.83	S/	97,129.42	16	2039		
17	2040					17	2040		
18	2041					18	2041		
19	2042					19	2042		
20	2043					20	2043		
21	2044	S/	376,487.20	S/	74,791.35	21	2044		
		VAN TOTAL		S/	998,026.72	VAN TOTAL		S/	814,858.25

Finalmente, de la tabla anterior del análisis del costo del ciclo de vida se establece que el costo porcentual del pavimento TWT comparado con el recubrimiento bituminoso es sólo =  $(814,858.25/998,026.72) \times 100\% = 81.65\%$  (es decir, 82%), lo que supone un ahorro neto del 18%. Estos porcentajes de ahorro coinciden con los obtenidos en análisis similares disponibles en diversas publicaciones técnicas.

#### **4.7 Parámetros de sostenibilidad ambiental**

El análisis ambiental detallado a continuación examina las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) relacionadas con la producción y utilización del concreto Portland en comparación con el concreto que reemplaza un 25% de geopolímero. Asimismo, se analiza el índice de utilización de cemento en los concretos seleccionados.

Para el concreto Portland convencional, el cemento es el componente clave, y su producción es una fuente significativa de emisiones de CO<sub>2</sub>. Por otro lado, el concreto que incorpora geopolímeros, específicamente con un 25% de sustitución del cemento Portland, presenta una alternativa potencialmente más sostenible debido a su menor huella de carbono.

La producción de cemento Portland implica la calcinación de caliza y arcilla a altas temperaturas, un proceso intensivo en energía que resulta en la liberación de una cantidad significativa de CO<sub>2</sub>. Las emisiones de CO<sub>2</sub> provienen tanto de la quema de combustibles fósiles para alcanzar las temperaturas necesarias como de las reacciones químicas involucradas en la producción del clinker, el componente principal del cemento.

Por otro lado, el concreto que incorpora geopolímeros, específicamente con un 25% de sustitución del cemento Portland, presenta una alternativa potencialmente más sostenible. El proceso de producción del concreto con geopolímero, genera significativamente menos CO<sub>2</sub>, ya que no requiere las altas temperaturas ni las reacciones químicas intensivas en carbono propias de la producción de cemento Portland.

#### ***4.7.1. Emisión de CO<sub>2</sub>***

Las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) asociadas con la producción de cemento Portland representan un factor clave en la evaluación del impacto ambiental de los materiales de construcción. Según estimaciones recientes, la producción de una tonelada de cemento Portland genera entre 0.83 y 0.97 toneladas de CO<sub>2</sub> (Palomo et al., 2022). Para fines de este análisis, se utilizará un valor promedio de 0.90 toneladas de CO<sub>2</sub> por tonelada de cemento producido.

**Emisiones de CO<sub>2</sub> en Concreto Portland:** Para el concreto Portland, se emplean 455.56 kg de cemento Portland por cada metro cúbico de concreto. Las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas por esta cantidad de cemento se determinan utilizando el siguiente cálculo:

$$455.56 \text{ kg/m}^3 \times 0.90 \text{ tn CO}_2 / \text{ tn cemento} = 410 \text{ kg CO}_2$$

Esto implica que, por cada metro cúbico de concreto Portland producido, se emiten aproximadamente 410 kg de CO<sub>2</sub>.

**Emisiones de CO<sub>2</sub> en Concreto con 25% de Geopolímero:** Para este caso, de acuerdo con la tabla 42, la mezcla incluye 31.87 kg de cemento Portland y 10.63 kg de material geopolimérico por bolsa de concreto. Así mismo, la cantidad de cemento por metro cúbico es el producto del peso por el factor bolsas por metro cúbico, siendo 10.72 kg/bls. Entonces, las emisiones de CO<sub>2</sub> para el cemento Portland en esta mezcla se calculan de la siguiente manera:

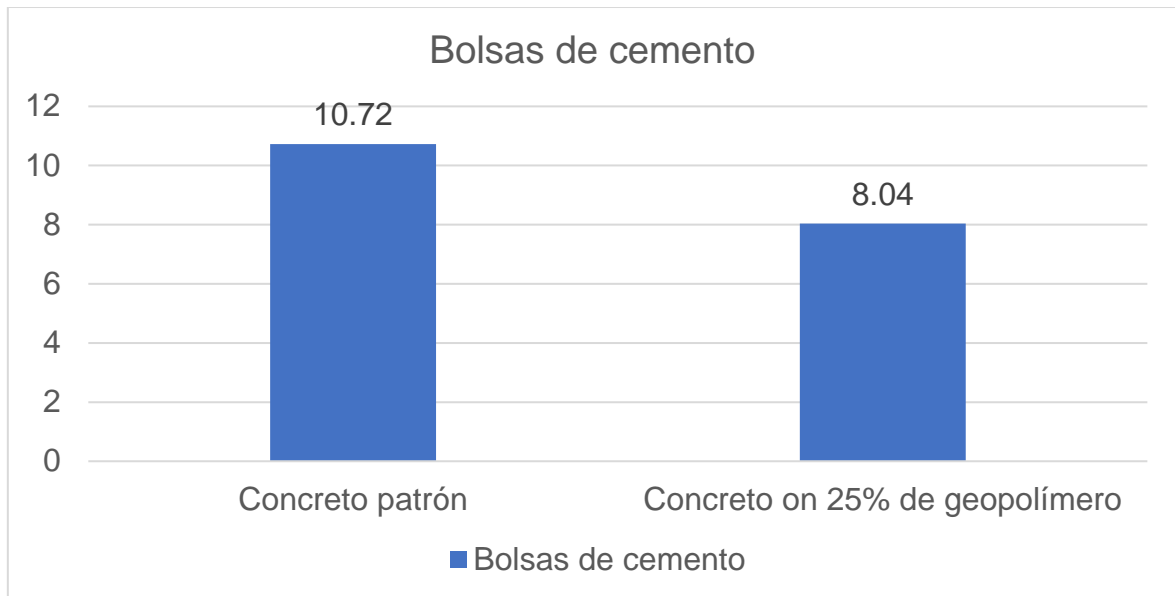
$$31.87 \text{ kg/bls} \times 10.72 \text{ kg/bls} = 341.65 \text{ kg/m}^3$$

$$341.65 \text{ kg/m}^3 \times 0.90 \text{ tn CO}_2 / \text{ tn cemento} = 307.50 \text{ kg CO}_2$$

Por lo tanto, las emisiones de CO<sub>2</sub> para un metro cúbico de concreto con 25% de geopolímero son aproximadamente **307.50 kg** de CO<sub>2</sub>.

#### **4.7.2. Índice de cemento**

Para realizar el análisis del índice de cemento entre el concreto Portland y el concreto con un 25% de geopolímero, partimos de los datos proporcionados: se usa 455.56 kg por metro cúbico para el concreto portland y 341.67 kg por metro cubico para el concreto con 25% de geopolímero. Realizando una equivalencia en unidad de bolsa (42.5kg), se tendría 10.72 bolsas en concreto portland y 8.04 bolsa en concreto con 25% de geopolímero.



**Figura 86.** *Consumo de bolsas por metro cúbico*

Lo que se evidencia que la reducción del cemento es la resta de ambos valores, lo que resulta un **2.68** bolsas de cementos que no se consume. Además, esta reducción en la cantidad de bolsas de cemento no solo tiene beneficios económicos al disminuir los costos de materiales, sino que también contribuye a la sostenibilidad al reducir la huella de carbono asociada con la producción, lo que representa de 102.51 kg de CO<sub>2</sub> que se deja de producir y transporte del cemento Portland.

Aplicación de concreto en el tramo estudiado que representa un kilómetro de distancia, considerando que el ancho de carril es de 3.60 metros, doble sentido un carril por sentido y el espesor de la capa de concreto de 12 cm. Realizando una operación simple podremos obtener que el volumen del concreto 864 metros cúbicos, así mismo se demuestra la tabla comparativa del concreto patrón y concreto con 25% de geopolímero.

**Tabla 56***Comparación de bolsas y emisión de CO2*

Elementos	Bolsas	Peso (kg)	Emisión de CO2
Concreto patrón	9,262.08	393,638.40	354,274.56
Concreto con 25% de geopolímero	6,946.56	295,228.80	265,705.92
Comparación	2,315.52	98,409.60	88,568.64

En la Tabla 56 se detallan los valores del número de bolsas, peso y emisión por el volumen total del tramo. Además, se evidencia una comparación entre el concreto patrón y el concreto con un 25% de geopolímero, mostrando que se evita el consumo de 2,315.52 bolsas y se reduce la emisión de CO2 en 88,568.64 kg.

## CAPÍTULO V

### DISCUSIÓN

#### 5.1 Contratación de Hipótesis

##### 5.1.1 *Hipótesis General*

Se establece que con un reemplazo de 25% de geopolímero por cemento, en Thin Whitetopping influye positivamente aplicado al pavimento flexible tramo de la carretera Arequipa - Yura porque cumple con los requerimientos mínimos en base a sus características físicas (trabajabilidad) y mecánicas (compresión, flexión y tracción), además el material planteado demuestra tener características de sostenibilidad ambiental por su reemplazo de 25% de geopolímero por cemento. En la tabla 50 se puede visualizar a forma de resumen la hipótesis planteada, el método, los resultados y la conclusión de los autores.

**Tabla 57**

*Validación de hipótesis general*

Hipótesis general planteada	Métodos Aplicado	Resultados obtenidos	Conclusiones
El concreto con geopolímero como alternativa sostenible en Thin Whitetopping <b>influye positivamente</b> en su aplicación al pavimento flexible tramo carretera Arequipa – Yura.	Evaluación del pavimento (Método PCI)	La resistencia a la compresión de la capa de concreto (TWT) a los 28 días, indica que se cumplió con la resistencia mínima requerida con	La hipótesis planteada es válida porque el concreto con geopolímero como alternativa sostenible en Thin Whitetopping influye positivamente en la rehabilitación del pavimento flexible tramo de la carretera Arequipa – Yura con una dosificación de reemplazo de 20 y 25% de geopolímero por cemento.
	Diseño de Whitetopping (AASHTO)	porcentajes de reemplazo de 20 y 25% de geopolímero por cemento. Además, se establece que el TWT, representa un 19% de menor costo de la reparación con una capa bituminosa.	
	Ensayos de laboratorio (NTP)	Asimismo, se utiliza 2506 menos bolsas de cemento, lo que se estima un 95,854.5 menor de emisión de CO <sub>2</sub> .	
	Evaluación de parámetros de sostenibilidad económica y ambiental		

**5.1.2 Hipótesis Específicas**

**5.1.2.1. Hipótesis Específica N° 01**

A partir de los ensayos realizados, se obtuvo un resultado significativo: un espesor de capa de concreto de 13 cm, evaluado con una resistencia de  $f'c=300 \text{ kg/cm}^2$ . Este resultado superó ligeramente la hipótesis original de 12 cm, lo cual puede indicar una mayor robustez y resistencia estructural en la capa de concreto aplicada.

En conclusión, el espesor obtenido de 13 cm junto con la resistencia de  $f'c=300 \text{ kg/cm}^2$  superó las expectativas de la hipótesis inicial, demostrando que el diseño de Thin Whitetopping con geopolímero es una opción efectiva y sostenible para la rehabilitación de pavimentos. Estos resultados respaldan la viabilidad técnica y la potencial implementación de esta solución en proyectos de infraestructura vial similares en el futuro.

Se demuestra que existe variación mínima entre la hipótesis planteada y el resultado obtenido, por lo tanto, se confirma la validez de la hipótesis inicial, ya



que el espesor obtenido está dentro de un rango aceptable y supera ligeramente la estimación planteada. Esto sugiere que el diseño de Thin Whitetopping con geopolímero es efectivo y proporciona una solución estructuralmente sólida y sostenible para la rehabilitación de pavimentos.

### Tabla 58

#### *Validación de hipótesis específica N° 01*

Hipótesis específica N° 01	Método Aplicado	Resultados obtenidos	Conclusiones
El diseño de Thin Whitetopping del concreto con geopolímero, requiere de un espesor de capa de 12 cm con una resistencia $f_c' = 300 \text{ kg/cm}^2$ .	Método PCI Metodología AASTHO 1993	El diseño de Thin Whitetopping luego de realizar un análisis de la condición del pavimento, se obtuvo un resultado de 13 cm de espesor de concreto con una resistencia mínima de 300 $\text{kg/cm}^2$ .	La validez de la hipótesis se confirma a través de los resultados obtenidos en la investigación, lo que respalda la viabilidad técnica del diseño de Thin Whitetopping con geopolímero como una alternativa sostenible y efectiva para la rehabilitación de pavimentos asfálticos bituminosos.

#### 5.1.2.2. Hipótesis Específica N° 02

El diseño realizado demostró un resultado significativo: una proporción de cemento del 19.26% del peso total de la mezcla, cumpliendo con los requisitos estructurales y de durabilidad. Este resultado mostró una ligera desviación respecto a la hipótesis original del 20%, lo cual podría indicar una optimización en la cantidad de cemento utilizado sin comprometer las propiedades mecánicas del concreto.

En relación con lo anterior, la proporción de cemento obtenida del 19.26% del peso total de la mezcla, junto con el cumplimiento de los requisitos estructurales y de durabilidad, confirma la hipótesis inicial. Esto demuestra que el diseño de mezcla con geopolímero es una opción efectiva y sostenible para la rehabilitación de pavimentos.

Se evidencia una ligera discrepancia entre la hipótesis planteada y el resultado obtenido; sin embargo, esto confirma la validez de la hipótesis inicial, dado que la proporción de cemento encontrada se sitúa dentro de un margen aceptable y apenas difiere de la estimación original.

La pequeña reducción en la proporción de cemento observada, con un valor de 19.26% comparado con el 20% planteado en la hipótesis, corrobora la efectividad del diseño propuesto. Esto también sugiere que el uso de una cantidad ligeramente menor de cemento puede mantener la durabilidad y el desempeño del pavimento rehabilitado, optimizando así el uso de los materiales

**Tabla 59**

*Validación de hipótesis específica N° 02*

Hipótesis específica N° 02	Método Aplicado	Resultados obtenidos	Conclusiones
El diseño de mezcla demuestra que el reemplazo de 25% de cemento por geopolímero es el óptimo.	Método ACI (diseño de mezcla)	El diseño de mezcla del concreto luego de desarrollar el procedimiento adecuado, se obtuvo como resultado que el peso del cemento equivale al 19.26% del peso total de diseño.	La validez de la hipótesis se confirma mediante los resultados obtenidos en esta investigación, respaldando la viabilidad técnica del diseño de la mezcla de concreto con geopolímero como una alternativa sostenible y efectiva para la rehabilitación de pavimentos asfálticos bituminosos.

### 5.1.2.3. Hipótesis Específica N° 03

Considerando los resultados obtenidos del ensayo de trabajabilidad del concreto patrón, y con porcentajes de reemplazo de 20, 25 y 30% de geopolímero respecto al cemento, se tuvieron asentamientos de 3 a 4", los cuales fueron premeditados tanto en la hipótesis como en el diseño de mezclas.

Se concluye que la trabajabilidad del concreto con geopolímero, se encuentra dentro de un asentamiento entre 3" - 4". A su vez se precisa que todas las mezclas evaluadas con diferentes cantidades de reemplazo de geopolímero con cemento, cuentan con una trabajabilidad aceptable y tal como se hipotetizo

en el Capítulo III. En la Tabla 60 se puede visualizar un resumen de la contrastación de la hipótesis N° 03

**Tabla 60**

*Validación de hipótesis específica N° 03*

Hipótesis específica N° 03	Método Aplicado	Resultados obtenidos	Conclusiones
La trabajabilidad del concreto con geopolímero, presenta un asentamiento entre 3" - 4".	Ensayo del cono de Abrahams Norma Técnica Peruana (NTP) 339.035:2009	La trabajabilidad de los todos concretos evaluados, tanto patrón y con reemplazo de 20, 25 y 30% de geopolímero, obtuvieron un valor de asentamiento de 3-4"	La hipótesis planteada es válida porque el concreto con geopolímero como alternativa sostenible en su diferentes dosificaciones en Thin Whitetopping influye presenta una trabajabilidad de 3-4" .

#### **5.1.2.4. Hipótesis Específica N° 04**

Las dosificaciones con reemplazo de 20 y 25% de geopolímero por cemento, cumplieron con el requerimiento del diseño del Thin Whitetopping, el cual fue de 300 kg/cm<sup>2</sup>. Destacando que con un 20% de geopolímero se obtuvo una mayor resistencia.

Por otro lado, respecto a la resistencia a la flexión, se demostró que la dosificación con 20% de geopolímero obtuvo mejores resultados mostrando una resistencia de 5.36 Mpa.

Finalmente, se concluye que la hipótesis es válida porque la resistencia a la compresión con un reemplazo de 25% de geopolímero cumple con la resistencia requerida por el diseño, además cabe destacar que con un 20% de reemplazo los valores también dan cumplimiento al diseño planteado para la rehabilitación del pavimento flexible tramo de la carretera Arequipa – Yura. En la Tabla 61 se puede visualizar un resumen de la contrastación de la hipótesis N° 04

**Tabla 61***Validación de hipótesis específica N° 04*

<b>Hipótesis específica N° 04</b>	<b>Método Aplicado</b>	<b>Resultados obtenidos</b>	<b>Conclusiones</b>
El concreto con geopolímero con porcentaje de reemplazo del 25% respecto al cemento presenta una mejor característica mecánica (resistencia a la compresión, flexión y tracción)	Ensayo de compresión (NTP 339.034) y flexión Norma (NTP 339.078)	La resistencia a la compresión de los concretos evaluados con reemplazo de 20 y 25% de geopolímero, obtuvieron los siguientes valores de resistencia a los 28 días: 308.50 y 303.85 kg/cm <sup>2</sup> respectivamente. Además, que todas las muestras cumplieron con la resistencia a la flexión y tracción a los 28 días, por lo que se considera a la dosificación con 25% de reemplazo como optima.	La hipótesis planteada es válida porque el concreto con geopolímero como alternativa sostenible en su dosificación de reemplazo del 25% de geopolímero cumple con las resistencias a la compresión, elección y tracción requeridas en el diseño de Thin Whitetopping. Además, cabe destacar que la dosificación con 20% de geopolímero también se encuentra dentro de los parámetros de diseño.

**5.1.2.5. Hipótesis Específica N° 05**

Como hipótesis específica N° 05 se consideró que el parámetro de sostenibilidad económica del concreto con geopolímero en Thin Whitetopping, presenta un 20% menor costo en un periodo de 20 años, respecto a una capa bituminosa, aplicado al pavimento flexible tramo de la carretera Arequipa - Yura

Finalmente, se concluye que la hipótesis es válida porque al comparar el costo de mantenimiento durante el ciclo de vida del pavimento en un lapso de 20 años se estableció que la capa de Thin Whitetopping presenta un ahorro neto de 18% respecto a la capa bituminosa tradicional.

En la Tabla 62 se puede visualizar un resumen de la contrastación de la hipótesis N° 05

**Tabla 62***Validación de hipótesis específica N° 05*

Hipótesis específica N° 05	Método Aplicado	Resultados obtenidos	Conclusiones
El concreto con geopolímero para Thin Whitetopping presenta un 20% menor costo en un periodo de 20 años, respecto a una capa bituminosa convencional para la rehabilitación del pavimento flexible.	Análisis de costos	Del análisis del costo del ciclo de vida se deduce que el costo porcentual del pavimento TWT comparado con el recubrimiento bituminoso es sólo = $(814,858.25/998,026.72) \times 100\% = 81.65\%$ (es decir, 82%), lo que supone un ahorro neto del 18%.	La hipótesis planteada es válida porque al comparar el costo del ciclo de vida del pavimento en un lapso de 20 años se estableció que la capa de Thin Whitetopping presenta un ahorro neto de 19% respecto a la capa bituminosa tradicional.

**5.1.2.6. Hipótesis Específica N° 06**

Los resultados obtenidos muestran una reducción real de 2.68 bolsas de cemento de 42.5 kg cada una. Esto confirma que la hipótesis de una reducción del 25% en el consumo de cemento es válida, ya que el cálculo teórico y los resultados prácticos están en concordancia. La disminución de 102.51 kg de CO<sub>2</sub> indica que cada bolsa de cemento de 42.5 kg produce aproximadamente 38.26 kg de CO<sub>2</sub> (102.51 kg / 2.68 bolsas). Este resultado refuerza la validez de la hipótesis al demostrar un impacto positivo significativo en la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>.

