

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO CLIMÁTICO PARA EL DISEÑO DE
PAVIMENTOS RÍGIDOS CON LA METODOLOGÍA MECANÍSTICA EMPÍRICA
AASHTO 2015 EN CERRO DE PASCO**

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniera Civil

AUTORAS:

Anali Herminia Atencio Condezo

Rocio Edith Soto Huaman

ASESOR:

Juan Pablo Zamora Beyk


Lima, Abril, 2026

Informe de Similitud

Yo, Juan Pablo Zamora Beyk, docente de la Facultad de Ciencias e Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor de la tesis titulada IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO CLIMÁTICO PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS CON LA METODOLOGÍA MECANÍSTICA EMPÍRICA AASHTO 2015 EN CERRO DE PASCO, de las autoras Anali Herminia Atencio Condezo y Rocio Edith Soto Huaman, dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 13%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 8/4/2026.
- He revisado con detalle dicho reporte y la tesis, y no se advierten indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha: Lima, 8 de abril de 2026.

Apellidos y nombres del asesor: Zamora Beyk, Juan Pablo	
DNI: 42867511	Firma 
ORCID: 0000-0002-0849-6958	

DEDICATORIA

Dedico esta tesis, con un profundo amor y gratitud a mi mamá, por su confianza, su apoyo constante y por ser mi mayor fortaleza en cada etapa de mi vida. A mi papá y a mis hermanos, por estar siempre a mi lado, por su comprensión y por acompañarme en cada decisión tomada a lo largo de este camino. Y, de manera muy especial, a mis padrinos, José y María Elena, por su amor sincero, su guía y apoyo incondicional. Aunque hoy ya no están físicamente conmigo, sé que desde el cielo continúan cuidándome y compartiendo conmigo la alegría de este logro. Asimismo, agradezco a Dios por guiar cada uno de mis pasos, darme fortaleza en los momentos difíciles y permitirme alcanzar esta meta.

Rocío Edith Soto Huamán

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a Dios, por brindarme la fortaleza y la perseverancia para culminar esta importante etapa en mi vida; a mi mamá, por su amor incondicional, su apoyo constante y por ser mi mayor ejemplo de sacrificio y fortaleza; a mis hermanos, Miguel, Franklin y Jhoel, por su compañía, aliento y confianza a lo largo de este camino; y a mi papá, que está en el cielo, quien me inculcó el sueño de estudiar en la PUCP y fue siempre mi guía y motivación permanente; este logro también es suyo.

Anali Herminia Atencio Condezo

RESUMEN

El diseño de pavimentos en el Perú se desarrolla principalmente bajo la metodología AASHTO 1993, enfoque que presenta limitaciones al sustentarse en relaciones empíricas y no integra la variabilidad climática, lo que conduce a diseños conservadores. En ese contexto, la presente investigación analiza la aplicabilidad de la metodología mecanística-empírica MEPDG AASHTO 2015 en la ciudad de Cerro de Pasco y tiene como objetivo desarrollar un Modelo Climático Integrado (ICM), para luego ser implementado como archivo de entrada en el software *AASHTOWare Pavement ME Design* para el diseño de pavimentos rígidos. El principal aporte radica en la creación de dicho modelo climático local, generado a partir de recopilación y procesamiento de datos de estaciones meteorológicas del OEFA y de base de datos electrónicas conforme a los requerimientos del MEPDG. Asimismo, se diseñó un prototipo de pavimento rígido y se analizó la influencia del clima mediante la comparación de tres escenarios contrastantes: clima frío (Cerro de Pasco), clima templado (Austin) y clima muy cálido (Key West), manteniendo constantes las condiciones de tráfico y la caracterización de materiales. Los resultados evidenciaron que el MEPDG permite optimizar el espesor de la losa frente a la metodología tradicional. En términos de desempeño, se identificó que el Índice de Rugosidad Internacional (IRI) resultó mayor en climas fríos; mientras que, otros indicadores como el escalonamiento promedio de juntas y el agrietamiento transversal evidenciaron menor sensibilidad frente a la variación climática, al estar controlados principalmente por variables geométricas y mecánicas de la estructura. En contraste, el módulo elástico de la base y el módulo de reacción dinámico de la subrasante alcanzaron mayor rigidez en climas templados y muy cálidos, en comparación con climas fríos debido al contenido de humedad. Finalmente, el daño acumulado por fatiga es mínimo para concretos rígidos, lo que sugiere que el clima no controla este mecanismo de falla.