La reducción en el consumo de cemento y las emisiones de CO<sub>2</sub> resalta la efectividad del concreto con geopolímero como una alternativa sostenible. Este enfoque no solo disminuye la dependencia del cemento, sino que también contribuye a la mitigación del cambio climático al reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

**Tabla 63**

*Validación de hipótesis específica N° 06*

Hipótesis específica N° 06	Método Aplicado	Resultados obtenidos	Conclusiones
El concreto con geopolímero, presenta un 25% de reducción del consumo de cemento respecto al concreto patrón.	Análisis de índice de cemento Análisis de emisión de CO2	A partir del análisis del índice de cemento, se determinó que la reducción en el consumo de bolsas de cemento es de 2.68 al comparar un metro cúbico de concreto patrón con concreto que contiene un 25% de geopolímero. Asimismo, el análisis de emisiones de CO2 muestra que se evita la producción de 102.51 kg de CO2 por cada metro cúbico de concreto con 25% de geopolímero, en comparación con el concreto patrón.	La hipótesis específica N° 06 es válida. La investigación demuestra que la implementación de concreto con geopolímero en Thin Whitetopping para la rehabilitación del pavimento flexible en el tramo de la carretera Arequipa – Yura logra una reducción del 25% en el consumo de cemento y una disminución significativa de 102.51 kg de CO2. Estos resultados confirman la sostenibilidad ambiental de la alternativa propuesta

**5.2. Discusión de Antecedentes**

**5.2.1. Antecedente Internacional**

**5.2.1.1. Contrastación de antecedente internacional N° 01**

Respecto a la contrastación de antecedentes internacionales, como primer artículo se tomará a la investigación realizada por Singh et al., (2023), cuyo título difiere en “Concreto geopolímero a base de cenizas volantes, GGBS y humo de sílice con materiales reciclados: Propiedades e impactos ambientales”, en donde se tomó como objetivo investigar la viabilidad técnica y ambiental de usar cenizas volantes, (FA), escoria de alto horno granulada molida (GGBS) y humo de sílice (SF) en concreto geopolimérico (GPC) con 100% de agregados reciclados (RA), para optimizar la proporción de GGBS, FA y SF en la mezcla de diseño para obtener el mejor rendimiento mecánico. A través de un diseño experimental, se determinó que el concreto geopolímero que presentó las mayores resistencias a compresión (52.15 MPa), flexión (5.81 MPa) y tracción dividida (5.23 MPa)

correspondió a una mezcla en la que el cemento fue reemplazado en un 35% por cenizas volantes, en un 50% por escoria de alto horno granulada molida y en un 15% por humo de sílice.

Para comparar los resultados con la tesis planteada se debe tener en cuenta que en el antecedente planteado se tiene la combinación de tres materiales que contienen aluminosilicatos, es decir que presentan características similares al cemento convencional. Por otro lado, la combinación de los mencionados da y presentan diversas resistencias máximas recopiladas en base a relaciones optimas.

Por otro lado, se debe mencionar que, en el presente proyecto, se utilizó concreto geopolímero en base a cenizas volantes, el cual se diseñó de acuerdo al requerimiento de resistencia del Thin Whitetopping.

Por lo tanto, se precisa que, respecto a los resultados de la investigación, el porcentaje optimo o máximo de reemplazo de geopolímero a base de cenizas volantes es de 25%, el cual difiere con el del antecedente planteado, ya que en el mismo el porcentaje de reemplazo de cenizas volantes es de 35%.

**Tabla 64***Validación de antecedente internacional*

Antecedente Internacional	Método Aplicado	Resultados obtenidos	Conclusiones
Singh et al., (2023), cuyo título difiere en "Concreto geopolímero a base de cenizas volantes, GGBS y humo de sílice con materiales reciclados: Propiedades e impactos ambientales"	Norma India IS 12269-1987	La mayor resistencia a la compresión (52,15 MPa), flexión (5.81 MPa) y tracción dividida (5.23 Mpa) fue exhibida por el hormigon geopolímero con una relación de sustitución de cemento por cenizas volantes (35%), escoria de alto horno granulada molida (50%) y humo de sílice (15%).	Las dosificaciones optimas o aceptables difieren, puesto que podrían influir características tales como materiales y procedimientos. Sin embargo, sirve como antecedente porque nos indica un máximo de reemplazo de cenizas volantes.

**5.2.2 Antecedente Nacional****5.2.2.1. Contratación de antecedente nacional N° 01**

La investigación realizada por Cieza, N. A., & Sosa, L. M. (2023), titulada "Condición de un pavimento asfáltico para proponer el diseño en la aplicación de la tecnología Whitetopping para la rehabilitación de vías urbanas", sirvió como base para la contrastación de antecedentes nacionales. La investigación tuvo como propósito evaluar el estado del pavimento asfáltico con el fin de diseñar una propuesta utilizando la tecnología Whitetopping para la rehabilitación de la Avenida La Molina, en el distrito de La Molina, Lima. El estudio, de diseño no experimental, retrospectivo y transversal, concluyó que, de acuerdo con los datos recopilados y la guía de diseño Whitetopping, la solución propuesta consistía en una capa de concreto hidráulico no adherido con una resistencia  $f'c$  de 350 kg/cm<sup>2</sup> y un espesor de 8". Asimismo, se incluyeron barras de transferencia de 1/2" de diámetro y 25 cm de longitud, con un espaciamiento de 30 cm entre ellas.



Antes de proceder con la contrastación, es crucial considerar las características del antecedente, el cual está enfocado en un entorno urbano con un tráfico vehicular superior al observado en la investigación actual. Además, el concreto hidráulico utilizado en dicho antecedente, con una resistencia  $f'c$  de 350 kg/cm<sup>2</sup>, es de mayor capacidad que el utilizado en la investigación actual. Estas diferencias fundamentales contribuyen a la discrepancia y la falta de asimilación entre ambos contextos.

Los resultados del diseño Whitetopping indicaron que el espesor más adecuado para la capa de concreto es de 13 cm, con unas dimensiones de 3.60 metros de ancho y 3.125 metros de largo. Además, se determinó que la junta de transferencia de carga óptima es una barra de 1/2 pulgada, con una longitud de 25 cm y una separación de 30 cm entre cada barra. En contraste, la investigación previa arrojó un espesor de 8" (20.32 cm), lo cual resalta la diferencia clave entre ambas investigaciones. Esta discrepancia en las dimensiones evidencia la necesidad de adaptar el diseño a las condiciones específicas de cada proyecto vial.

Estas diferencias en las especificaciones técnicas subrayan la importancia de realizar análisis detallados y personalizados para cada proyecto de infraestructura vial, con el fin de asegurar un rendimiento óptimo y una mayor vida útil de la capa de concreto en el tiempo.

**Tabla 65***Validación de antecedente nacional*

Antecedente Nacional	Método Aplicado	Resultados obtenidos	Conclusiones
Cieza, N. A., & Sosa, L. M. (2023), titulada "Condición de un pavimento asfáltico para proponer el diseño en la aplicación de la tecnología Whitetopping para la rehabilitación de vías urbanas"	Experimentación	Como resultado, se desarrolló un diseño final que consiste en una capa de refuerzo no adherido de concreto hidráulico con una resistencia de $f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$ y un espesor de 8" (20 cm). Este diseño incluye barras de transferencia N°4 de ½" de diámetro, con una longitud de 25 cm y separación de 30 cm entre cada una, asegurando la estabilidad y durabilidad de la estructura.	En conclusión, si bien el antecedente proporciona valiosa información y sirve como punto de referencia, es crucial realizar ajustes y personalizaciones en el diseño para satisfacer las necesidades específicas de cada contexto vial y garantizar la eficacia a largo plazo de la rehabilitación de pavimentos.

## CONCLUSIONES

El concreto con geopolímero con un reemplazo del 25% de geopolímero por cemento **influye positivamente** en Thin Whitetopping aplicado al pavimento flexible tramo de la carretera Arequipa – Yura, porque reduce 2.68 bolsas de cemento por metro cúbico, además cumple con los requerimientos mínimos de diseño y de muestra ser una alternativa viable ambiental y económicamente.

Se determinó que el diseño Thin Whitetopping obtuvo un espesor de 13 cm, con barras de transferencia de ½” de longitud de 25 cm y de espaciamiento de 30 cm entre juntas.

Se determinó que el diseño de mezcla óptimo corresponde, a partir de una bolsa de cemento, a 25% de reemplazo de cemento por geopolímero, 16.72 litros de agua, 75.83 kg de agregado grueso y 85.62 kg de agregado fino.

Se establece que la mezcla con reemplazo de 25% de cemento por geopolímero presenta la trabajabilidad ideal y la dosificación del 30% presenta aumento de asentamiento, por ende, es menos trabajable

Se precisa que la dosificación con un reemplazo de 25% de cemento por geopolímero presenta mejores características mecánicas de compresión, flexión y tracción.

La sostenibilidad económica efectiva del Thin Whitetopping es del 18% comparado con un recubrimiento bituminoso convencional del pavimento flexible en un periodo de 20 años.

Se evaluó que la sostenibilidad ambiental del concreto con 25% de geopolímero es 2.68 bolsas por metro cúbico menor del concreto convencional. Así mismo representa 102.51 kg de CO<sub>2</sub> que se dejan de producir, aportando en un impacto positivo al medio ambiente.

## RECOMENDACIONES

Evaluar la viabilidad económica y la escalabilidad del concreto con geopolímeros, considerando reducciones de costos y evaluando factores como materias primas, procesos, logística y aceptación del mercado para su aplicación masiva.

Evaluar el ciclo de vida del concreto con geopolímeros para comprender sus beneficios ambientales, considerando la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> y cemento Portland, y examinando otras categorías ambientales.

Fomentar la investigación y el desarrollo en tecnologías de geopolímeros para mejorar sus propiedades y ampliar su aplicabilidad en el sector de la construcción.

Implementar políticas que incentiven el uso de materiales sostenibles y de bajo impacto ambiental, incluyendo geopolímeros, en proyectos de construcción.

Implementar el uso de laboratorios químicos especializados, para la obtención de mejores resultados en base a la molaridad del hidróxido y silicato de sodio que son los activadores alcalinos, de esta manera se lograría conocer mas características, beneficios y mejores resultados.

## REFERENCIAS

- Alengaram, U. J., & Ramasamy, S. (2021). Potential applications of geopolymer concrete in construction: A review. ResearchGate. [https://www.researchgate.net/publication/355176133\\_Potential\\_applications\\_of\\_geopolymer\\_concrete\\_in\\_construction\\_A\\_review](https://www.researchgate.net/publication/355176133_Potential_applications_of_geopolymer_concrete_in_construction_A_review)
- Al-Hadidy, A., Tang, B., & Zhao, J. (2021). Impact of white topping on pavement serviceability. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 33(1), 04020310. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003499](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003499)
- American Association of State Highway and transportation Officials. (1993). AASHTO Guide for Design of Pavement Structures.
- American Concrete Institute [ACI] (2016). Guide to External Curing of Concrete (ACI 308R-16). <https://store.accuristech.com/products/preview/1917102>
- American Society for Testing and Materials International. (2017). ASTM C 618-17a, Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use. American Society for Testing Materials.
- Babbie, E. (2020). *The Practice of Social Research* (15th ed.). Cengage Learning.
- Bellum, R. R. (2022). Investigation on the accelerated pavement test track (APTT) in the development of road network using geopolymer concrete. *Cleaner Materials*, 4, 100074. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100074>
- Build-Construct. (2023). *Alligator cracking in asphalt pavements: Causes, effects, and preventive strategies*. <https://build-construct.com>.
- Castillo-Mena, O. F. (2019). Elaboración e implementación de un manual de control de calidad en obras viales municipales para el cantón de Cartago. [Tesis de pregrado, Instituto Tecnológico de Costa Rica]. Repositorio TEC. <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/10748>

- Chaney enterprises. (2020). Whitetopping. Chaneyenterprises.com.  
<https://www.chaneyenterprises.com/Whitetopping>
- Cheah, C. B., Part, W. K., y Ramli, M. (2015). The hybridizations of coal fly ash and wood ash for the fabrication of low alkalinity geopolymer load bearing block cured at ambient temperature. *Constr. Build. Mater.* 88, 41-55.  
doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.04.020
- Churata, R. (2023). Estudio comparativo y caracterización de geopolimeros obtenidos a partir de ceniza volcánica, ceniza volante, puzolana, caolín y relave minero para la obtención de materiales de construcción. [Trabajo de posgrado, Universidad Nacional San Agustín]. Repositorio UNAS.  
<https://hdl.handle.net/20.500.12773/16893>
- Cieza, N. A., & Sosa, L. M. (2023). Condición de un pavimento asfáltico para proponer el diseño en la aplicación de la tecnología Whitetopping para la rehabilitación de vías urbanas. [Tesis de pregrado, Universidad Ricardo Palma]. Repositorio Institucional URP.  
<https://repositorio.urp.edu.pe/handle/20.500.14138/6995>
- Cong, P., & Cheng, Y. (2021). Advances in geopolymer materials: A comprehensive review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 8(3), 283–314. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2021.03.004>
- Cynthia, J., Priya, G. S., Samuel, C. K., Suguna, M., Senthil, J., & Jebaraj, S. A. (2021). Traffic flow forecasting using machine learning techniques. *Webology*, 18(2). <https://www.webology.org/abstract.php?id=661#>
- Daswell. (2023, junio 16). Cenizas volantes: Propiedades, origen, ventajas, usos. Daswell. <https://daswell.com/es/blog/learn-about-fly-ash/>

- Davidovits, J. (2021). Geopolymers: Inorganic Polymeric New Materials. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 144(1), 145-153.  
<https://doi.org/10.1007/s10973-020-09909-7>
- Davidovits, J. (2021). Geopolymers: Inorganic Polymeric New Materials. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 144(1), 145-153.  
<https://doi.org/10.1007/s10973-020-09909-7>
- Dawson, C. (2021). *Introduction to research methods: A practical guide for anyone undertaking a research project* (7th ed.). Pearson Education Limited.
- Dimacro. (2023, septiembre 27). Que es una prueba de asentamiento y que necesitas para hacerla. DIMACRO SAS.  
<https://dimacro.com.co/blog/prueba-asentamiento/>
- Euroinnova. (2020). Mantenimiento de carreteras. Euroinnova Business School.  
<https://www.euroinnova.com/ingenieria/articulos/mantenimiento-de-carreteras>
- García, A., López, M., & Pérez, J. (2021). Factores influyentes en la determinación del Índice de Servicio Inicial y Final de pavimentos: un enfoque contemporáneo. *Revista de Ingeniería de Pavimentos*, 18(2), 56-69.
- González Morgado, D. E. (2018). Metodologías de reparación para pavimentos asfálticos bituminosos de mediano y bajo tránsito. [Tesis de Pregrado, Universidad Andrés Bello]. Repositorio UNAB.  
<https://repositorio.unab.cl/xmlui/handle/ria/7090>
- Gstir, J. R. (2023). Implementación de la tecnología whitetopping para la rehabilitación de pavimentos asfálticos en la vía universitaria tramo: Puente Tingo – Cayhuaynita, Distrito de Pillco Marca – Huánuco, 2021 [Tesis de

pregrado, Universidad de Huánuco]. Repositorio UDH  
<http://repositorio.udh.edu.pe/20.500.14257/4013>

Harrington, D., & Fick, G. (2014). *Guía para Capas de Refuerzo con Hormigón: Soluciones Sustentables para Capas de Refuerzo y Rehabilitación de Pavimentos Existentes* (3ª ed.). National Concrete Pavement Technology Center.

Huang, Q., & Ling, J. (2021). Measuring embodied carbon dioxide of the logistics industry in China: Based on industry stripping method and input-output model. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(38), 52780-52797. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16190-6>

Huang, Y. H. (2004). *Pavement Analysis and Design* (2nd ed.). Pearson Prentice Hall

Kumar, Ch & Uppuluri, Siva. (2020). A Study on Concrete Mix with Quaternary Blended Sustainable Materials for Ultra-Thin White Topping. *Jordan Journal of Civil Engineering*. 14(2):2020-161. [https://www.researchgate.net/publication/355771449\\_A\\_Study\\_on\\_Concrete\\_Mix\\_with\\_Quaternary\\_Blended\\_Sustainable\\_Materials\\_for\\_Ultra-Thin\\_White\\_Topping](https://www.researchgate.net/publication/355771449_A_Study_on_Concrete_Mix_with_Quaternary_Blended_Sustainable_Materials_for_Ultra-Thin_White_Topping)

Kuruvachalil, L., Sandanayake, M., Kumanayake, R., & Radhakrishna. (2022). Carbon emission and cost analysis of using hybrid fibre white topping overlays—A road rehabilitation feasibility study. *MDPI*, 2(1), 263-280, <https://doi.org/10.3390/futuretransp2010014>

Larios León, F. A. (2021). *Rehabilitación del pavimento flexible de la avenida Salvador Lara, Trujillo 2021*. [Tesis de Pregrado, Universidad Cesar Vallejo]. Repositorio UCV. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/79608>



- Leedy, P. D., & Ormrod, J. E. (2020). Practical research: Planning and design (13th ed.). Pearson.
- Lu, Y., & Hajj, R. (2021). Investigation of flexible pavement maintenance patching factors using a finite element model. *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience*, 2(1), 30. <https://doi.org/10.1186/s43065-021-00044-z>
- Mączka, & Piotr. (2022). Applied Sciences | Free Full-Text | Asphalt Mixtures and Flexible Pavement Construction Degradation Considering Different Environmental Factors. <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/23/12068>
- Martínez González., G. M. (2022). GEOPOLÍMEROS Y SUS APLICACIONES. Tecnm.mx. <https://celaya.tecnm.mx/geopolimeros-y-sus-aplicaciones/>
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2003). Reglamento Nacional de Vehículos – Decreto Supremo No 058- 2003-MTC. En Gob.pe. <https://www.sutran.gob.pe/wp-content/uploads/2020/06/Reglamento-Nacional-de-Veh%C3%ADculos-%E2%80%93-DS-N%C2%BA-058-2003-MTC.pdf>
- Myers, R., & Roque, R. (2024). *Evaluation of top-down cracking in thick asphalt pavements and the implications for pavement design*. Transportation Research Board.
- Palacios, D. S., & Arita, F.A., & Henríquez J. F. (2023). Restauración De Estructura De Pavimento Para El Bulevar Fuerzas Armadas La Lima Cortés, Mediante El Uso De Whitetopping. [Trabajo de Grado, Universidad Tecnológica Centroamericana]. Repositorio UNITEC. <https://repositorio.unitec.edu/handle/123456789/12771>
- Paucar, E. F. (2019). Evaluación de pavimentos asfálticos bituminosos y rígidos aplicando las metodologías de inspección visual de zonas y rutas en riesgo

- e índice de condición del pavimento para el mantenimiento vial, caso de la Av. Floral y Jr. Carabaya, Puno. [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional Del Altiplano]. Repositorio UNAP. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/12319>
- Pavement Interactive. (2023). *Depression*. <https://pavementinteractive.org>
- Pavementinteractive. (2020). Maintenance & rehabilitation. Pavementinteractive. <https://pavementinteractive.org/reference-desk/maintenance-and-r>
- Pérez, J. F. & Ramirez, J. K. (2018). EVALUACIÓN Y DETERMINACIÓN DE LAS PATOLOGÍAS DEL PAVIMENTO ASFÁLTICO EN LA AV. LOS TRÉBOLES–DISTRITO DE CHICLAYO. [Tesis de Pregrado, Universidad Señor de Sipán]. Repositorio USS. <https://repositorio.uss.edu.pe/handle/20.500.12802/5534>
- Pirca Ramos, W., & Chinchay Liviapoma, L. N. (2021). Propiedades mecánicas del concreto con fibras sintéticas para rehabilitar pavimento flexible mediante la técnica Whitetopping, en Avenida Central San Juan de Lurigancho, Lima, 2020 [Tesis de Pregrado, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. Repositorio UPC. <http://hdl.handle.net/10757/658535>
- Pradhan Mantri Gram, Y. (2022). National rural infrastructure development agency ministry of rural development government of India. Nic.in. <https://pmgsy.nic.in/sites/default/files/White-Topping-Booklet.pdf>
- Provis, J. L., & Bernal, S. A. (2020). Geopolymers and Related Alkali-Activated Materials. *Annual Review of Materials Research*, 50, 291-310. <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-081219-123157>

- Provis, J. L., & Bernal, S. A. (2020). Geopolymers and Related Alkali-Activated Materials. *Annual Review of Materials Research*, 50, 291-310. <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-081219-123157>
- Ratha, B., Debnath, R., Paul, A., & Velusamy, P. (2020). Performance of natural rubber latex on calcined clay-based glass fiber-reinforced geopolymer concrete. *Innovative Infrastructure Solutions*, 5(3), Article 61. <https://doi.org/10.1007/s42107-020-00261-z>
- Rios, R., & Junior, B. (2020). Evaluación de la carpeta de rodadura y la optimización aplicando el ultra-thin whitetopping como método de rehabilitación en la Av. Gerardo Unger, Comas – Lima. [Tesis de Pregrado, Universidad César Vallejo]. Repositorio UCV. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/48756>
- Rodríguez, P., Gómez, L., & Martínez, R. (2023). Avances tecnológicos en la evaluación del módulo k de la subrasante para el diseño de pavimentos. *Revista Internacional de Ingeniería de Pavimentos*, 19(2), 67-78.
- Rondón Quintana, H. A., & Reyes Lizcano, F. A. (2022). *Pavimentos Materiales, construcción y diseño (Segunda Edición)*. ECOE EDICIONES.
- Savadkoohi, M. S., & Reisi, M. (2020). Environmental protection based sustainable development by utilization of granite waste in Reactive Powder Concrete. *Journal of Cleaner Production*, 266, 121973. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121973>
- Sharath Chandra, Sathvik & Shakor, Pshtiwan & Mohmmad, Sarwar & Awuzie, B.O & Singh, Atul & Rauniyar, Abishek & Karakouzian, M.. (2023). *Evaluating the potential of geopolymer concrete as a sustainable alternative for thin white-topping pavement. Frontiers in Materials*, 10, Artículo 1181474. <https://doi.org/10.3389/fmats.2023.1181474>

- Serment, V. (2012). Pavimentos Rígidos y Flexibles, Ventajas y Desventajas. Asociación Mexicana De Ingeniería De Vías Terrestres, pp. 1–17.
- Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción [SENCICO]. (2020). NORMA E.060 CONCRETO ARMADO. Gob.pe. <https://www.gob.pe/institucion/sencico/informes-publicaciones/887225-normas-del-reglamento-nacional-de-edificaciones-rne>
- Shahin, M.Y., Khon, S.D. (1987). Método de evaluación de pavimentos (PCI)- Reporte técnico M-268. Caracas: USACE.
- Shaughnessy, J. J., & Zechmeister, E. B. (2018). Research Methods in Psychology (11th ed.). McGraw-Hill Education.
- Singh, R. P., Vanapalli, K. R., Cheela, V. R. S., Peddireddy, S. R., Sharma, H. B., & Mohanty, B. (2023). Fly ash, GGBS, and silica fume based geopolymer concrete with recycled aggregates: Properties and environmental impacts. Construction and Building Materials, 391, 131168. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131168>
- Singleton, R. A., & Straits, B. C. (2018). Approaches to Social Research (6th ed.). Oxford University Press.
- Smith, J., Brown, K., & Johnson, L. (2020). Impacto del clima y la composición del suelo en la evaluación de la serviciabilidad del pavimento. Revista Internacional de Ingeniería de Carreteras, 14(3), 78-91.
- Tupayachy, D. P. (2021) Estudio y caracterización de geopolímeros a partir de ceniza volcánica para la obtención de materiales de construcción. . [Tesis de Doctorado, Universidad Católica de Santa María]. Repositorio UCSM. <https://repositorio.ucsm.edu.pe/handle/20.500.12920/10562>

- Turner, L. K., & Collins, F. G. (2013). Carbon dioxide equivalent (CO<sub>2</sub>-e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete. *Construction and Building Materials*, 43, 125-130.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.041>
- Turner, L. K., & Collins, F. G. (2013). Carbon dioxide equivalent (CO<sub>2</sub>-e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete. *Construction and Building Materials*, 43, 125-130.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.041>
- Universidad Nacional de Colombia, & Ministerio de transporte Instituto Nacional de Vías. (2006). Estudio e investigación del estado actual de las obras de la red nacional de carreteras. Manual para la inspección visual de pavimentos asfálticos bituminosos. 1.
- Uzan, J. (2004). Permanent Deformation in Flexible Pavements. *Journal of Transportation Engineering*, 130(1), 6-13.  
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2004\)130:1\(6\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2004)130:1(6))
- Van Deventer, J. S. J., Provis, J. L., & Duxson, P. (2022). Alkali-activated materials. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-91015-0>
- Van Deventer, J. S. J., Provis, J. L., & Duxson, P. (2022). Alkali-activated materials. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-91015-0>
- Venugopalan, K. V. (2023) White Topping Revolution for Cost-Effective and Long-Lasting Treatment over the Existing Bituminous Roads.  
<https://ijisrt.com/assets/upload/files/IJISRT23DEC1206.pdf>
- Wang, H., Zhang, Z., Provis, J., Reid, A. (2021). Fly ash-based geopolymers: The relationship between composition, pore structure and efflorescence. *Cement*

and Concrete Research, 140, 106292.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106292>

Zhang, Y., Provis, J. L., & Wang, H. (2023). Long-term durability and mechanical performance of geopolymers for sustainable infrastructure. *Journal of Cleaner Production*, 321, 128953.

Zhang, Y., Provis, J. L., & Wang, H. (2023). Long-term durability and mechanical performance of geopolymers for sustainable infrastructure. *Journal of Cleaner Production*, 321, 128953.

## ANEXOS

### Anexo 1: Análisis visual de estado del pavimento flexible



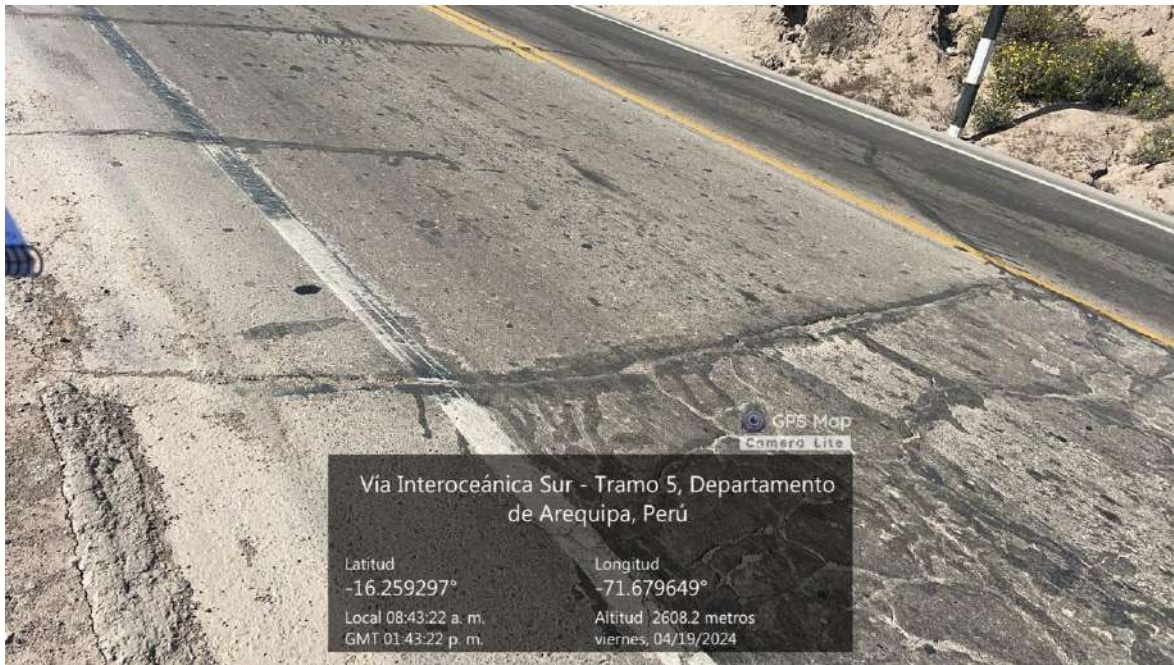




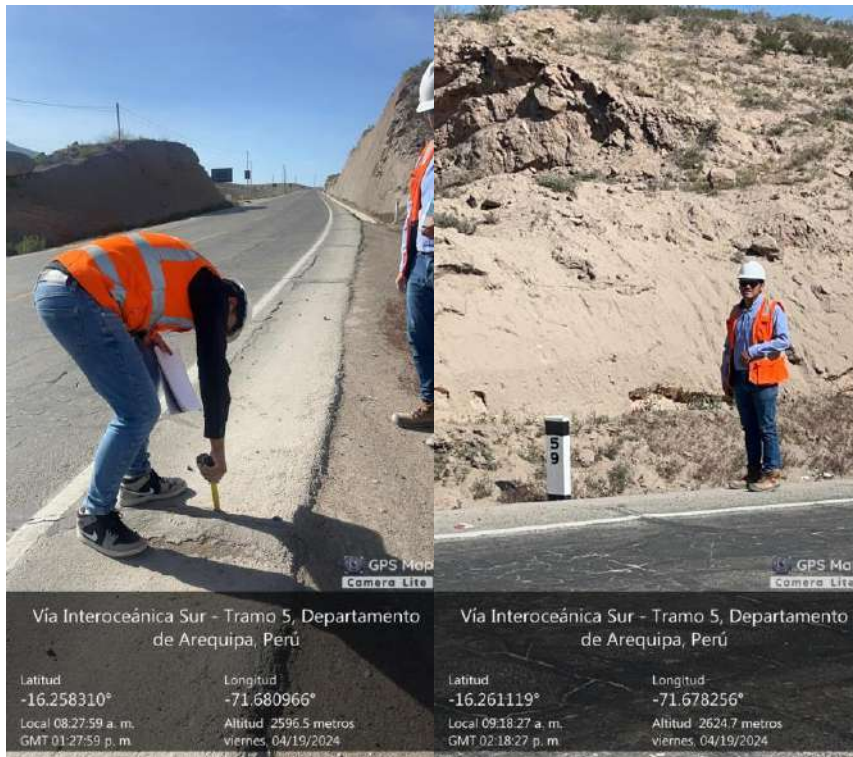




















## Anexo 2: Proceso de diseño de mezcla













### Anexo 3: Procedimiento de ensayo de trabajabilidad del concreto

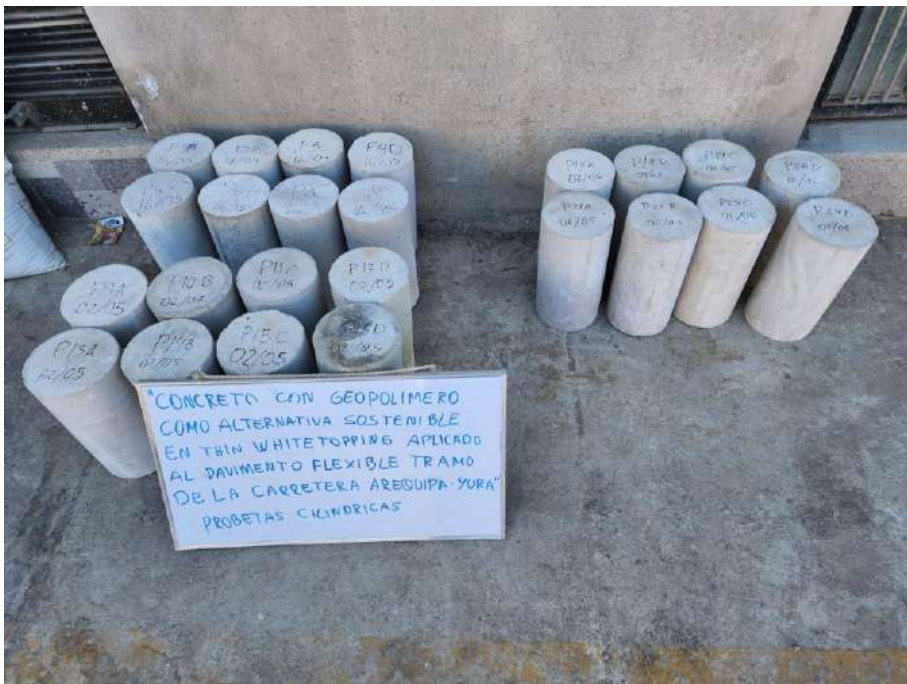






**Anexo 4: Codificación y preparación de probetas de concreto cilíndricas**











## Anexo 5: Maquina de compresión de probetas





## Anexo 6: Análisis de condición de pavimento, método PCI

### MUESTREO

#### a) Muestreo y unidades de muestra

ASTM D6433, inciso (2.1.7.) menciona que el area de muestreo es 225 +/- 90 m2

Maximo:	315.00 m2	
Minimo:	135.00 m2	
Tramo a estudiar:	59+780.00	
Longitud de la via:	1000.00 m	
Ancho de la calzada:	7.50 m	
Longitud de la muestra:	40.00 m	
Area de la muestra:	300.00 m2	

N= 25.00	Numero total de la muestra
s= 10	Desviacion estandar; ASTM D6433, inciso (7.5.2)(p. asfalto)
e= 5%	Error aceptable, ASTM D6433, inciso (7.5.2)

ASTM D6433, inciso (7.5.2)

$$n = \frac{N \times s^2}{\frac{e^2}{4} \times (N - 1) + s^2}$$

n= 10.00	Unidades a ser evaluadas
Se obtiene 25.00	Unidades de muestra
de las cuales 10.00	Deberan ser evaluadas

#### b) Selección de unidades de muestreo

ASTM D6433, inciso (7.5.3)

$$i = \frac{N}{n}$$

i= 2.50	intervalo de muestreo
Por lo tanto el intervalo de muestreo será:	
i= 2.00	intervalo de muestreo
































	<b>HOJA RESUMEN PARA EL ANALISIS DEL INDICE DE CONDICIÓN DE PAVIMENTO</b>
	<b>METODO PCI</b>
<b>PROYECTO</b>	APLICACIÓN DE CONCRETO GEOPOLIMERO COMO ALTERNATIVA SOSTENIBLE EN THIN WHITETOPPING APLICADO A PAVIMENTOS FLEXIBLES EN EL TRAMO DE LA CARRETERA AREQUIPA - YURA

N	AREA (m2)	UNIDAD DE MUESTREO	VDC	PCI	CLASIFICACION	ACCION
1	300.00	1.00	70.00	30.00	MALO	Rehabilitacion, Nueva estructura
2	300.00	2.00	65.00	35.00	MALO	Rehabilitacion, Nueva estructura
3	300.00	3.00	70.50	29.50	MALO	Rehabilitacion, Nueva estructura
4	300.00	4.00	66.00	34.00	MALO	Rehabilitacion, Nueva estructura
5	300.00	5.00	65.50	34.50	MALO	Rehabilitacion, Nueva estructura
6	300.00	6.00	61.00	39.00	MALO	Rehabilitacion, Nueva estructura
7	300.00	7.00	60.00	40.00	MALO	Rehabilitacion, Nueva estructura
8	300.00	8.00	59.00	41.00	REGULAR	Mantenimiento correctivo
9	300.00	9.00	87.00	13.00	MUY MALO	Reconstruccion
10	300.00	10.00	66.00	34.00	MALO	Rehabilitacion, Nueva estructura

*Tabla 12.: Correlación de categoría de acción con un rango de PCI (Jujo B, 2005).*

Categoría de acción	Rango	Clasificación	Simbología
Mantenimiento Preventivo	100 – 85	Excelente	
Mantenimiento Preventivo Rutinario y/o Periódico	85 – 70	Muy Bueno	
	70 – 55	Bueno	
Mantenimiento Correctivo	55 – 40	Regular	
Rehabilitación – Refuerzo Estructural	40 – 25	Malo	
Rehabilitación – Reconstrucción	25 – 10	Muy Malo	
	10 – 0	Fallado	

## Anexo 7: Estudio de Trafico del tramo de carretera

		CONTEO Y CLASIFICACION VEHICULAR																			
ESTACION: C-1		PROYECTO: "CONCRETO CON GEOPOLIMERO COMO MATERIAL SOSTENIBLE EN THIN WHITETOPPING APLICADO A PAVIMENTO FLEXIBLE TRAMO DE LA CARRETERA AREQUIPA - YURA"														FECHA: 21/04/2024		UBICACION: YURA			
Hora	Sentido	VEHICULOS LIGEROS				BUS		CAMIONES UNITARIOS				SEMITRAILER				TRAILER				TOTAL	%
		Autos	Pick up	C. Rural	Micros	B2	B3-1	C2	C3	C4	2S1/2S2	2S3	3S1/3S2	>=3S3	2T2	2T3	3T2	3T3			
0-1	E																			0	0.0%
	S																			0	0.0%
1-2	E																			0	0.0%
	S																			0	0.0%
2-3	E																			0	0.0%
	S																			0	0.0%
3-4	E																			0	0.0%
	S																			0	0.0%
4-5	E																			0	0.0%
	S																			0	0.0%
5-6	E																			0	0.0%
	S																			0	0.0%
6-7	E	4	4	3	1															12	21.8%
	S	1																		1	2.4%
7-8	E	4						3												7	12.7%
	S	1		1	1															3	7.1%
8-9	E	2	2																	4	7.3%
	S	2						1												3	7.1%
9-10	E	1			1															2	3.6%
	S	2																		2	4.8%
10-11	E	1		1																2	3.6%
	S	2			1															3	7.1%
11-12	E	3	2					2												7	12.7%
	S	2																		2	4.8%
12-13	E	4	1		1															6	10.9%
	S	1		1				1												3	7.1%
13-14	E	1																		1	1.8%
	S	2	1		1															4	9.5%
14-15	E	3																		3	5.5%
	S	1	2	2				2												7	16.7%
15-16	E	3			1															4	7.3%
	S	1																		1	2.4%
16-17	E	2																		2	3.6%
	S	1	3		1															5	11.9%
17-18	E	1																		1	1.8%
	S	1						1												2	4.8%
18-19	E	1			1															2	3.6%
	S	1	2																	3	7.1%
19-20	E	1		1																2	3.6%
	S	1		1	1															3	7.1%
20-21	E																			0	0.0%
	S																			0	0.0%
21-22	E																			0	0.0%
	S																			0	0.0%
22-23	E																			0	0.0%
	S																			0	0.0%
23-24	E																			0	0.0%
	S																			0	0.0%
Parcial	E	31	9	5	5	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	56	100.0%
	S	18	8	5	5	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	42	100.0%
TOTAL AMBOS SENT.		50	17	10	10	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	98	
		51.56%	17.53%	10.31%		0.00%	0.00%	10.31%	0.00%	0.00%				0.00%							100.0%

CONTED Y CLASIFICACION VEHICULAR

ESTACION: C-1

FECHA: 22/04/2024

UBICACION: YURA

PROYECTO: "CONCRETO CON GEOPOLIMERO COMO MATERIAL SOSTENIBLE EN THIN WHITETOPPING APLICADO A PAVIMENTO FLEXIBLE TRAMO DE LA CARRETERA AREQUIPA - YURA"

Hora	Sentido	VEHICULOS LIGEROS				BUS		CAMIONES UNITARIOS				SEMITRAILER				TRAILER				TOTAL	%
		Autos	Pick up	C. Rural	Micras	B2	B3-1	C2	C3	C4	2S1/2S2	2S3	3S1/3S2	>>3S3	ZT2	ZT3	3T2	3T3			
0-1	E																		0	0.0%	
	S																		0	0.0%	
1-2	E																		0	0.0%	
	S																		0	0.0%	
2-3	E																		0	0.0%	
	S																		0	0.0%	
3-4	E																		0	0.0%	
	S																		0	0.0%	
4-5	E																		0	0.0%	
	S																		0	0.0%	
5-6	E																		0	0.0%	
	S																		0	0.0%	
6-7	E	8	4	5															17	18.9%	
	S	9		1															10	10.2%	
7-8	E	7	4		1														12	13.3%	
	S	8		3															11	11.2%	
8-9	E	2						1											3	3.3%	
	S	3			1														4	4.1%	
9-10	E	5		3															8	8.9%	
	S	3																	3	3.1%	
10-11	E	2		1	1														4	4.4%	
	S	3																	3	3.1%	
11-12	E	1						1											2	2.2%	
	S	4			1														5	5.1%	
12-13	E	3																	3	3.3%	
	S	1																	1	1.0%	
13-14	E	2	4		1														7	7.8%	
	S	4																	4	4.1%	
14-15	E	1																	1	1.1%	
	S	2		1	1														4	4.1%	
15-16	E	3																	3	3.3%	
	S	3		1				1											5	5.1%	
16-17	E	3			1														4	4.4%	
	S	3		4															7	7.1%	
17-18	E	9																	9	10.0%	
	S	4			1			1											6	6.1%	
18-19	E	8																	6	6.7%	
	S	11	3	3															17	17.9%	
19-20	E	10			1														11	12.2%	
	S	15	2	1															18	18.4%	
20-21	E																		0	0.0%	
	S																		0	0.0%	
21-22	E																		0	0.0%	
	S																		0	0.0%	
22-23	E																		0	0.0%	
	S																		0	0.0%	
23-24	E																		0	0.0%	
	S																		0	0.0%	
Parcial	E	62	12	9	6	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	90	100.0%	
	S	73	5	14	4	0	0	2	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	98	100.0%	
TOTAL AMBOS SENT.		135	17	23	9	0	0	4	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	188		
		71.81%	9.04%	12.23%	4.79%	0.00%	0.00%	2.13%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%		