Palabras clave: MEPDG, Pavimento rígido, Modelo Climático Integrado

ÍNDICE

RESUMEN	i
ÍNDICE.....	ii
LISTA DE TABLAS	viii
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE ABREVIATURAS	xv
1. GENERALIDADES.....	1
1.1. Introducción	1
1.2. Justificación.....	5
1.3. Objetivos	6
1.3.1. Objetivo general.....	6
1.3.2. Objetivos específicos	7
1.4. Alcances y Limitaciones	7
1.5. Normativa Peruana para el diseño de Pavimentos	8
1.6. Situación de la metodología mecanístico empírico en Latinoamérica	9
1.7. Metodología	10
2. MARCO TEÓRICO	13
2.1. Definición de pavimentos.....	13
2.2. Clasificación de pavimentos.....	13
2.3. Métodos de diseño de pavimentos rígidos.....	15
2.3.1. Método del AASHTO 1993	15
2.3.2. Método de Portland Cement Association (PCA)	19

2.3.3. Método mecanístico–empírico del AASHTO	19
2.4. Diseño mecanístico–empírico de pavimentos AASHTO 2015	20
2.4.1. Proceso de diseño.....	20
2.4.2. Niveles jerárquicos de datos de entrada	23
2.4.3. Parámetros de diseño	25
2.4.4. Características y factores de diseño no considerados en el MEPDG	40
2.4.5. Indicadores de desempeño para pavimentos rígidos por AASHTOWare Pavement Me Design ..	43
2.4.6. Criterios de desempeño y confiabilidad de diseño	44
2.5. Modelo climático integrado mejorado.....	45
3. MODELO CLIMÁTICO DE LA CIUDAD DE CERRO DE PASCO.....	50
3.1. Características climatológicas de la ciudad de Cerro de Pasco	51
3.1.1. Parámetros requeridos.....	51
3.1.2. Disponibilidad de información climatológica	52
3.1.3. Limitaciones.....	53
3.2. Recopilación y Análisis de información climática.....	54
3.2.1. Precipitación	54
3.2.2. Temperatura	56
3.2.3. Nubosidad	57
3.2.4. Velocidad del viento	58
3.2.5. Nivel Freático	60
3.2.6. Salida y puesta del sol.....	61
3.2.7. Humedad relativa	62
3.2.8. Radiación solar	63
3.2.9. Coordenadas geodésicas	66
3.2.10. Fuentes de error de los datos obtenidos	67
3.3. Elaboración del archivo climático integrado ICM	67
3.3.1. Estructura del archivo ICM.....	68

3.3.2. Integración de información climatológica	71
4. DISEÑO DEL PROTOTIPO DE PAVIMENTO RÍGIDO EN CERRO DE PASCO	74
4.1. Diseño de pavimento rígido AASHTO 93	75
4.1.1. Parámetros de diseño	75
4.1.2. Procedimiento de diseño de pavimento rígido	77
4.2. Diseño de un pavimento rígido con el método Mecánico-Empírico	86
4.2.1. Información general	87
4.2.2. Criterios de desempeño	88
4.2.3. Caracterización del tránsito	89
4.2.4. Caracterización del clima	98
4.2.5. Caracterización de los materiales	99
4.2.6. Diseño base con clima de Cerro de Pasco	107
4.3. Generación de escenarios climáticos alternativos	110
4.3.1. Diseño con clima templado (Austin)	110
4.3.2. Diseño con clima muy cálido (Key West)	112
5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	114
5.1. Comparativa del diseño mediante el AASHTO 93 y MEPDG 2015	114
5.2. Evaluación de criterio de desempeño del diseño con el MEPDG	114
5.3. Análisis de influencia del clima	116
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	125
6.1. Conclusiones	125
6.2. Recomendaciones	132
BIBLIOGRAFÍA	134
ANEXOS	139

Anexo A: Resultados de PMED para Cerro De Pasco I – Perú 139

Anexo B: Resultados de PMED para Cerro de Pasco II – Perú 153

Anexo C: Resultados de PMED para Austin – Texas – USA 167

Anexo D: Resultados de PMED para Key West – Florida – USA..... 181



LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Resumen de ensayos de laboratorio.....	16
Tabla 2. Niveles de entrada para la recalibración de las variables de ingreso.....	24
Tabla 3. Características del suelo como material para el pavimento.....	27
Tabla 4. Variables de entrada y protocolos de ensayo para pavimentos nuevos y existentes.	29
Tabla 5. Parámetros de entrada recomendados para ejecutar ensayos para materiales de PPC. ..	30
Tabla 6. Número mínimo de días por año (tamaño de la muestra) de datos WIM para estimar la distribución normalizada de la carga por eje.....	33
Tabla 7. Mínimo número de días por estación (tamaño de muestra) de datos AVC para estimar la distribución normalizada del tráfico de camiones.....	33
Tabla 8. Descripción de la Clasificación de Tránsito de Camiones (TTC) y distribución de las clases de camiones incluidos en el software de diseño AASHTOWare Pavement ME Design.....	36
Tabla 9. Descripciones de los grupos TTC.....	37
Tabla 10. Equivalencia de clasificación de vehículos del Reglamento Nacional de Vehículos y el FHWA.....	40
Tabla 11. Valores recomendados por la MEPDG para los criterios de desempeño	45
Tabla 12. Valores recomendados por la MEPDG para los niveles de confiabilidad.....	45
Tabla 13. Parámetros climáticos requeridos por el modelo EICM según la metodología MEPDG	52
Tabla 14. Información obtenida para la creación del archivo ICM	53
Tabla 15. Irradiación solar promedio mensual en la ciudad de Cerro de Pasco para el período de 1975-1990	64
Tabla 16. Datos de las coordenadas geodésicas de la estación OEFA	66
Tabla 17. Datos informativos de la estación total ubicada en Cerro de Pasco.	69