CONTEO Y CLASIFICACION VEHICULAR

ESTACION: C-1 FECHA: 23/04/2024 UBICACION: YURA

PROYECTO: "CONCRETO CON GEOPOLIMERO COMO MATERIAL SOSTENIBLE EN THIN WHITETOPPING APLICADO A PAVIMENTO FLEXIBLE TRAMO DE LA CARRETERA AREQUIPA - YURA"

Hora	Sentido	VEHICULOS LIGEROS				BUS		CAMIONES UNITARIOS			SEMITRAILER				TRAILER				TOTAL	%
		Autos	Pick up	C. Rural	Micros	B2	B3-1	C2	C3	C4	20/202	203	30/302	>=303	2T2	2T3	3T2	3T3		
0-1	E																		0	0.0%
	S																		0	0.0%
1-2	E																		0	0.0%
	S																		0	0.0%
2-3	E																		0	0.0%
	S																		0	0.0%
3-4	E																		0	0.0%
	S																		0	0.0%
4-5	E																		0	0.0%
	S																		0	0.0%
5-6	E																		0	0.0%
	S																		0	0.0%
6-7	E	5	6	3					2										16	19.2%
	S	7			1														8	9.1%
7-8	E	5	5	2															12	14.6%
	S	3	1																4	4.9%
8-9	E	3			2				1										6	7.3%
	S	3	1	1															5	6.7%
9-10	E	2																	2	2.4%
	S	4	2																6	6.8%
10-11	E	2							2										4	4.9%
	S	2		1															3	3.4%
11-12	E	3	1		1														5	6.1%
	S	1							1										2	2.3%
12-13	E	2	1	1															4	4.9%
	S	1			2														3	3.4%
13-14	E	3																	3	3.7%
	S	5	4	2	1				1										13	14.8%
14-15	E	3		1															4	4.9%
	S	8			1				1										10	11.4%
15-16	E	2																	2	2.4%
	S	1	2		1														4	4.9%
16-17	E	2																	2	2.4%
	S	2		2															4	4.9%
17-18	E	4																	4	4.9%
	S	4	3		1														8	9.1%
18-19	E	7																	7	8.5%
	S	13	2						2										17	19.3%
19-20	E	10	1																11	13.4%
	S	1																	1	1.1%
20-21	E																		0	0.0%
	S																		0	0.0%
21-22	E																		0	0.0%
	S																		0	0.0%
22-23	E																		0	0.0%
	S																		0	0.0%
23-24	E																		0	0.0%
	S																		0	0.0%
Puntal	E	53	14	7	3	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	82	100.0%
	S	55	16	6	7	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	86	100.0%
TOTAL AMBOS SENT.		108	28	13	10	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	170	
		63.52%	17.00%	7.65%	5.88%	0.00%	0.00%	5.88%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	

CONTEO Y CLASIFICACION VEHICULAR

ESTACION: C-1 FECHA: 24/04/2024 UBICACION: YURA  
 PROYECTO: "CONCRETO CON GEOPOLIMERO COMO MATERIAL SOSTENIBLE EN THIN WHITETOPPING APLICADO A PAVIMENTO FLEXIBLE TRAMO DE LA CARRETERA AREQUIPA - YURA"

Hora	Sentido	VEHICULOS LIGEROS				BUS		CAMIONES UNITARIOS				SEMIRTRAILER				TRAILER				TOTAL	%
		Autos	Pick up	C. Rural	Micros	B2	B3-1	C2	C3	C4	2S1/2S2	2S1	3S1/3S2	>=3S3	2T2	2T3	3T2	3T3			
0-1	E																		0	0.0%	
	S																		0	0.0%	
1-2	E																		0	0.0%	
	S																		0	0.0%	
2-3	E																		0	0.0%	
	S																		0	0.0%	
3-4	E																		0	0.0%	
	S																		0	0.0%	
4-5	E																		0	0.0%	
	S																		0	0.0%	
5-6	E																		0	0.0%	
	S																		0	0.0%	
6-7	E	14	6	2				2											24	23.3%	
	S	10	1		2														13	10.2%	
7-8	E	6	8	3				1											18	17.5%	
	S	2	1																3	2.4%	
8-9	E	4	4		1														9	8.7%	
	S	6																	6	4.7%	
9-10	E	4		1	1			1											7	6.8%	
	S	2	1					1											4	3.1%	
10-11	E	4																	4	3.9%	
	S	3			2														5	3.9%	
11-12	E	2			1														3	2.9%	
	S	2	1	1	1			1											6	4.7%	
12-13	E	1	2																3	2.9%	
	S	3			2														5	3.9%	
13-14	E	2																	2	1.9%	
	S	10	3	1				1											15	11.6%	
14-15	E	1			2														3	2.9%	
	S	11	2																13	10.2%	
15-16	E	1	1																2	1.9%	
	S	2			1														3	2.4%	
16-17	E	1	1					1											3	2.9%	
	S	4		1															5	3.9%	
17-18	E	16																	16	15.5%	
	S	3	3																6	4.7%	
18-19	E	4			1														5	4.9%	
	S	17	2	3				1											23	18.1%	
19-20	E	4																	4	3.9%	
	S	14	5		1														20	15.7%	
20-21	E																		0	0.0%	
	S																		0	0.0%	
21-22	E																		0	0.0%	
	S																		0	0.0%	
22-23	E																		0	0.0%	
	S																		0	0.0%	
23-24	E																		0	0.0%	
	S																		0	0.0%	
Parcial	E	84	22	6	6	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	103	100.0%	
	S	89	19	6	9	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	127	100.0%	
TOTAL AMBOS SENT.		153	41	12	15	0	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	230		
		66.52%	17.83%	5.22%	6.52%	0.00%	0.00%	3.91%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	100.0%		



CONTEO Y CLASIFICACION VEHICULAR

ESTACION: C-1 FECHA: 25/04/2024 UBICACION: YURA

PROYECTO: "CONCRETO CON GEOPOLIMERO COMO MATERIAL SOSTENIBLE EN THIN WHITE TOPPING APLICADO A PAVIMENTO FLEXIBLE TRAMO DE LA CARRETERA AREQUIPA - YURA"

Hora	Sentido	VEHICULOS LIGEROS				BUS		CAMIONES UNITARIOS				SEMITRAILER				TRAILER				TOTAL	%
		Autos	Pick up	C. Rural	Micros	B2	B3-1	C2	C3	C4	ZS1/ZS2	ZS3	S31/S32	>=S33	ZT2	ZT3	ZT2	ZT3			
0-1	E																		0	0.0%	
	S																		0	0.0%	
1-2	E																		0	0.0%	
	S																		0	0.0%	
2-3	E																		0	0.0%	
	S																		0	0.0%	
3-4	E																		0	0.0%	
	S																		0	0.0%	
4-5	E																		0	0.0%	
	S																		0	0.0%	
5-6	E																		0	0.0%	
	S																		0	0.0%	
6-7	E	9	7		1														17	17.2%	
	S	5	1																6	5.9%	
7-8	E	2	3					2											7	7.1%	
	S	7	1		1														9	8.8%	
8-9	E	3			1														4	4.0%	
	S	1	1																2	2.0%	
9-10	E	4			1			1											6	6.1%	
	S	3	1																4	3.9%	
10-11	E	2																	2	2.0%	
	S	3			1			1											5	4.9%	
11-12	E	3	2		1														6	6.1%	
	S	3	1																4	3.9%	
12-13	E	1			1														2	2.0%	
	S	1			1			2											4	3.9%	
13-14	E	4	2					2											6	6.1%	
	S	12	3		1														18	18.7%	
14-15	E	4						1											5	5.1%	
	S	4																	4	3.9%	
15-16	E	3	1		1														5	5.1%	
	S	1																	1	1.0%	
16-17	E	1			1														2	2.0%	
	S	3	4																7	6.9%	
17-18	E	17	1		1														19	19.2%	
	S	4	2					1											7	6.9%	
18-19	E	10	1																11	11.1%	
	S	17	3		2														22	21.6%	
19-20	E	7																	7	7.1%	
	S	10	1																11	10.8%	
20-21	E																		0	0.0%	
	S																		0	0.0%	
21-22	E																		0	0.0%	
	S																		0	0.0%	
22-23	E																		0	0.0%	
	S																		0	0.0%	
23-24	E																		0	0.0%	
	S																		0	0.0%	
Parcial	E	70	17	0	8	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	99	100.0%	
	S	74	18	0	6	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	102	100.0%	
TOTAL AMBOS SENT		144	35	0	14	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	201		
		71.64%	17.41%	0.00%	6.97%	0.00%	0.00%	3.96%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%		

CONTEO Y CLASIFICACION VEHICULAR

ESTACION: C-1 FECHA: 26/04/2024 UBICACION: YURA  
 PROYECTO: "CONCRETO CON GEOPOLIMERO COMO MATERIAL SOSTENIBLE EN THIN WHITETOPPING A PAVIMENTO FLEXIBLE TRAMO DE LA CARRETERA AREQUIPA - YURA"

Hora	Sentido	VEHICULOS LIGEROS				BUS		CAMIONES UNITARIOS				SEMITRAILER				TRAILER				TOTAL	%
		Autos	Pick up	C. Rural	Micros	B2	B3-1	C2	C3	C4	2S1/2S2	2S3	3S1/3S2	>>3S3	2T2	2T3	3T2	3T3			
0-1	E																			0	0.0%
	S																			0	0.0%
1-2	E																			0	0.0%
	S																			0	0.0%
2-3	E																			0	0.0%
	S																			0	0.0%
3-4	E																			0	0.0%
	S																			0	0.0%
4-5	E																			0	0.0%
	S																			0	0.0%
5-6	E																			0	0.0%
	S																			0	0.0%
6-7	E	3	6	5				1												15	20.5%
	S	2	1		1															4	3.7%
7-8	E	2	4	1	1				2											10	13.7%
	S	5																		5	4.8%
8-9	E	3			1															4	5.5%
	S	5																		5	4.8%
9-10	E	2	1						1											4	5.5%
	S	2			1															3	2.8%
10-11	E	1		1																2	2.7%
	S	1						1												2	1.9%
11-12	E	3			1															4	5.5%
	S	2			1															3	2.8%
12-13	E	1																		1	1.4%
	S	3	1		1															5	4.6%
13-14	E	4							1											5	6.8%
	S	9	2																	11	10.2%
14-15	E	1			1															2	2.7%
	S	12																		12	11.1%
15-16	E	1	3					1												5	6.8%
	S	4			1															5	4.6%
16-17	E	3	1																	4	5.5%
	S	1							2											3	2.8%
17-18	E	8			1															9	12.3%
	S	2		4	1				1											8	7.4%
18-19	E	2																		2	2.7%
	S	19			1				1											21	19.4%
19-20	E	5	1																	6	8.2%
	S	19	2																	21	19.4%
20-21	E																			0	0.0%
	S																			0	0.0%
21-22	E																			0	0.0%
	S																			0	0.0%
22-23	E																			0	0.0%
	S																			0	0.0%
23-24	E																			0	0.0%
	S																			0	0.0%
Parcial	E	39	16	7	5	0	0	2	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	73	100.0%
	S	86	6	4	7	0	0	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	108	100.0%
TOTAL AMBOS SENT.		125	22	11	12	0	0	4	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	181	
		69.06%	12.15%	6.08%	6.63%	0.00%	0.00%	2.21%	3.87%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	100.0%	

ESTACION:		CONTEO Y CLASIFICACION VEHICULAR													FECHA:		UBICACION:			
C-1															27/04/2024		YURA			
PROYECTO:		"CONCRETO CON GEOPOLIMERO COMO MATERIAL SOSTENIBLE EN THIN WHITETOPPING APLICADO A PAVIMENTO FLEXIBLE TRAMO DE LA CARRETERA AREQUIPA - YURA"																		
Hora	Sentido	VEHICULOS LIGEROS				BUS		CAMIONES UNITARIOS				SEMITRAILER			TRAILER			TOTAL	%	
		Autos	Pick up	C. Rural	Micros	B2	B3-1	C2	C3	C4	2S1/2S2	2S3	3S1/3S2	4+3S3	T12	T13	T22			T23
0-1	E																		0	0.0%
0-1	S																		0	0.0%
1-2	E																		0	0.0%
1-2	S																		0	0.0%
2-3	E																		0	0.0%
2-3	S																		0	0.0%
3-4	E																		0	0.0%
3-4	S																		0	0.0%
4-5	E																		0	0.0%
4-5	S																		0	0.0%
5-6	E																		0	0.0%
5-6	S																		0	0.0%
6-7	E	17	5	2															24	32.0%
6-7	S	6			1				2										9	8.8%
7-8	E	6	2	3															11	14.7%
7-8	S	4																	4	4.3%
8-9	E	2			1														3	4.0%
8-9	S	3	1																4	4.3%
9-10	E	2		1															3	4.0%
9-10	S	4			1														5	5.4%
10-11	E	2																	2	2.7%
10-11	S	2																	2	2.2%
11-12	E	4			1														5	6.7%
11-12	S	4		1															5	5.4%
12-13	E	1	3																4	5.3%
12-13	S	2			1				2										5	5.4%
12-13	E	3																	3	4.0%
13-14	S	10																	10	10.9%
14-15	E	2			1				1										4	5.3%
14-15	S	5																	5	5.4%
15-16	E	1																	1	1.3%
15-16	S	1	1		1														3	3.3%
16-17	E	3																	3	4.0%
16-17	S	1	2	2					1										6	6.5%
17-18	E	6			1														7	9.3%
17-18	S	2																	2	2.2%
18-19	E	2																	2	2.7%
18-19	S	11	4		1														16	17.4%
18-19	E	3																	3	4.0%
19-20	S	15	1																16	17.4%
20-21	E																		0	0.0%
20-21	S																		0	0.0%
21-22	E																		0	0.0%
21-22	S																		0	0.0%
22-23	E																		0	0.0%
22-23	S																		0	0.0%
23-24	E																		0	0.0%
23-24	S																		0	0.0%
Parcial	E	54	10	6	4	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	75	100.0%
Parcial	S	70	9	3	5	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	92	100.0%
TOTAL AMBOS SENT.		124	19	9	9	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	167	
		74.25%	11.38%	5.59%	5.38%	0.00%	0.00%	3.55%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	100.0%	

ESTACION: C-1  
 PROYECTO: "CONCRETO CON GEOPOLIMERO COMO MATERIAL SOSTENIBLE EN THIN WHITETOPPING APLICADO A PAVIMENTO FLEXIBLE TRAMO DE LA CARRETERA AREQUIPA - YURA"  
 K= 1 UBICACION: YURA

		VEHICULOS LIGEROS				BUS		CAMIONES UNITARIOS				SUBTOTAL	TOTAL
Fecha	Sentido	Autos	Pick up	C. Rural	Micros	B2	B3-1	C2	C3	C4			
21-Abr	E	31	9	5	5	0	0	5	0	0	55	97.00	
21-Abr	S	19	8	5	5	0	0	5	0	0	42		
22-Abr	E	62	12	9	5	0	0	2	0	0	90	188.00	
22-Abr	S	73	5	14	4	0	0	2	0	0	98		
23-Abr	E	53	14	7	3	0	0	5	0	0	82	170.00	
23-Abr	S	55	15	6	7	0	0	5	0	0	88		
24-Abr	E	64	22	6	6	0	0	5	0	0	103	230.00	
24-Abr	S	89	19	6	9	0	0	4	0	0	127		
25-Abr	E	70	17	0	8	0	0	4	0	0	99	201.00	
25-Abr	S	74	18	0	6	0	0	4	0	0	102		
26-Abr	E	39	16	7	5	0	0	2	4	0	73	181.00	
26-Abr	S	86	6	4	7	0	0	2	3	0	108		
27-Abr	E	54	10	6	4	0	0	1	0	0	75	167.00	
27-Abr	S	70	9	3	5	0	0	5	0	0	92		
Total		839	180	78	79	0	0	51	7	0			

## Anexo 8: Cálculo de ESAL para diseño de capa de concreto

### CALCULO DEL ESAL PARA PAVIMENTO RIGIDO (METODO AASHTO)

ESTACION: C-1  
 PROYECTO: "CONCRETO CON GEOPOLÍMERO COMO MATERIAL SOSTENIBLE EN THIN WHITETOPPING APLICADO A PAVIMENTO FLEXIBLE TRAMO DE LA CARRETERA

DATOS:

#### 1) PERIODO DE DISEÑO

T= 20 años

TIPO DE CARRETERA	PERIODO DE DISEÑO
Urbana con altos volúmenes de tránsito	30 - 50 años
Interurbana con altos volúmenes de tránsito	20 - 50 años
Pavimentada con bajos volúmenes de tránsito	15 - 25 años
Revestidas con bajos volúmenes de tránsito	10 - 20 años

#### 2) ESPESOR DE PAVIMENTO

esp = 200 mm asumido

#### 3) INDICES DE SERVICIABILIDAD

Pt = 4.5 sevicabilidad inicial

Pt = 2 sevicabilidad final

$\Delta PSI = P_o - P_t = 2.5$

INDICE DE SERVICIABILIDAD INICIAL
Po = 4.5 para pavimentos rígidos
Po = 4.2 para pavimentos flexibles

INDICE DE SERVICIABILIDAD FINAL
Pt = 2.5 o más para caminos muy importantes
Pt = 2.0 para caminos de tránsito menor

#### 4) FACTOR DE DISTRIBUCION POR DIRECCION

D = 0.5

Número de carriles en ambas direcciones	LD 10
2	0.50
4	0.45
6 o más	0.40

factor de direccion ida y vuelta

#### 5) FACTOR DE DISTRIBUCION POR CARRIL

L = 1 un carril en cada sentido =>

W18 = 100%

Nº DE CARRIL EN CADA SENTIDO	PORCENTAJE DE W18 EN EL CARRIL DE DISEÑO
1	100
2	80 - 100
3	60 - 80
4 o más	50 - 75

#### 6) CODIGO DE EJE CARGADO

L2 = tipo de eje en contacto con el pavimento

L2 = 1	eje simple
L2 = 2	eje tandem
L2 = 3	eje tridem

**CALCULO DEL ESAL PARA PAVIMENTO RIGIDO (METODO AASHTO)**

ESTACION: C-1

PROYECTO: "CONCRETO CON GEOPOLIMERO COMO MATERIAL SOSTENIBLE EN THIN WHITETOPPING APLICADO A PAVIMENTO FLEXIBLE TRAMO DE LA CARRETERA AREQUIPA - YURA"

UBICACIÓN: YURA

DATOS: T= 20 años

esp= 200 mm

Pt = 2 severabilidad final

D = 0.5 factor de direccion ida y vuelta

L = 1 un carril en cada sentido ⇒ W18 = 100%

FORMULA DEL ESAL PARA  
PAVIMENTO RIGIDO  
METODO DEL AASHTO

$$Fec = \frac{W_{fis}}{W_{fr}}$$

$$\log \frac{W_{fr}}{W_{fis}} = 4.62 \log (18+1) - 4.62 \log (L_1 + L_2) + 3.28 \log (L_2) + \frac{G_1}{\beta_1} - \frac{C}{\beta_1}$$

$$G_1 = \log \frac{4.5 - Pt}{4.5 - 1.5} \quad \beta_1 = 1 + \frac{3.63 (L_1 + L_2)^{0.20}}{(D + 1)^{0.44} (L_2)^{0.32}}$$

FACTOR DE CRECIMIENTO:

$$G \cdot Y = \frac{(1+r)^Y - 1}{r}$$

ESAL = ni = (no) (G) (D) (L) (365) (Y)

En Donde:  
W<sub>fr</sub> = # Aplicaciones de carga definida al final del tiempo t  
W<sub>fis</sub> = # Aplicaciones de carga equivalente al final del tiempo t

Tipo de Vehículo	Autos				Pick up				C. Rural				Micros				B2				B2-1				BUS				CAMIONES UNITARIOS			
	delant.	post.	delant.	post.	delant.	post.	delant.	post.	delant.	post.	delant.	post.	delant.	post.	delant.	post.	delant.	post.	delant.	post.	delant.	post.	delant.	post.	delant.	post.	delant.	post.	delant.	post.		
CARGA	1	0.8	1.2	1.5	2	3	7	11	7	16	7	11	7	16	7	11	7	11	7	18	7	18	7	23	7	18	7	18	7	23		
Lx (kips)	2.2059	1.7647	2.6471	3.3089	3.3089	4.4118	4.4118	6.6177	15.441	15.441	35.294	15.441	24.265	15.441	24.265	15.441	24.265	15.441	24.265	15.441	24.265	15.441	39.706	15.441	39.706	15.441	39.706	15.441	50.736			
no	120	120	26	26	11	11	7	7	2	2	7	7	4	4	7	7	4	4	7	4	4	7	4	4	7	4	4	7	4	4		
r%	0.0449	0.0449	0.041	0.041	0.0309	0.0299	0.0299	0.0299	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.04			
Gt	-0.079	-0.079	-0.079	-0.079	-0.079	-0.079	-0.079	-0.079	-0.079	-0.079	-0.079	-0.079	-0.079	-0.079	-0.079	-0.079	-0.079	-0.079	-0.079	-0.079	-0.079	-0.079	-0.079	-0.079	-0.079	-0.079	-0.079	-0.079	-0.079			
L2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1			
B18	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1			
Bk	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1			
log(Wtx/Wt)	3.5704	3.8674	3.3117	2.9771	2.9771	2.5198	2.5198	1.8338	0.2902	-0.572	0.2902	-0.366	0.2902	-0.572	0.2902	-0.572	0.2902	-0.572	0.2902	-0.572	0.2902	-0.572	0.2902	-0.572	0.2902	-0.572	0.2902	-0.572	0.2902			
G = Wt/Wtx	0.0003	0.0001	0.0005	0.0011	0.0011	0.003	0.003	0.0147	0.5126	3.7307	0.5126	2.3215	0.5126	3.7307	0.5126	3.7307	0.5126	3.7307	0.5126	3.7307	0.5126	3.7307	0.5126	3.7307	0.5126	3.7307	0.5126	3.7307	0.5126			
G.Y	31.339	31.339	30.089	30.089	27.118	26.843	26.843	26.870	26.870	26.870	26.870	26.870	26.870	26.870	26.870	26.870	26.870	26.870	26.870	26.870	26.870	26.870	26.870	26.870	26.870	26.870	26.870	26.870	26.870			
ESAL	184.57	93.134	69.661	150.51	57.387	162.81	162.81	790.89	17596	128063	5027.5	22769	17596	128063	5027.5	22769	17596	128063	5027.5	22769	17596	128063	5027.5	22769	17596	128063	5027.5	22769	17596			
PARCIAL																																
TOTAL																																



## Anexo 9: Determinación de la confiabilidad

### DETERMINACION DE LA CONFIABILIDAD Y DESVIACION ESTÁNDAR

ESTACION: C-1

PROYECTO: "CONCRETO CON GEOPOLÍMERO COMO MATERIAL SOSTENIBLE EN THIN WHITETOPPING APLICADO A PAVIMENTO FLEXIBLE TRAMO DE LA CARRETERA

#### 1) CONFIABILIDAD

TIPO DE CARRETERA	NIVELES DE CONFIABILIDAD R	
	Suburbanas	Rurales
Autopista Regional	85 - 99.9	80 - 99.9
Troncales	80 - 99	75 - 95
Colectoras	80 - 95	50 - 80

R = 90 %

#### 2) DESVIACION ESTANDAR NORMAL

DESVIACION ESTANDAR NORMAL , VALORES QUE CORRESPONDEN A LOS NIVELES SELECCIONADOS DE CONFIABILIDAD		
CONFIABILIDAD R (%)	( ZR )	( So )
50	0.000	0.35
60	-0.253	0.35
70	-0.524	0.34
75	-0.647	0.34
80	-0.841	0.32
85	-1.037	0.32
90	-1.282	0.31
91	-1.340	0.31
92	-1.405	0.30
93	-1.476	0.30
94	-1.555	0.30
95	-1.645	0.30
96	-1.751	0.29
97	-1.881	0.29
98	-2.054	0.29
99	-2.327	0.29
99.9	-3.090	0.29
99.99	-3.750	0.29

ZR = -1.282

#### 3) ERROR ESTANDAR COMBINADO So

TIPO	( So )
Pavimentos Rígidos	0.30 - 0.40
Construcción Nueva	0.35
En Sobre Capas	0.40

So = 0.32

## Anexo 10: Determinación de módulo de la subrasante

### DETERMINACION DEL MODULO DE REACCION EFECTIVO DE LA SUBRAZANTE

ESTACION: C-1

PROYECTO: "CONCRETO CON GEOPOLÍMERO COMO MATERIAL SOSTENIBLE EN THIN WHITETOPPING APLICADO A PAVIMENTO FLEXIBLE TRAMO DE LA CARRETERA AREQUIPA - YURA"

#### 1) METODO EMPIRICO O MECANISTICO

DATOS DE LA SUBBASE : CBR = 20.00 %

Ecuación Guia Mecanica Empirica NCHRP (2002)

$$MR = 2555 (CBR)^{0.64}$$

$$MR = 17380.013 \quad \text{psi} = 119.92 \quad \text{Mpa}$$

Ecuación de Kentucky

(regresión exponencial)

$$MR = 1910 (CBR)^{0.68}$$

$$MR = 14646.497 \quad \text{psi} = 101.06 \quad \text{Mpa}$$

(regresión polinómica 2°)

Solo para CBR < 55 %

$$MR = -7.5 CBR^2 + 800 CBR + 1820$$

$$MR = 15220 \quad \text{psi} = 105.02 \quad \text{Mpa}$$

**Mínimo: ME = 101.06 Mpa**

DATOS DEL SUELO DE FUNDACION: CBR = 5.00 %

Ecuación Guia Mecanica Empirica NCHRP (2002)

$$MR = 2555 (CBR)^{0.64}$$

$$MR = 7157.0114 \quad \text{psi} = 49.38 \quad \text{Mpa}$$

Ecuación de After Van Til et al

(regresión exponencial)

$$MR = 5490 (CBR)^{0.30}$$

$$MR = 8897.4047 \quad \text{psi} = 61.39 \quad \text{Mpa}$$

**Mínimo: MR = 49.38 Mpa**

#### En el monograma

1. Estimamos el espesor de la sub base como dato preliminar
2. Obtenemos el módulo resiliente y módulo de lasticidad del suelo de fundación y de la sub base respectivamente
3. Proyectamos con las flechas y obtenemos el módulo de reacción compuesto

## Anexo 11: Determinación de la serviciabilidad

### DETERMINACION DE LA PERDIDA DE SERVICIABILIDAD

ESTACION: C-1

PROYECTO: "CONCRETO CON GEOPOLÍMERO COMO MATERIAL SOSTENIBLE EN THIN WHITETOPPING  
APLICADO A PAVIMENTO FLEXIBLE TRAMO DE LA CARRETERA AREQUIPA - YURA"

#### 1) PERDIDA DE SERVICIABILIDAD

Pt = 2 serviciabilidad final

INDICE DE SERVICIABILIDAD INICIAL	INDICE DE SERVICIABILIDAD FINAL
Po = 4.5 para pavimentos rígidos	Pt = 2.5 o más para caminos muy importantes
Po = 4.2 para pavimentos flexibles	Pt = 2.0 para caminos de tránsito menor

$\Delta PSI = Po - Pt = 2.5$

#### 2) DRENAJE

CALIDAD DEL DRENAJE	TIEMPO QUE TARDA EL AGUA EN SER EVACUADA
Exelente	2 horas
Bueno	1 día
Mediano	1 semana
Malo	1 mes
Muy malo	el agua no evacua

Calidad del drenaje	Porcentaje del tiempo en que la estructura del pavimento esta expuesta a niveles de humedad proximos a la saturación			
	Menos de 1%	1 % - 5 %	5 % - 25 %	más del 25%
Exelente	1.25 - 1.20	1.20 - 1.15	1.15 - 1.10	1.10
Bueno	1.20 - 1.15	1.15 - 1.10	1.10 - 1.00	1.00
Mediano	1.15 - 1.10	1.10 - 1.00	1.00 - 0.90	0.90
Malo	1.10 - 1.00	1.00 - 0.90	0.90 - 0.80	0.80
Muy malo	1.00 - 0.90	0.90 - 0.80	0.80 - 0.70	0.70

Cd = 1.00

#### 3) COEFICIENTE DE TRANSMISION DE CARGA

Valores de coeficiente de transmisión de carga

Tipo de Pavimento	Hombro			
	Elemento de transmisión de carga			
	Con. Asfáltico		Con. Hidráulico	
	SI	NO	SI	NO
No reforzado o reforzado con juntas	3.2	3.8 - 4.4	2.5 - 3.1	3.6 - 4.2
Reforzado continuo	2.9 - 3.2	----	2.3 - 2.9	----

J = 2.70

#### 4) MODULO DE ELASTICIDAD DEL CONCRETO

Concreto  $f_c = 300.00$  kg/cm<sup>2</sup>  
 $E_c = 57000 (f_c)^{0.5}$   
 $E_c = 3723340$  psi = 25691.0 Mpa

#### 5) MODULO DE ROTURA DEL CONCRETO

Concreto  $f_c = 300.00$  kg/cm<sup>2</sup>  
 $S'_c = 8 - 10 (f_c)^{0.5}$   
 $S'_c = 653.2$  psi = 4.51 Mpa



## Anexo 12: Desarrollo de la fórmula general AASTHO

### DETERMINACION DEL ESPESOR DE PAVIMENTO POR LA FORMULA AASTHO

ESTACION: C-1

PROYECTO: "CONCRETO CON GEOPOLÍMERO COMO MATERIAL SOSTENIBLE EN THIN WHITETOPPING APLICADO A PAVIMENTO FLEXIBLE  
TRAMO DE LA CARRETERA AREQUIPA - YURA"

Para el método de diseño AASTHO la fórmula de diseño es:

$$\log_{10} W_{82} = Z_r S_o + 7.35 \log_{10} (D + 25.4) - 10.39 + \frac{\log_{10} \left( \frac{\Delta \text{PSI}}{4.5 - 1.5} \right)}{1 + \frac{1.25 \times 10^{19}}{(D + 25.4)^{8.46}}} + (4.22 - 0.32 P_i) \times \log_{10} \left( \frac{M_i C_{dr} (0.09 D^{0.75} - 1.132)}{1.51 \times J \left( 0.09 D^{0.75} - \frac{7.38}{(E_c/k)^{0.25}} \right)} \right)$$

En donde:

- $W_{82}$  = Numero previsto de ejes equivalentes de 8.2 toneladas métricas<sup>5</sup>, a lo largo del periodo de diseño.
- $Z_r$  = Desviación normal estándar
- $S_o$  = Error estándar combinado en la predicción del tránsito y en la variación del comportamiento esperado del pavimento
- $D$  = Espesor de pavimento de concreto, en milímetros
- $\Delta \text{PSI}$  = Diferencia entre los índices de servicio inicial y final
- $P_i$  = Índice de serviciabilidad o servicio final
- $M_i$  = Resistencia media del concreto (en Mpa) a flexotracción a los 28 días (método de carga en los tercios de la luz)
- $C_{dr}$  = Coeficiente de drenaje
- $J$  = Coeficiente de transmisión de cargas en las juntas
- $E_c$  = Módulo de elasticidad del concreto, en Mpa
- $k$  = Módulo de reacción, dado en Mpa/m de la superficie (base, subbase o subrasante) en la que se apoya el pavimento de concreto

DATOS:

$K =$	46.84	Mpa/m	$S_o =$	0.32	
$E_c =$	25691	Mpa	$R =$	90 % =>	$ZR =$ -1.282
$S'_c = M_r =$	4.51	Mpa	$P_t =$	2	
$J =$	2.70		$\Delta \text{PSI} =$	2.5	
$C_d =$	1.00		$W_{80} =$	$0.42 \times 10^6$	
			$D =$	??? mm	por tanteo
			$D =$	<b>123.82</b> mm	

RESOLVIENDO:

1er miembro	=	Segundo miembro				
5.6249	=	-0.41024	+	5.587560565	+	-0.013009506
<b>5.6249</b>	=	<b>5.625</b>			+	0.460602973

**CORRECTO**

Anexo 13: Reporte de desarrollo del diseño de mezcla de concreto

Sr. JHEAN CARLOS TITO ITO Y JHORDAN LUIS TEJADA VERA

“CONCRETO CON GEOPOLIMERO COMO ALTERNATIVA SOSTENIBLE  
EN THIN WHITETOPPING APLICADO AL PAVIMENTO FLEXIBLE TRAMO  
DE LA CARRETERA AREQUIPA-YURA”



**CONTROL DE CALIDAD**  
**“DISEÑO DE MEZCLA DE CONCRETO”**  
 **$F'_c = 300 \text{ kg/cm}^2$**



**INGECONSA**  
**LAB M&M SRL.**  
Laboratorio de Suelos y  
Pavimentos.

**AREQUIPA-PERU**



**INGECONSA**  
LAB M&M SRL  
Laboratorio de Suelos y  
Pavimentos.

**PROYECTO:**

"CONCRETO CON GEOPOLÍMERO COMO ALTERNATIVA SOSTENIBLE EN THIN WHITETOPPING  
APLICADO AL PAVIMENTO FLEXIBLE TRAMO DE LA CARRETERA AREQUIPA-YURA"

**LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS, CONCRETO Y ASFALTO**

**ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO**

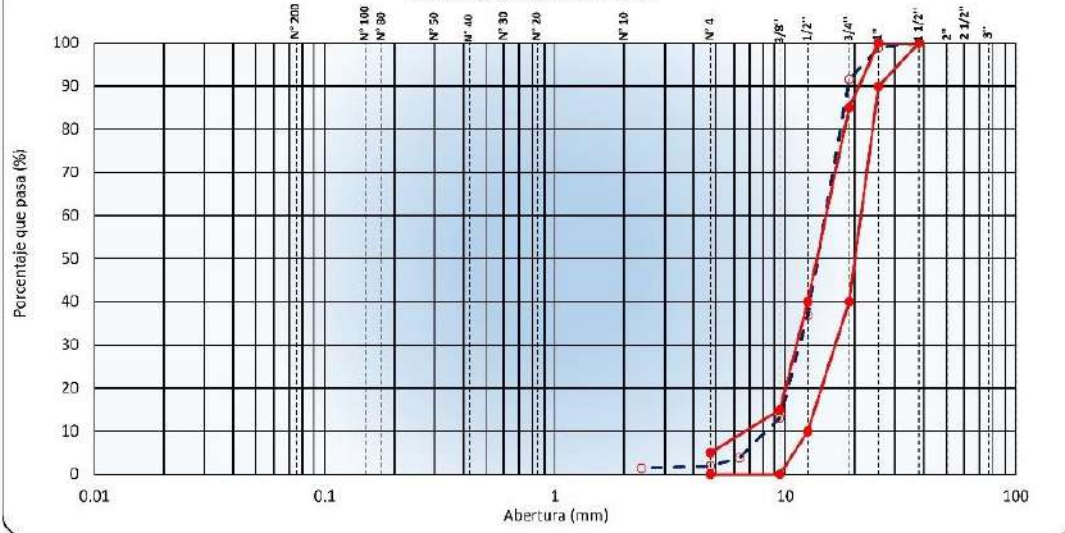
NORMAS TÉCNICAS: MTC E 107, ASTM D 422, AASHTO T 88

**DATOS DE LA MUESTRA**

<b>EJECUTA</b> :		<b>CERTIFICADO</b> :	1
<b>SOLICITA</b> :	SR. JHEAN CARLOS TITO ITO Y JHORDAN LUIS TEJADA VERA		
<b>MATERIAL</b> :	GRAVA 1"		
<b>CANTERA</b> :	LA PODEROSA	<b>RESPONSABLE</b> :	E.M.J.M.M.T.
<b>MUESTRA</b> :	DMC-001	<b>FECHA</b> :	01/05/2024

TAMIZ	ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO	% RETENIDO PARCIAL	% RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA	ESPECIF. ASTM C 33	DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA
5"	127.000					0	<b>Peso de la Muestra</b>
4"	101.600						Peso Total de la Muestra (gr.): 27722.0
3"	76.200						153'2 (gr.):
2 1/2"	60.350						Material Grueso > N°4 (gr.):
2"	50.800						Fracción Material < N°4 (gr.):
1 1/2"	38.100				100.0	<b>100</b>	<b>Limites de Consistencia</b>
1"	25.400	305.0	1.1	1.1	98.9	<b>90-100</b>	Limite Líquido (%):
3/4"	19.000	2019.0	7.3	8.4	91.6	<b>40-85</b>	Limite Plástico (%):
1/2"	12.500	15190.0	54.8	63.2	36.8	<b>10-40</b>	Indice Plástico (%):
3/8"	9.500	6564.0	23.6	86.8	13.2	<b>0-15</b>	<b>OBSERVACIONES</b>
1/4"	6.325	2598.0	9.4	96.2	3.6		T.M. : 34'
N°4	4.750	517.0	1.9	98.1	1.9	<b>0-5</b>	T.M.N. : 34' a 36'
N°6	2.360	139.0	0.5	98.6	1.4		M.F. : 6.861
N°10	2.000						P.E. : 2717.0 kg/m <sup>3</sup>
N°20	0.840						%W : 1.042 Humedad
N°40	0.425						
N°50	0.300						
N°100	0.150						
N°200	0.075						
< N°200	FONDO						

**CURVA GRANULOMÉTRICA**



**OBSERVACIONES.**

Piedra chancada, angulosa.

*[Signature]*  
Edgardo J. M. M. T.  
JEFE DE LABORATORIO

*[Signature]*  
Miguel Alfonso Mendez Tello  
INGENIERO CIVIL - GEOTECNIA  
CIP. 104830

AV. SEPULVEDA 522. MIRAFLORES. AREQUIPA. Telf. 999985612-908847101. E-mail: edgardmendez7@hotmail.com





**INGECONSA**  
LAB M&M SRL  
Laboratorio de Suelos y Pavimentos.

**PROYECTO:**

"CONCRETO CON GEOPOLÍMERO COMO ALTERNATIVA SOSTENIBLE EN THIN WHITETOPPING APLICADO AL PAVIMENTO FLEXIBLE TRAMO DE LA CARRETERA AREQUIPA-YURA"

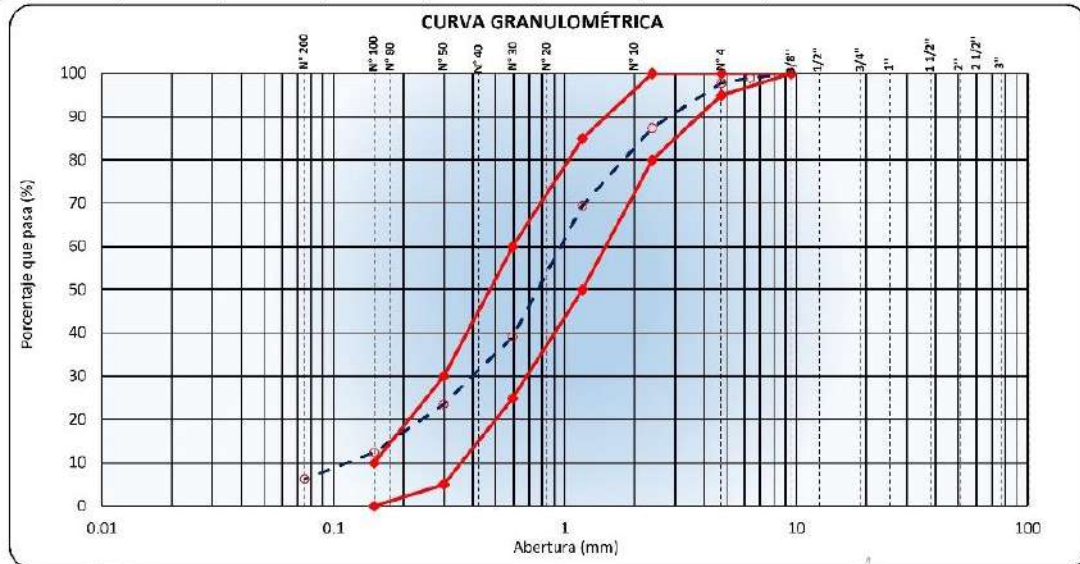
**LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS, CONCRETO Y ASFALTO**

**ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO**  
NORMAS TÉCNICAS: MTC E 107, ASTM D 422, AASHTO T 88

**DATOS DE LA MUESTRA**

<b>EJECUTA</b> :		<b>CERTIFICADO</b> :	2
<b>SOLICITA</b> :	SR. JHEAN CARLOS TITO ITO Y JHORDAN LUIS TEJADA VERA		
<b>MATERIAL</b> :	ARENA		
<b>CANTERA</b> :	LA PODEROSA	<b>RESPONSABLE</b> :	E.M.J.M.M.T.
<b>MUESTRA</b> :	DMC-002	<b>FECHA</b> :	01/05/2024

TAMIZ	ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO	% RETENIDO PARCIAL	% RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA	ESPECIF. NTP 490.337	DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA
<b>Peso de la Muestra</b>							
5"	127.000						Peso Total de la Muestra (gr.): 805.5
4"	101.600						15312 (%)
3"	76.200						Material Grueso > N°4 (%)
2 1/2"	60.350						Fración Material < N°4 (gr.)
2"	50.800						<b>Límites de Consistencia</b>
1 1/2"	38.100						Límite Líquido (%) : NP
1"	25.400						Límite Plástico (%) : NP
3/4"	19.000						Índice Plástico (%) : NP
1/2"	12.500						<b>Dosificación</b>
3/8"	9.500				100.0	100	
1/4"	6.025	8.4	1.0	1.0	99.0		
N°4	4.750	8.8	1.1	2.1	97.9	95-100	
N°6	2.300	84.3	10.5	12.6	87.4	90-100	
N°10	2.000	0.0	0.0	12.6	87.4		
N°15	1.190	144.6	17.9	30.5	69.5	50-85	
N°20	0.840	0.0	0.0	30.5	69.5		WF = 2.701
N°30	0.595	244.5	30.4	60.9	39.1	25-60	P.E. = 2627.0 kg/m3
N°40	0.425	0.0	0.0	60.9	39.1		%W = 4.65
N°50	0.300	124.7	15.5	76.4	23.5	5-30	
N°60	0.250	0.0	0.0	76.4	23.5		
N°75	0.175	0.0	0.0	76.4	23.5		
N°100	0.150	96.6	11.2	87.6	12.4	0-10	
N°200	0.075	49.3	6.1	93.7	6.3		
< N°200	FONDO	56.4	6.3	100.0	0.0		



**DESCRIPCIÓN**

Areña zarandeada, color gris.

Mirco Angélica Mendoza Torres  
INGENIERO CIVIL - GEOTÉCNICA  
(C.B. 10488)

AV. SEPULVEDA 522. MIRAFLORES. AREQUIPA. Telf: 999985612-908847101. E-mail: edgardmendez7@hotmail.com



**INGECONSA**  
LAB M&M SRL  
Laboratorio de Suelos y Pavimentos.

**PROYECTO:**

"CONCRETO CON GEOPOLÍMERO COMO ALTERNATIVA SOSTENIBLE EN THIN WHITETOPPING APLICADO AL PAVIMENTO FLEXIBLE TRAMO DE LA CARRETERA AREQUIPA-YURA"

**LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS, CONCRETO Y ASFALTO**

**PESOS UNITARIOS**  
NORMAS TÉCNICAS: MTC E 203

**DATOS DE LA MUESTRA**

**EJECUTA** :  
**SOLICITA** : SR. JHEAN CARLOS TITO ITO Y JHORDAN LUIS TEJADA VERA  
**MATERIAL** : GRAVA / ARENA  
**CANTERA** : LA PODEROSA  
**MUESTRA** : DMC-001 / DMC-002

**CERTIFICADO** : 4  
**RESPONSABLE** : E.M.J./M.M.T.  
**FECHA** : 01/05/2024

**GRAVA SUELTO**

MUESTRA	1	2	3
PESO MOLDE + MATERIAL	15432.0	15411.0	15415.0
PESO PROMEDIO	15419.3		
VOLUMEN DEL MOLDE	6340.0		
PESO DEL MOLDE	6471.0		
PESO UNITARIO (kg/m <sup>3</sup> )	1411.4		

**GRAVA COMPACTA**

MUESTRA	1	2	3
PESO MOLDE + MATERIAL	16491.0	16526.0	16510.0
PESO PROMEDIO	16509.7		
VOLUMEN DEL MOLDE	6340.0		
PESO DEL MOLDE	6471.0		
PESO UNITARIO (kg/m <sup>3</sup> )	1593.4		

**ARENA SUELTA**

MUESTRA	1	2	3
PESO MOLDE + MATERIAL	8346.0	8317.0	8336.0
PESO PROMEDIO	8333.7		
VOLUMEN DEL MOLDE	2110.0		
PESO DEL MOLDE	6123.0		
PESO UNITARIO (kg/m <sup>3</sup> )	1521.6		

**ARENA COMPACTA**

MUESTRA	1	2	3
PESO MOLDE + MATERIAL	9723.0	9747.0	9749.0
PESO PROMEDIO	9739.7		
VOLUMEN DEL MOLDE	2110.0		
PESO DEL MOLDE	6123.0		
PESO UNITARIO (kg/m <sup>3</sup> )	1714.1		

**OBSERVACIONES**

LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS  
Ing. Edgardo Mendez  
JEFE LABORATORIO

LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS  
INGENIERO CIVIL - CONCRETO  
C.R. 104830



**GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DE AGREGADOS**  
**ASTM C-127/ASTM C-128**

SOLICITA: Sr. JHEAN CARLOS TITO ITO Y JHORDAN TEJADA VERA	EJECUTA:
---	----------

OBRA: CONCRETO CON GEOLPOLIMERO COMO ALTERNATIVA EN THIN WHITETOPPING APLICADO AL PAVIMENTO..... Certificado N° 3  
FLEXIBLE, TRAMO DE LA CARRETERA AREQUIPA-YURA.....

TRAMO:.....	N° MUESTRA: DMC-001 / DMC-002.....
CAPA/CANTERA:.....	PROFUNDIDAD:..... MATERIAL: Grava / Arena.....
LABORATORISTA: E.M.J./M.A.M.T.....	FECHA: 01/05/24..... OBS.:.....

**N° MUESTRA.- DMC-001**

MUESTRA		GRAVA
A	Peso Mat. Sat. Sup. Seca (En Aire) (gr.)	1301.6
B	Peso Frasco + H2O (gr)	1871.9
C	Peso Frasco + H2O (gr) + A	3173.5
D	Peso del Material + H2O en el frasco (gr)	2697.7
E	Volumen de Masa +Volumen de Vacío = C-D (gr)	475.8
F	Peso de material Seco en estufa (105°C) (gr)	1292.8
G	Volumen de Masa = E-(A-F) (gr)	467.0
Peso Seco Material Bulk (Base seca) = F/E		2.717
Peso Seco Material Bulk (Base saturada) = A/E		2.736
Peso Seco Material Bulk Aparente (Base seca) = F/G		2.768
% de Absorción = ((A-F)/F) x 100		0.681%

**N° MUESTRA.- DMC-002**

MUESTRA		ARENA
A	Peso Mat. Sat. Sup. Seca (En Aire) (gr.)	300.8
B	Peso Frasco + H2O (gr)	656.4
C	Peso Frasco + H2O (gr) + A	957.2
D	Peso del Material + H2O en el frasco (gr)	845.0
E	Volumen de Masa +Volumen de Vacío = C-D (gr)	112.2
F	Peso de material Seco en estufa (105°C) (gr)	294.8
G	Volumen de Masa = E-(A-F) (gr)	106.2
Peso Seco Material Bulk (Base seca) = F/E		2.627
Peso Seco Material Bulk (Base saturada) = A/E		2.681
Peso Seco Material Bulk Aparente (Base seca) = F/G		2.776
% de Absorción = ((A-F)/F) x 100		2.035%

PESO ESPECIFICO DE LA MEZCLA DEL AGREGADO	
---	--

LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS  
Ing. E. M. J. / M. A. M. T.  
JEFE DE LABORATORIO

MAESTRO ASESOR RESPONSABLE TÉCNICO  
INGENIERO CIVIL - GEOTÉCNICA  
C.R. 204830

PROYECTO:

'CONCRETO CON GEOPOLÍMERO COMO ALTERNATIVA SOSTENIBLE EN THIN WHITETOPPING APLICADO AL PAVIMENTO FLEXIBLE TRAMO DE LA CARRETERA AREQUIPA-YURA'

**LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS, CONCRETOS Y ASFALTOS**

DISEÑO DE MEZCLA DE CONCRETO  $F'c =$  300

Tipo de Cemento = Yura Portland Tipo I

**METODO ACI**

		GRAVA	ARENA	CEMENTO	AGUA	OTROS
Peso Especifico (kg/m <sup>3</sup> )		2717.0	2627.0	3140.0	1.0000	
Peso Unitario Suelto (kg/m <sup>3</sup> )		1411.4	1521.6	1580.0		
Peso Unitario Compacto (kg/m <sup>3</sup> )		1583.4	1714.1			
Contenido de Humedad (%)		1.042	4.650			
Absorción (%)		0.681	2.035			
Modulo de Fineza		6.961	2.701			
Modulo de Fineza Combinado		4.715				

**1. % DE AGREGADOS EN LA MEZCLA DE DISEÑO**

- Metodo de ROTHFUCHS % A. Fino = 53.0 ; % A. Grueso = 47.0
- Modulos de Fineza % A. Fino = 53.0 ; % A. Grueso = 47.0
- Metodo del ACI

**2. ESPECIFICACIONES DE OBRA**

- Diseño de Mezcla de Concreto  $F'c =$  300
- Cemento = Yura Portland Tipo I
- Tamaño Maximo Nominal = 3/4" a 3/8" ; Tamaño Maximo = 3/4"
- Asentamiento Slumb = 3' - 4"
- Relacion Agua/Cemento = 0.45

**3. VALORES DE DISEÑO**

**VOLUMENES ABSOLUTOS**

- Agua de Mezclado	=	205.0 lit/m <sup>3</sup>		0.205 m <sup>3</sup>	1.000 m <sup>3</sup>
- Aire Atrapado	=	2.0 %		0.020 m <sup>3</sup>	0.370 m <sup>3</sup>
- Contenido de Cemento	=	455.6 kg.		0.145 m <sup>3</sup>	0.630 m <sup>3</sup>
				0.370 m <sup>3</sup>	
		Grava = 47.0 % ;	=	0.2961 m <sup>3</sup>	= 804.4 kg.
		Arena = 53.0 % ;	=	0.3339 m <sup>3</sup>	= 877.0 kg.
				0.6299 m <sup>3</sup>	

**4. CONTENIDO DE AGREGADOS EN PESO / M<sup>3</sup>**

**CORRECCION POR HUMEDAD Y ABSORCION**

- Cemento	=	455.6 kg/m <sup>3</sup>		455.6 kg/m <sup>3</sup>	→ 10.72 bl/m <sup>3</sup>
- Agua	=	205.0 kg/m <sup>3</sup>		179.2 kg/m <sup>3</sup>	
- Grava	=	804.4 kg/m <sup>3</sup>		812.8 kg/m <sup>3</sup>	
- Arena	=	877.0 kg/m <sup>3</sup>		917.8 kg/m <sup>3</sup>	
- Peso Unitario	=	2342.0 kg/m <sup>3</sup>		2365.4 kg/m <sup>3</sup>	

**CORRECCION POR HUMEDAD Y ABSORCION**

- Grava	=	804.4	x	1.01042	=	812.8 kg/m <sup>3</sup>	→	2.9
- Arena	=	877.0	x	1.04650	=	917.8 kg/m <sup>3</sup>	→	22.9
								25.8

Agua Efectiva = 205.0 - 25.8 = 179.2 lit/m<sup>3</sup>

Ing. Edgard Mendez Jimenez  
JEFE DE LABORATORIO

INGENIERO CIVIL - PROFESIONISTA  
C.P. 104830





PROYECTO:

"CONCRETO CON GEOPOLIMERO COMO ALTERNATIVA SOSTENIBLE EN THIN WHITETOPPING APLICADO AL PAVIMENTO FLEXIBLE TRAMO DE LA CARRETERA AREQUIPA-YURA"

**LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS, CONCRETOS Y ASFALTOS**

DISEÑO DE MEZCLA DE CONCRETO

F'c =

300

Tipo de Cemento

=

Yura Portland Tipo I

**METODO ACI**

		GRAVA	ARENA	CEMENTO	AGUA	OTROS
Peso Especifico (kg/m <sup>3</sup> )		2717.0	2627.0	3140.0	1.0000	
Peso Unitario Suelto (kg/m <sup>3</sup> )		1411.4	1521.6	1580.0		
Peso Unitario Compacto (kg/m <sup>3</sup> )		1583.4	1714.1			
Contenido de Humedad (%)		1.042	4.650			
Absorción (%)		0.681	2.035			
Modulo de Fineza		6.961	2.701			
Modulo de Fineza Combinado		4.715				

**5. DOSIFICACION EN VOLUMEN M<sup>3</sup>/M<sup>3</sup>**

**VOLUMENES APARENTES**

-	Cemento	=	0.2884	0.1451 m <sup>3</sup>	→	10.72 ft <sup>3</sup>
-	Agua	=	0.1792	0.1792 m <sup>3</sup>	→	6.33 ft <sup>3</sup>
-	Grava	=	0.5759	0.2991 m <sup>3</sup>	→	20.12 ft <sup>3</sup>
-	Arena	=	0.6032	0.3494 m <sup>3</sup>	→	20.35 ft <sup>3</sup>
-	Aire Atrapado	=		0.0200 m <sup>3</sup>		
				1.0000 m <sup>3</sup>		

**6. CALCULO DE PROPORCIONES EN PESO Y VOLUMEN PARA USO EN OBRA**

	Cemento	Agua	Piedra	Arena
Peso	1.0	0.39	1.78	2.01
Volumen	1.00 bl.	16.72 lt.	1.88 ft <sup>3</sup>	1.90 ft <sup>3</sup>

**7. PESOS POR TANDA POR UNA BOLSA DE CEMENTO**

-	Cemento	=	42.5 kg/bl	→	1.0 bl.
-	Agua	=	16.7 lt/bl	→	0.9 Tarros de 18 lt.
-	Grava	=	75.8 kg/bl	→	3.0 Tarros de 18 lt.
-	Arena	=	85.6 kg/bl	→	3.0 Tarros de 18 lt.
	Peso Total	=	220.7 kg/bl		

**8. RENDIMIENTO POR TANDA DE UNA BOLSA**

= 0.09329 m<sup>3</sup>  
 = 1/0.09329  
 = **10.72** bl/m<sup>3</sup>

**9. CON GEOPOLIMERO**

Reemplazo del Cemento en porcentaje y peso.

Dosificación: 20% del peso del cemento  
 8.50 kg/bl

25% del peso del cemento  
 10.63 kg/bl

30% del peso del cemento  
 12.75 kg/bl

LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS, CONCRETOS Y ASFALTOS  
 Ing. Edgardo Mendez Tizaco  
 JEFE DEL LABORATORIO

LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS, CONCRETOS Y ASFALTOS  
 Mtro. Edgardo Mendez Tizaco  
 INGENIERO CIVIL - PROFESIONAL  
 CIP. 104830



# Anexo 14: Informe de resultados de laboratorio (ensayo de resistencia a la compresión)

**PROYECTO:**  
 "CONCRETO CON GEOPOLIMERO COMO ALTERNATIVA SOSTENIBLE EN THIN WHITETOPPING APLICADO AL PAVIMENTO FLEXIBLE TRAMO DE LA CARRETERA AREQUIPA-YURA"



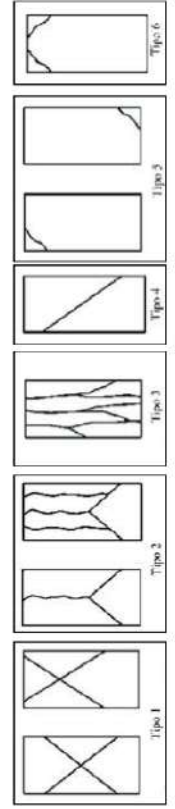
EJECUTA : SR. JEAN CARLOS TITO Y JHORDAN LUIS TEJADA VERA  
 SOLICITA : 24/02/2024  
 CERTIFICADO : 01/05/24  
 FECHA :

## ENSAYOS A COMPRESIÓN DE TESTIGOS DE CONCRETO

NORMAS TÉCNICAS: MTC E 704, ASTM C 39-99, AASHTO T 22

N° DE TESTIGO	RESIST. DE ESPECIF. f <sub>c</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	MUESTRA	ELEMENTO	FECHA DE ENSAYO		EDAD (dias)	SLUMP (Pulg.)	ÁREA TESTIGO (cm <sup>2</sup> )	CARGA SOMETIDA Lac. DIAL (kg)	RESISTENCIA ALCANZADA		TIPO DE FALLA
				MOLDEO (dia)	ROTURA (dia)					RESIST. (kg/cm <sup>2</sup> )	RESIST. PROMEDIO (%)	
1	300	P1A	CONCRETO PATRON	16/05/2024	23/05/2024	7	3" - 4"	176.7	39326	224.3	74.8	2
2	300	P2B	CONCRETO DE 20% DE GEOPOLIMERO	16/05/2024	23/05/2024	7	3" - 4"	174.4	38688	221.7	73.9	3
3	300	P3C	CONCRETO DE 25% DE GEOPOLIMERO	16/05/2024	23/05/2024	7	3" - 4"	174.4	39320	225.5	75.2	2
4	300	P4D	CONCRETO DE 30% DE GEOPOLIMERO	16/05/2024	23/05/2024	7	3" - 4"	176.7	38902	220.2	73.4	2
5	300	P5A	CONCRETO PATRON	16/05/2024	23/05/2024	7	3" - 4"	174.4	39770	222.3	74.1	3
6	300	P6B	CONCRETO DE 20% DE GEOPOLIMERO	16/05/2024	23/05/2024	7	3" - 4"	176.7	39412	223.0	74.3	2
7	300	P7C	CONCRETO DE 25% DE GEOPOLIMERO	16/05/2024	23/05/2024	7	3" - 4"	176.7	39766	225.2	75.1	3
8	300	P8D	CONCRETO DE 30% DE GEOPOLIMERO	16/05/2024	23/05/2024	7	3" - 4"	174.4	38194	220.7	73.6	3

### PATRONES DE FRACTURAS



**OBSERVACIONES:**  
 - Los resultados obtenidos se refieren solamente a las muestras ensayadas según las condiciones como se recibieron.  
 - Los resultados presentados son válidos únicamente para las muestras ensayadas





**INGEDONSA  
LAB M&M SRL.**  
Laboratorio de  
Suelos y Pavimentos.

**PROYECTO:**

"CONCRETO CON GEOPOLÍMERO COMO ALTERNATIVA SOSTENIBLE EN THIN WHITETOPPING APLICADO AL PAVIMENTO FLEXIBLE TRAMO DE LA CARRETERA AREQUIPA-YURA"

EJECUTA :  
SOLICITA : SR. JHÉAN CARLOS TITO Y JORDAN LUIS TELADA VERA  
FECHA : 17/05/2024

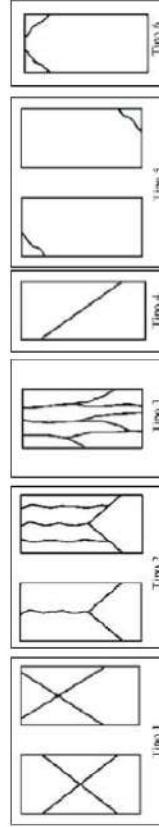
CERTIFICADO : 02/05/24

**ENSAYOS A COMPRESIÓN DE TESTIGOS DE CONCRETO**

NORMAS TÉCNICAS: MTC E 704, ASTM C 39-99, AASHTO T 22

N° DE TESTIGO	RESIST. DE ESPECÍFICO (kg/cm <sup>2</sup> )	MUESTRA	ELEMENTO	FECHA DE ENSAYO		EDAD (días)	SLUMP (Pulg.)	ÁREA DE TESTIGO (cm <sup>2</sup> )	CARGA SOMETIDA (kg)	RESISTENCIA ALCANZADA		TIPO DE FALLA
				MOLDEO (día)	ROTURA (día)					RESIST. (kg/cm <sup>2</sup> )	RESIST. PROMEDIO (%)	
1	300	P9A	CONCRETO PATRON	02/05/2024	16/05/2024	14	3"-4"	174.4	20430	238.2	96.4	3
2	300	P10B	CONCRETO DE 20% DE GEOPOLIMERO	02/05/2024	16/05/2024	14	3"-4"	176.7	49808	232.9	94.3	2
3	300	P11C	CONCRETO DE 25% DE GEOPOLIMERO	02/05/2024	16/05/2024	14	3"-4"	176.7	50741	237.2	95.7	3
4	300	P12D	CONCRETO DE 30% DE GEOPOLIMERO	02/05/2024	16/05/2024	14	3"-4"	174.4	47600	272.9	91.0	3
5	300	P13A	CONCRETO PATRON	02/05/2024	16/05/2024	14	3"-4"	176.7	50947	206.1	95.4	2
6	300	P14B	CONCRETO DE 20% DE GEOPOLIMERO	02/05/2024	16/05/2024	14	3"-4"	174.4	50037	236.0	95.6	3
7	300	P15C	CONCRETO DE 25% DE GEOPOLIMERO	02/05/2024	16/05/2024	14	3"-4"	174.4	49171	231.9	94.0	2
8	300	P16D	CONCRETO DE 30% DE GEOPOLIMERO	02/05/2024	16/05/2024	14	3"-4"	176.7	49742	275.6	91.8	2

**PATRONES DE FRACTURAS**



**OBSERVACIONES:**

- Los resultados obtenidos se refieren solamente a las muestras ensayadas según las condiciones como se recibieron.  
- Los resultados presentados son válidos únicamente para las muestras ensayadas



**INGECUNSA**  
**LAB M&M SRL.**  
Laboratorio de  
Suelos y Pavimentos.

**PROYECTO:**

"CONCRETO CON GEOPOLÍMERO COMO ALTERNATIVA SOSTENIBLE EN THIN WHITETOPPING APLICADO AL PAVIMENTO FLEXIBLE TRAMO DE LA CARRETERA AREQUIPA-YURA"

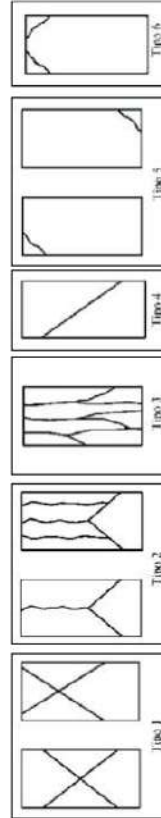
EJECUTA : S/ JHÉAN CARLOS TITO Y JORDAN LUIS TEJADA VERA  
SOLICITA :  
FECHA : 31/05/2024

CERTIFICADO : 0305-24

**ENSAYOS A COMPRESIÓN DE TESTIGOS DE CONCRETO**  
NORMAS TÉCNICAS: MTC E 704, ASTM C 39-99, AASHTO T 22

N° DE TESTIGO	REGIST. DE ESPECIF. f <sub>c</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	MUESTRA	ELEMENTO	FECHA DE ENSAYO		EDAD (días)	SLUMP (Pulg.)	ÁREA DE TESTIGO (cm <sup>2</sup> )	CARGA SOMETIDA		RESISTENCIA ALCANZADA		TIPO DE FALLA
				MOLDEO (día)	ROTURA (día)				Lec. DIAL (kg)	RESIST. (kg/cm <sup>2</sup> )	RESIST. PROMEDIO (%)	RESIST. PROMEDIO (%)	
1	300	P17A	CONCRETO PATROM	02/05/2024	30/05/2024	28	3' -4"	174.4	53454	306.5	102.2	102.2	2
2	300	P18B	CONCRETO DE 20% DE GEOPOLIMERO	02/05/2024	30/05/2024	28	3' -4"	176.7	64881	305.6	103.2	103.2	2
3	300	P19C	CONCRETO DE 25% DE GEOPOLIMERO	02/05/2024	30/05/2024	28	3' -4"	176.7	52158	305.2	101.7	101.7	2
4	300	P20D	CONCRETO DE 30% DE GEOPOLIMERO	02/05/2024	30/05/2024	28	3' -4"	174.4	49866	286.0	95.5	95.5	3
5	300	P21A	CONCRETO PATROM	02/05/2024	30/05/2024	28	3' -4"	176.7	53780	304.4	101.5	101.5	3
6	300	P22B	CONCRETO DE 20% DE GEOPOLIMERO	02/05/2024	30/05/2024	28	3' -4"	174.4	54127	307.4	102.5	102.5	2
7	300	P23C	CONCRETO DE 25% DE GEOPOLIMERO	02/05/2024	30/05/2024	28	3' -4"	174.4	53107	302.0	100.8	100.8	2
8	300	P24D	CONCRETO DE 30% DE GEOPOLIMERO	02/05/2024	30/05/2024	28	3' -4"	176.7	50037	286.0	95.3	95.3	2

**PATRONES DE FRACTURAS**



**OBSERVACIONES:**

- Los resultados obtenidos se refieren solamente a las muestras ensayadas según las condiciones como se recibieron.  
- Los resultados presentados son válidos únicamente para las muestras ensayadas

INGECUNSA LAB M&M SRL  
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS  
Ing. Eddy Rodríguez Almirante  
JEFE DE LABORATORIO

INGECUNSA LAB M&M SRL  
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS  
Ing. Marco Antonio Mendoza Ticona  
INGENIERO CIVIL - GEOTECNIA  
CIP. 304830

# Anexo 15: Informe de resultados de laboratorio (ensayo de resistencia a la flexión)



**INGECUNSA**  
**LAB M&M SRL.**  
Laboratorio de  
Suelos y Pavimentación.

**PROYECTO:**

"CONCRETO CON GEOPOLIMERO COMO ALTERNATIVA SOSTENIBLE EN THIN WHITETOPPING APLICADO AL PAVIMENTO FLEXIBLE TRAMO DE LA CARRETERA AREQUIPA-YURA"

EJECUTA :  
SOLICITA :  
FECHA :

SR. JHJEAN CARLOS TITO Y JHORDAN LUIS TEJADA VERA  
08/06/2024

CERTIFICADO

1

**ENSAYO PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA A LA FLEXION DEL CONCRETO EN VIGAS**  
NORMAS TÉCNICAS: NTP 339.079.2012; MTC E 711

Nº DE TESTIGO	RESIST. DE ESPECIF. (c) (kg/cm²)	MUESTRA	ELEMENTO	FECHA DE ENSAYO MOLDEO (día)	ROTURA (día)	EDAD (días)	ANCHO PROMEDIO (mm.)	ALTURA PROMEDIO (mm.)	LONITUD DE VIGA (mm.)	CARGA MAXIMA (N.)	Mf (Mpa)
1	300	P25A	CONCRETO PATRON	10/05/2024	07/06/2024	28	153.00	156.37	450.0	28037.0	5.06
2	300	P26B	CONCRETO DE 20% DE GEOPOLIMERO	10/05/2024	07/06/2024	28	152.00	152.67	450.0	28154.7	5.14
3	300	P27C	CONCRETO DE 25% DE GEOPOLIMERO	10/05/2024	07/06/2024	28	152.67	155.38	450.0	28086.0	5.36
4	300	P28D	CONCRETO DE 30% DE GEOPOLIMERO	10/05/2024	07/06/2024	28	155.37	156.40	450.0	28154.2	4.87

**OBSERVACIONES:**

- Los resultados obtenidos se refieren solamente a las muestras ensayadas según las condiciones como se recibieron.  
- Los resultados presentados son válidos únicamente para las muestras ensayadas





**INGECONSA**  
**LAB M&M SRL**  
 Laboratorio de  
 Suelos y Pavimentos.

**PROYECTO:**

"CONCRETO CON GEOPOLÍMERO COMO ALTERNATIVA SOSTENIBLE EN THIN WHITETOPPING APLICADO AL PAVIMENTO FLEXIBLE TRAMO DE LA CARRETERA AREQUIPA-YURA"

EJECUTA : SR. JHÉAN CARLOS TITO Y JORDAN LUIS TEJADA VERA  
 SOLICITA :  
 FECHA : 09/06/2024

CERTIFICADO : 2

**ENSAYO PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA A LA FLEXION DEL CONCRETO EN VIGAS**

NORMAS TÉCNICAS: NTP 339.079.2012; MTC E 711

N° DE TESTIGO	RESIST. DE ESPECIF. $f_c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	MUESTRA	ELEMENTO	FECHA DE ENSAYO		EDAD (días)	ANCHO PROMEDIO (mm.)	ALTURA PROMEDIO (mm.)	LONITUD DE VIGA (mm.)	CARGA MAXIMA (N.)	Mr (Mpa)
				MOLDEO (día)	ROTURA (día)						
5	300	P29E	CONCRETO PATRON	10/05/2024	08/06/2024	28	153.00	156.37	450.0	28037.0	5.01
6	300	P30F	CONCRETO DE 20% DE GEOPOLIMERO	10/05/2024	08/06/2024	28	152.00	152.67	450.0	28154.7	5.18
7	300	P31G	CONCRETO DE 25% DE GEOPOLIMERO	10/05/2024	08/06/2024	28	152.87	155.38	450.0	28086.0	5.30
8	300	P32H	CONCRETO DE 30% DE GEOPOLIMERO	10/05/2024	08/06/2024	28	155.37	158.40	450.0	28154.2	4.87

**OBSERVACIONES:**

- Los resultados obtenidos se refieren solamente a las muestras ensayadas según las condiciones como se recibieron.  
 - Los resultados presentados son válidos únicamente para las muestras ensayadas

INGECONSA LAB M&M SRL  
 LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS  
 Ing. Edgar Torres Almirantez  
 JEFE DE LABORATORIO

INGECONSA LAB M&M SRL  
 LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS  
 Ing. Marco Antonio Arriola Ticona  
 INGENIERO CIVIL - GEOTECNIA  
 RFP. 104830







**INBECONSINA**  
**LAB M&M SRL**  
 Laboratorio de  
 Suelos y Pavimentos.

**PROYECTO:**  
 "CONCRETO CON GEOPOLIMERO COMO ALTERNATIVA SOSTENIBLE EN THIN WHITETOPPING APLICADO AL PAVIMENTO  
 FLEXIBLE TRAMO DE LA CARRETERA AREQUIPA-YURA"

ESCUELA: I  
 SOLICITA: I  
 FECHA: I

CERTIFICADO

31/05/2024

**ENSAYOS A TRACCION SIMPLE DE PROBETAS CILINDRICAS**  
 NORMA TECNICA: NTP 339.034 / ASTM C-39

N° DE TESTIGO	RESIST. DE ESPECIF. FC (kg/cm <sup>2</sup> )	MUESTRA	ELEMENTO	FECHA DE ENSAYO		EDAD (días)	SLIP (Pub)	DIMENSIONES			RESISTENCIA ALCANZADA		PROMEDIO (kg/cm <sup>2</sup> )
				MOLDEO (día)	ROTURA (día)			LARGO (cm)	ANCHO (cm)	ALTO (cm)	RESIST. (kg/cm <sup>2</sup> )	RESIST. (MPa)	
1	300	P38A	CONCRETO PATRÓN	15/05/2024	30/05/2024	14	3"-4"	50.0	15.0	15.0	35.0	3.4	34.9
2	300	P38A		15/05/2024	30/05/2024	14	3"-4"	50.2	15.0	14.9	34.7	3.4	
3	300	P40B	CONCRETO CON 20% DE GEOPOLIMERO	15/05/2024	30/05/2024	14	3"-4"	50.0	15.0	15.0	35.5	3.5	35.6
4	300	P41B		15/05/2024	30/05/2024	14	3"-4"	49.9	14.9	15.0	35.7	3.5	
5	300	P42C	CONCRETO CON 25% DE GEOPOLIMERO	15/05/2024	30/05/2024	14	3"-4"	50.0	15.1	15.0	35.1	3.4	35.3
6	300	P43C		15/05/2024	30/05/2024	14	3"-4"	50.0	15.0	15.0	35.5	3.5	
7	300	P44D	CONCRETO CON 30% DE GEOPOLIMERO	15/05/2024	30/05/2024	14	3"-4"	49.8	15.0	14.8	33.6	3.3	33.8
8	300	P44D		15/05/2024	30/05/2024	14	3"-4"	50.0	15.1	15.0	34.1	3.3	

**OBSERVACIONES:**

- Los resultados obtenidos se refieren solamente a las muestras ensayadas según las condiciones como se recibieron.
- Los resultados presentados son válidos únicamente para las muestras ensayadas.

LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS  
**Ing. Edgar Jiménez**  
 JEFE DE LABORATORIO

**Ing. Alfonso Mendosa Ticona**  
 INGENIERO CIVIL - GEOTECNIA  
 CIP: 104830





**PROYECTO:**  
"CONCRETO CON GEOPOLIMERO COMO ALTERNATIVA SOSTENIBLE EN THIN WHITE TOPPING APLICADO AL PAVIMENTO FLEXIBLE TRAMO DE LA CARRETERA AREQUIPA-YURA"

SUBOTA: PEAN CARLOS TITO TITO Y JORJAN LUIS TEJADA VERA  
FECHA: 31/05/2024

CERTIFICADO

**ENSAYOS A TRACCION SIMPLE DE PROBETAS CILINDRICAS**  
NORMA TECNICA: NTP 339.034 / ASTM C39

N° DE TESTIGO	RESIST. DE ESPESOR F <sub>c</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	MUESTRA	ELEMENTO	FECHA DE ENSAYO		EDAD (días)	SLUP (Psi)	DIMENSIONES			RESISTENCIA ALCANZADA		PROMEDIO (kg/cm <sup>2</sup> )
				MOLDEO (dia)	ROTURA (dia)			LARGO (cm)	ANCHO (cm)	ALTO (cm)	RESIST. (kg/cm <sup>2</sup> )	RESIST. (MPa)	
1	300	P46A	CONCRETO PATRÓN	6/05/2024	4/06/2024	28	3"-4"	50.0	15.1	15.0	37.3	3.7	37.2
2	300	P47A		6/05/2024	4/06/2024	28	3"-4"	50.0	14.8	14.9	37.1	3.6	
3	300	P48B	CONCRETO CON 20% DE GEOPOLIMERO	6/05/2024	4/06/2024	28	3"-4"	50.1	15.0	14.8	37.9	3.7	38.1
4	300	P48B		6/05/2024	4/06/2024	28	3"-4"	50.0	14.9	15.0	38.2	3.7	
5	300	P50C	CONCRETO CON 25% DE GEOPOLIMERO	6/05/2024	4/06/2024	28	3"-4"	50.0	15.1	14.9	37.7	3.7	37.9
6	300	P51C		6/05/2024	4/06/2024	28	3"-4"	50.1	15.0	15.0	38.0	3.7	
7	300	P52D	CONCRETO CON 30% DE GEOPOLIMERO	6/05/2024	4/06/2024	28	3"-4"	9.8	14.9	14.8	35.0	3.5	36.2
8	300	P53D		6/05/2024	4/06/2024	28	3"-4"	49.9	15.1	14.9	36.4	3.6	

**OBSERVACIONES:**

- Los resultados obtenidos se refieren solamente a las muestras ensayadas según las condiciones como se recibieron.
- Los resultados presentados son válidos únicamente para las muestras ensayadas



*Marco Antonio*  
Marco Antonio Mendoza Ticona  
INGENIERO CIVIL - GEOTECNIA  
CIP. 308830

## Anexo 17: Análisis de costos de pavimento bituminoso y whitetopping

### Planilla de Sustento de Metrados

**Proyecto** PARAMETROS DE SOSTENIBILIDAD ECONÓMICA  
**Sub Presupuesto** 01 - REASFALTADO PERIODICO CADA 5 AÑOS  
**Cliente** TITO ITO JHEAN CARLOS, TEJADA VERA JHORDAN LUIS  
**Ubicación** AREQUIPA - AREQUIPA - AREQUIPA

Partida **01.01** LIMPIEZA DE TERRENO CON EQUIPO **Total : 7,500.00 M2**

Descripción	N Estr.	N Elem	Area	Largo	Ancho	Alto	Parcial
LIMPIEZA DE TERRENO CON EQUIPO		1		1,000.00	7.50		7,500.00

Partida **01.02** IMPRIMACIÓN ASFALTICA **Total : 7,500.00 M2**

Descripción	N Estr.	N Elem	Area	Largo	Ancho	Alto	Parcial
IMPRIMACION ASFALTICA		1		1,000.00	7.50		7,500.00

Partida **01.03** RECAPEO DE PAVIMENTO DE ESPESOR 3 CM **Total : 225.00 M3**

Descripción	N Estr.	N Elem	Area	Largo	Ancho	Alto	Parcial
RECAPEO DE PAVIMENTO		1		1,000.00	7.50	0.03	225.00

### Planilla de Sustento de Metrados

**Proyecto** PARAMETROS DE SOSTENIBILIDAD ECONÓMICA  
**Sub Presupuesto** 02 - RECUBRIMIENTO BITUMINOSO CADA 11 AÑOS  
**Cliente** TITO ITO JHEAN CARLOS, TEJADA VERA JHORDAN LUIS  
**Ubicación** AREQUIPA - AREQUIPA - AREQUIPA

Partida **02.01** LIMPIEZA DE TERRENO CON EQUIPO **Total : 7,500.00 M2**

Descripción	N Estr.	N Elem	Area	Largo	Ancho	Alto	Parcial
LIMPIEZA DE TERRENO CON EQUIPO		1		1,000.00	7.50		7,500.00

Partida **02.02** CAPA DE NIVELACION CON DBM **Total : 375.00 M3**

Descripción	N Estr.	N Elem	Area	Largo	Ancho	Alto	Parcial
RECAPEO DE PAVIMENTO		1		1,000.00	7.50	0.05	375.00

Partida **02.03** RECAPEO CON HORMIGON BITUMINOSO DE 4 CM **Total : 300.00 M3**

Descripción	N Estr.	N Elem	Area	Largo	Ancho	Alto	Parcial
RECAPEO DE PAVIMENTO		1		1,000.00	7.50	0.04	300.00

## Planilla de Sustento de Metrados

**Proyecto** PARAMETROS DE SOSTENIBILIDAD ECONÓMICA  
**Sub Presupuesto** **03 - THIN WHITETOPPING - CONCRETO CON GEOPOLIMERO 25%**  
**Cliente** TITO ITO JHEAN CARLOS, TEJADA VERA JHORDAN LUIS  
**Ubicación** AREQUIPA - AREQUIPA - AREQUIPA

Partida **03.01** FRESADO DE PAVIMENTO FLEXIBLE C/EQUIPO E=0.05m **Total : 7,500.00 M2**

Descripción	N Estr.	N Elem	Area	Largo	Ancho	Alto	Parcial
FRESADO DEL PAVIMENTO		1		1,000.00	7.50		7,500.00

Partida **03.02** ENCOFRADO Y DESENCOFRADO DE THIN WHITETOPPING **Total : 2,150.00 M**

Descripción	N Estr.	N Elem	Area	Largo	Ancho	Alto	Parcial
ENCOFRADO Y DESENCOFRADO		1		2,150.00			2,150.00

Partida **03.03** LOSA DE CONCRETO FC=300 KG/CM2 **Total : 900.00 M3**

Descripción	N Estr.	N Elem	Area	Largo	Ancho	Alto	Parcial
LOSA DE CONCRETO (TWT)		1		1,000.00	7.50	0.12	900.00

Partida **03.04** CORTE Y SELLADO DE JUNTAS DE CONTRACCIÓN **Total : 2,252.50 M**

Descripción	N Estr.	N Elem	Area	Largo	Ancho	Alto	Parcial
JUNTAS DE CONTRACCIÓN		167		7.50			1,252.50
		1		1,000.00			1,000.00

## Planilla de Sustento de Metrados

**Proyecto** PARAMETROS DE SOSTENIBILIDAD ECONÓMICA  
**Sub Presupuesto** **04 - THIN WHITETOPPING - CONCRETO CON GEOPOLIMERO 25% (REPARACION DE JUNTAS)**  
**Cliente** TITO ITO JHEAN CARLOS, TEJADA VERA JHORDAN LUIS  
**Ubicación** AREQUIPA - AREQUIPA - AREQUIPA

Partida **04.01** CORTE Y SELLADO DE JUNTAS DE CONTRACCIÓN **Total : 2,252.50 M**

Descripción	N Estr.	N Elem	Area	Largo	Ancho	Alto	Parcial
JUNTAS DE CONTRACCIÓN		167		7.50			1,252.50
		1		1,000.00			1,000.00

## Presupuesto

**Proyecto** PARAMETROS DE SOSTENIBILIDAD ECONÓMICA  
**Sub Presupuesto** **01 - REASFALTADO PERIODICO CADA 5 AÑOS**  
**Cliente** TITO ITO JHEAN CARLOS, TEJADA VERA JHORDAN LUIS  
**Ubicación** AREQUIPA - AREQUIPA - AREQUIPA

Costo a : **Junio - 2024**

Item	Descripción	Unidad	Metrado	Precio	Parcial	Subtotal	Total
<b>01</b>	<b>REASFALTADO PERIODICO DE LA SUPERFICIE BITUMINOSA</b>						208,872.00
01.01	LIMPIEZA DE TERRENO CON EQUIPO	M2	7,500.00	3.57	26,775.00		
01.02	IMPRIMACIÓN ASFALTICA	M2	7,500.00	3.18	23,850.00		
01.03	RECAPEO DE PAVIMENTO DE ESPESOR 3 CM	M3	225.00	703.32	158,247.00		
	COSTO DIRECTO						208,872.00
	GASTOS GENERALES				10 %		20,887.20
	<b>PRESUPUESTO TOTAL</b>						<b>229,759.20</b>

**Son : DOSCIENTOS VEINTINUEVE MIL SETECIENTOS CINCUENTA Y NUEVE CON 20/100 SOLES**

## Presupuesto

**Proyecto** PARAMETROS DE SOSTENIBILIDAD ECONÓMICA  
**Sub Presupuesto** **02 - RECUBRIMIENTO BITUMINOSO CADA 11 AÑOS**  
**Cliente** TITO ITO JHEAN CARLOS, TEJADA VERA JHORDAN LUIS  
**Ubicación** AREQUIPA - AREQUIPA - AREQUIPA

Costo a : **Junio - 2024**

Item	Descripción	Unidad	Metrado	Precio	Parcial	Subtotal	Total
<b>02</b>	<b>RECUBRIMIENTO BITUMINOSO DE CARPETA ASFALTICA</b>						388,690.50
02.01	LIMPIEZA DE TERRENO CON EQUIPO	M2	7,500.00	3.57	26,775.00		
02.02	CAPA DE NIVELACION CON DBM	M3	375.00	403.50	151,312.50		
02.03	RECAPEO CON HORMIGON BITUMINOSO DE 4 CM	M3	300.00	702.01	210,603.00		
	COSTO DIRECTO						388,690.50
	GASTOS GENERALES				10 %		38,869.05
	<b>PRESUPUESTO TOTAL</b>						<b>427,559.55</b>

**Son : CUATROCIENTOS VEINTISIETE MIL QUINIENTOS CINCUENTA Y NUEVE CON 55/100 SOLES**

## Presupuesto

**Proyecto** PARAMETROS DE SOSTENIBILIDAD ECONÓMICA  
**Sub Presupuesto** **03 - THIN WHITETOPPING - CONCRETO CON GEOPOLIMERO 25%**  
**Cliente** TITO ITO JHEAN CARLOS, TEJADA VERA JHORDAN LUIS  
**Ubicación** AREQUIPA - AREQUIPA - AREQUIPA **Costo a : Junio - 2024**

Item	Descripción	Unidad	Metrado	Precio	Parcial	Subtotal	Total
<b>03</b>	<b>RECUBRIMIENTO THIN WHITETOPPING 12 CM</b>						499,831.35
03.01	FRESADO DE PAVIMENTO FLEXIBLE C/EQUIPO E=0.05m	M2	7,500.00	3.85	28,875.00		
03.02	ENCOFRADO Y DESENCOFRADO DE THIN WHITETOPPING	M	2,150.00	11.99	25,778.50		
03.03	LOSA DE CONCRETO FC=300 KG/CM2	M3	900.00	438.73	394,857.00		
03.04	CORTE Y SELLADO DE JUNTAS DE CONTRACCIÓN	M	2,252.50	22.34	50,320.85		
	COSTO DIRECTO						499,831.35
	GASTOS GENERALES				10 %		49,983.14
	<b>PRESUPUESTO TOTAL</b>						<b>549,814.49</b>

**Son : QUINIENTOS CUARENTA Y NUEVE MIL OCHOCIENTOS CATORCE CON 49/100 SOLES**

## Presupuesto

**Proyecto** PARAMETROS DE SOSTENIBILIDAD ECONÓMICA  
**Sub Presupuesto** **04 - THIN WHITETOPPING - CONCRETO CON GEOPOLIMERO 25% (REPARACION DE JUNTAS)**  
**Cliente** TITO ITO JHEAN CARLOS, TEJADA VERA JHORDAN LUIS  
**Ubicación** AREQUIPA - AREQUIPA - AREQUIPA **Costo a : Junio - 2024**

Item	Descripción	Unidad	Metrado	Precio	Parcial	Subtotal	Total
<b>04</b>	<b>RECUBRIMIENTO THIN WHITETOPPING 12 CM</b>						39,508.85
04.01	CORTE Y SELLADO DE JUNTAS DE CONTRACCIÓN	M	2,252.50	17.54	39,508.85		
	COSTO DIRECTO						39,508.85
	GASTOS GENERALES				10 %		3,950.89
	<b>PRESUPUESTO TOTAL</b>						<b>43,459.74</b>

**Son : CUARENTA Y TRES MIL CUATROCIENTOS CINCUENTA Y NUEVE CON 74/100 SOLES**



## Análisis de Costos Unitarios

**Proyecto** PARAMETROS DE SOSTENIBILIDAD ECONÓMICA  
**Sub Presupuesto** 01 - REASFALTADO PERIODICO CADA 5 AÑOS  
**Cliente** TITO ITO JHEAN CARLOS, TEJADA VERA JHORDAN LUIS  
**Ubicación** AREQUIPA - AREQUIPA - AREQUIPA

**Costo a : Junio - 2024**

Partida	01.01	LIMPIEZA DE TERRENO CON EQUIPO	Rend:	200.0000 M2/DIA			
Código	Descripción Insumo	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial	
<b>Mano de Obra</b>							
47 00008	OFICIAL	HH	1.000	0.0400	19.94	0.80	
47 00009	PEON	HH	1.000	0.0400	17.94	0.72	
						<b>1.52</b>	
<b>Equipo</b>							
37 00004	HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		3.0000	1.52	0.05	
48 06887	COMPRESORA NEUMATICA 125-175 PCM, 76 HP	hm	1.000	0.0400	50.00	2.00	
						<b>2.05</b>	
<b>Costo Unitario por M2 :</b>						<b>3.57</b>	

Partida	01.02	IMPRIMACIÓN ASFALTICA	Rend:	5,700.0000 M2/DIA			
Código	Descripción Insumo	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial	
<b>Mano de Obra</b>							
47 00008	OFICIAL	HH	1.000	0.0014	19.94	0.03	
47 00009	PEON	HH	4.000	0.0056	17.94	0.10	
						<b>0.13</b>	
<b>Materiales</b>							
13 00666	ASFALTO RC-250	GLN		0.1250	15.00	1.88	
53 00098	KEROSENE INDUSTRIAL	GLN		0.0450	15.00	0.68	
						<b>2.56</b>	
<b>Equipo</b>							
37 00004	HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		3.0000	0.13	-	
49 03184	CAMION IMPRIMADOR DE 1800 GLS.	HM	1.000	0.0014	350.00	0.49	
						<b>0.49</b>	
<b>Costo Unitario por M2 :</b>						<b>3.18</b>	

Partida	01.03	RECAPEO DE PAVIMENTO DE ESPESOR 3 CM	Rend:	2,400.0000 M3/DIA			
Código	Descripción Insumo	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial	
<b>Mano de Obra</b>							
47 00007	OPERARIO	HH	2.000	0.0067	27.10	0.18	
47 00008	OFICIAL	HH	1.000	0.0033	19.94	0.07	
47 00009	PEON	HH	4.000	0.0133	17.94	0.24	
						<b>0.49</b>	
<b>Materiales</b>							
29 07025	MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE	M3		1.0000	700.00	700.00	
						<b>700.00</b>	
<b>Equipo</b>							
37 00004	HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		5.0000	0.49	0.02	
49 03184	CAMION IMPRIMADOR DE 1800 GLS.	HM	1.000	0.0033	350.00	1.16	
49 00349	RODILLO LISO VIBR AUTOP 70-100 HP 7-9 T.	HM	1.000	0.0033	500.00	1.65	
						<b>2.83</b>	
<b>Costo Unitario por M3 :</b>						<b>703.32</b>	

## Análisis de Costos Unitarios

**Proyecto** PARAMETROS DE SOSTENIBILIDAD ECONÓMICA  
**Sub Presupuesto** 02 - RECUBRIMIENTO BITUMINOSO CADA 11 AÑOS  
**Cliente** TITO ITO JHEAN CARLOS, TEJADA VERA JHORDAN LUIS  
**Ubicación** AREQUIPA - AREQUIPA - AREQUIPA

**Costo a : Junio - 2024**

Partida	02.01	LIMPIEZA DE TERRENO CON EQUIPO	Rend:				200.0000 M2/DIA
Código	Descripción Insumo	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial	
<b>Mano de Obra</b>							
47 00008	OFICIAL	HH	1.000	0.0400	19.94	0.80	
47 00009	PEON	HH	1.000	0.0400	17.94	0.72	
						<b>1.52</b>	
<b>Equipo</b>							
37 00004	HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		3.0000	1.52	0.05	
48 06887	COMPRESORA NEUMATICA 125-175 PCM, 76 HP	hm	1.000	0.0400	50.00	2.00	
						<b>2.05</b>	
<b>Costo Unitario por M2 :</b>						<b>3.57</b>	

Partida	02.02	CAPA DE NIVELACION CON DBM	Rend:				2.400.0000 M3/DIA
Código	Descripción Insumo	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial	
<b>Mano de Obra</b>							
47 00007	OPERARIO	HH	1.000	0.0033	27.10	0.09	
47 00008	OFICIAL	HH	1.000	0.0033	19.94	0.07	
47 00009	PEON	HH	3.000	0.0100	17.94	0.18	
						<b>0.34</b>	
<b>Materiales</b>							
29 07027	MEZCLA DE DBM	M3		1.0000	400.00	400.00	
						<b>400.00</b>	
<b>Equipo</b>							
37 00004	HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		5.0000	0.34	0.02	
49 04187	EXTENDEDORA DE DBM	HM	1.000	0.0033	450.00	1.49	
49 00349	RODILLO LISO VIBR AUTOP 70-100 HP 7-9 T.	HM	1.000	0.0033	500.00	1.65	
						<b>3.16</b>	
<b>Costo Unitario por M3 :</b>						<b>403.50</b>	

Partida	02.03	RECAPEO CON HORMIGON BITUMINOSO DE 4 CM	Rend:				2.400.0000 M3/DIA
Código	Descripción Insumo	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial	
<b>Mano de Obra</b>							
47 00007	OPERARIO	HH	1.000	0.0033	27.10	0.09	
47 00008	OFICIAL	HH	1.000	0.0033	19.94	0.07	
47 00009	PEON	HH	3.000	0.0100	17.94	0.18	
						<b>0.34</b>	
<b>Materiales</b>							
29 07025	MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE	M3		1.0000	700.00	700.00	
						<b>700.00</b>	
<b>Equipo</b>							
37 00004	HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		5.0000	0.34	0.02	
49 00349	RODILLO LISO VIBR AUTOP 70-100 HP 7-9 T.	HM	1.000	0.0033	500.00	1.65	
						<b>1.67</b>	
<b>Costo Unitario por M3 :</b>						<b>702.01</b>	

## Análisis de Costos Unitarios

**Proyecto** PARAMETROS DE SOSTENIBILIDAD ECONÓMICA  
**Sub Presupuesto** 03 - THIN WHITETOPPING - CONCRETO CON GEOPOLIMERO 25%  
**Cliente** TITO ITO JHEAN CARLOS, TEJADA VERA JHORDAN LUIS  
**Ubicación** AREQUIPA - AREQUIPA - AREQUIPA

**Costo a : Junio - 2024**

Partida	03.01	FRESADO DE PAVIMENTO FLEXIBLE C/EQUIPO E=0.05m	Rend:	4,000.0000	M2/DIA	
Código	Descripción Insumo	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial
<b>Mano de Obra</b>						
47 00007	OPERARIO	HH	1.000	0.0020	27.50	0.06
47 00009	PEON	HH	2.000	0.0040	20.00	0.08
						<b>0.14</b>
<b>Equipo</b>						
29 07029	ESCOBA MECANICA	HM	1.000	0.0020	350.00	0.70
29 07028	FRESADORA DE ASFALTO	HM	1.000	0.0020	1,500.00	3.00
37 00004	HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		5.0000	0.14	0.01
						<b>3.71</b>
<b>Costo Unitario por M2 :</b>						<b>3.85</b>

Partida	03.02	ENCOFRADO Y DESENCOFRADO DE THIN WHITETOPPING	Rend:	90.0000	M/DIA	
Código	Descripción Insumo	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial
<b>Mano de Obra</b>						
47 00007	OPERARIO	HH	1.000	0.0889	27.50	2.44
47 00008	OFICIAL	HH	1.000	0.0889	21.30	1.89
47 00009	PEON	HH	1.000	0.0889	20.00	1.78
						<b>6.11</b>
<b>Materiales</b>						
02 00093	ALAMBRE NEGRO N°16	KG		0.1600	5.94	0.95
02 00018	ALAMBRE NEGRO N°8	KG		0.0050	5.94	0.03
03 06859	ACERO CORRUGADO fy = 4200 kg/cm2 GRADO 60	kg		0.2500	4.58	1.15
29 06880	CLAVOS PARA MADERA CON CABEZA	kg		0.0150	5.94	0.09
45 06881	MADERA PARA ENCOFRADO Y CARPINTERIA	p2		0.5400	6.78	3.66
						<b>5.88</b>
<b>Costo Unitario por M :</b>						<b>11.99</b>

Partida	03.03	LOSA DE CONCRETO FC=300 KG/CM2	Rend:	12.0000	M3/DIA	
Código	Descripción Insumo	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial
<b>Mano de Obra</b>						
47 00006	CAPATAZ	HH	0.100	0.0667	21.95	1.46
47 00007	OPERARIO	HH	1.000	0.6667	27.50	18.33
47 00008	OFICIAL	HH	1.000	0.6667	21.30	14.20
47 00009	PEON	HH	3.000	2.0000	20.00	40.00
						<b>73.99</b>
<b>Materiales</b>						
05 00002	AGUA	M3		0.1840	5.00	0.92
21 07030	CEMENTO PORTLAND CON GEOPOLIMERO AL 25%	BOL		9.7400	15.50	150.97
38 00115	HORMIGON (PUESTO EN OBRA)	M3		1.0000	200.00	200.00
						<b>351.89</b>
<b>Equipo</b>						
37 00004	HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		3.0000	73.99	2.22
48 02026	MEZCLADORA DE CONCRETO T.TAMBOR 18 HP 11 P3	HM	1.000	0.6667	12.50	8.33
49 00122	VIBRADOR DE CONCRETO 4 HP 2.40"	HM	0.500	0.3333	6.90	2.30
						<b>12.85</b>
<b>Costo Unitario por M3 :</b>						<b>438.73</b>

## Análisis de Costos Unitarios


**Proyecto** PARAMETROS DE SOSTENIBILIDAD ECONÓMICA  
**Sub Presupuesto** 04 - THIN WHITETOPPING - CONCRETO CON GEOPOLIMERO 25% (REPARACION DE JUNTAS)  
**Cliente** TITO ITO JHEAN CARLOS, TEJADA VERA JHORDAN LUIS  
**Ubicación** AREQUIPA - AREQUIPA - AREQUIPA

**Costo a : Junio - 2024**

Partida	04.01	CORTE Y SELLADO DE JUNTAS DE CONTRACCIÓN	Rend:	80.0000	M/DIA	
Código	Descripción Insumo	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial
<b>Mano de Obra</b>						
47 00007	OPERARIO	HH	1.000	0.1000	27.10	2.71
47 00008	OFICIAL	HH	1.000	0.1000	19.94	1.99
47 00009	PEON	HH	2.000	0.2000	17.94	3.59
						<b>8.29</b>
<b>Materiales</b>						
29 07032	CORDON DE RESPALDO PARA SELLANTE	M		1.0000	3.50	3.50
29 07031	SELLANTE ELASTOMERICO	gal		0.0350	150.00	5.25
						<b>8.75</b>
<b>Equipo</b>						
29 07033	PISTOLA APLICADOR SELLANTE	HM	1.000	0.1000	2.50	0.25
37 00004	HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		3.0000	8.29	0.25
						<b>0.50</b>
<b>Costo Unitario por M :</b>						<b>17.54</b>



## Anexo 18: Cotización de materiales

 <b>ARECCO</b> 20607710563		<b>COTIZACIÓN #75</b>	
CAL VOLGA NRO. 204 COO. 58 AREQUIPA - AREQUIPA - JOSE LUIS BUSTAMANTE Y RIVERO		FECHA: 04/06/2024 CLIENTE: TITO JHEAN TEJADA JIORDAN	

Descripción	Unidad	Precio
<b>MATERIALES</b>		
ALAMBRE NEGRO N°16	KG	5.94
ALAMBRE NEGRO N°8	KG	5.94
ACERO CORRUGADO fy = 4200 kg/cm2 GRADO 60	kg	4.58
AGUA	M3	5.00
ASFALTO RC-250	GLN	15.00
CEMENTO PORTLAND CON GEOPOLIMERO AL 25%	BOL	30.00
CLAVOS PARA MADERA CON CABEZA	kg	5.94
CORDON DE RESPALDO PARA SELLANTE	M	3.50
MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE	M3	700.00
MEZCLA DE DBM	M3	400.00
SELLANTE ELASTOMERICO	gal	150.00
HORMIGON (PUESTO EN OBRA)	M3	200.00
MADERA PARA ENCOFRADO Y CARPINTERIA	p2	6.78
KEROSENE INDUSTRIAL	GLN	15.00
<b>EQUIPO</b>		
ESCOBA MECANICA	HM	350.00
FRESADORA DE ASFALTO	HM	1,500.00
PISTOLA APLICADOR SELLANTE	HM	2.50
HERRAMIENTAS MANUALES	%MO	
COMPRESORA NEUMATICA 125-175 PCM, 76 HP	hm	60.00
MEZCLADORA DE CONCRETO T.TAMBOR 18 HP 11 P3	HM	11.00
CAMION IMPRIMADOR DE 1800 GLS.	HM	350.00
EXTENDEDORA DE DBM	HM	450.00
RODILLO LISO VIBR AUTOP 70-100 HP 7-9 T.	HM	500.00
VIBRADOR DE CONCRETO 4 HP 2.40"	HM	6.90

**Cotización válida por 30 días\***

  
**ARECCO S.A.C.**  
 -----  
**Nicolas Ivan Lozano Nunez**  
 REPRESENTANTE LEGAL

## Anexo 19: Ficha técnica de Ceniza volante



### REPORTE DE LABORATORIO

SOLICITA CONCRETOS SUPERMIX  
 OBRA CONTROL DE CALIDAD  
 EXPEDIENTE 986-16

#### REQUERIMIENTOS QUIMICOS

NOMBRE DE LA MUESTRA	FECHA	FLUORECENCIA DE RAYOS X													
		SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO <sub>3</sub> (%)	Na <sub>2</sub> O (%)	K <sub>2</sub> O (%)	Cl	TiO <sub>2</sub> (%)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	MnO (%)	SrO (%)	CO <sub>2</sub> (%)
CENIZA ILO	7/07/2015	51.6	20.5	6.69	3.44	1.58	0.847	2.4	2.01	0.858	0.919	0.145	0.0402	0.0825	8.55
CENIZA TRUPAL	7/07/2015	43.4	25.4	2.16	0.843	0.609	2.5	0.488	1.58	0.0407	1.33	0.281	0.0417	0.0513	21.02

#### REQUERIMIENTOS FISICOS

DESCRIPCION	MEZCLA DE CONTROL					MEZCLA DE ENSAYO				
	RELACION A/C	PESO ESPECIFICO (g/cm <sup>3</sup> )	RETENIDO MALLA N° 325 (%)	RESISTENCIA A 28 DIAS (kg/cm <sup>2</sup> )	DENSIDAD PUZOLANA O ESCORIA (g/cm <sup>3</sup> )	RETENIDO MALLA N°325 (%)	RELACION A/C	RESISTENCIA A 28 DIAS (kg/cm <sup>2</sup> )	INDICE DE ACTIVIDAD (28 días)	
CENIZA ILO	0.54	3.13	4.5	420.70	2.29	7.10	0.560	402.40	95.65	
CENIZA TRUPAL	0.54	3.13	4.5	420.70	2.19	16.00	0.630	367.60	87.38	

  
 ING. CARLOS GUERRA CISNEROS  
 JEFE DE CONTROL DE CALIDAD  
 CIP: 55171

Av. General Diez Canseco N° 527 – Arequipa  
 www.supermix.com.pe

Teléf.: (054) 22 5000 Anexo: 3637  
 contactenos@supermix.com.pe

# Anexo 20: Diseño geométrico de la capa Whitetopping