Tabla 18. Directrices para la duración del periodo de análisis de un diseño.	75
Tabla 19. Niveles de confiabilidad recomendados para varias clasificaciones funcionales de vías 76	
Tabla 20. Factor de Corrección Estacional.....	78
Tabla 21. Factor distribución de carril (L).....	78
Tabla 22. Resumen de cálculo del ESAL	79
Tabla 23. Resultado de módulo de rotura y elasticidad de un concreto $f'c=280 \text{ kg/cm}^2$	80
Tabla 24. Resultado de Calicatas en Av. El Minero y Jirón Huancavelica	81
Tabla 25. Efecto de la subbase sin tratar en los valores de k (pci)	82
Tabla 26. Valores de coeficiente de drenaje recomendado (Cd) para el diseño de pavimentos rígidos	82
Tabla 27. Resultado de k y k' para una subrasante con CBR de 12 y una subbase de 20 cm.	82
Tabla 28. Coeficiente de desviación estándar normal ZR	83
Tabla 29. Resultados del espesor de la losa del pavimento rígido en Cerro de Pasco.....	84
Tabla 30. Requisitos mínimos de diseño para los diferentes tipos de pavimentos - Norma CE.010 Pavimentos Urbanos.	85
Tabla 31. Datos de entrada de los indicadores de desempeño en software	88
Tabla 32. Distribución porcentual de tránsito de camiones según la clasificación de vehículos de la FHWA.....	93
Tabla 33. Tipo de suelo para la caracterización de la base y la subrasante del pavimento.	106
Tabla 34. Predicción de comportamiento del pavimento durante el periodo de diseño para Cerro de Pasco, Austin y Key West.....	115

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Metodología de Trabajo.	12
Figura 2. Estructura de los tipos de pavimentos.	15
Figura 3. Diagrama del proceso de Diseño y Análisis en pavimentos mediante el enfoque MEPDG. 22	
Figura 4. Esquema de datos de tránsitos de camiones.	38
Figura 5. Clasificación de vehículos FHWA. Adaptado de “Guía de Diseño Mecánico – Empírico de Pavimentos”, por AASHTO, 2015.	39
Figura 6. Características de diseño no incluidos en el MEPDG.	42
Figura 7. Indicadores de desempeño en pavimentos rígidos.	43
Figura 8. Flujo de metodología para el archivo climático ICM.	50
Figura 9. Precipitación mensual acumulada (mm) registrada en la estación del OEFA de la ciudad de Cerro de Pasco durante el período 2020-2021.	55
Figura 10. Precipitación mensual acumulada (in) registrada en la estación del OEFA de la ciudad de Cerro de Pasco durante el período 2020-2021.	55
Figura 11. Temperatura promedio mensual (°C) registrada en la estación del OEFA de la ciudad de Cerro de Pasco durante el período 2020-2021.	57
Figura 12. Temperatura promedio mensual (°F) registrada en la estación del OEFA de la ciudad de Cerro de Pasco durante el período 2020-2021.	57
Figura 13. Nubosidad horaria (%) registrada de Weather Spark de la ciudad de Cerro de Pasco para el periodo 2020–2021	58
Figura 14. Velocidad promedio diaria del viento (m/s) registrada en la estación del OEFA de la ciudad de Cerro de Pasco durante el período 2020-2021.	60
Figura 15. Velocidad promedio diaria del viento (mph) registrada en la estación del OEFA de la ciudad de Cerro de Pasco, durante el período de 2020-2021.	60

Figura 16. Salida y puesta del sol diarias (en horas decimales) de la ciudad de Cerro de Pasco para el período 2020–2021, registradas en la página en línea Sunrise and Sunset.....	62
Figura 17. Humedad relativa promedio mensual (%) registrada en las estaciones del OEFA y del SENAMHI de la ciudad de Cerro de Pasco para el período 2020-2021.	63
Figura 18. Radiación solar horizontal global diaria promedio durante el período de 1999 a 2018 en el Perú.	65
Figura 19. Gráfico de salida y puesta del sol diaria de la ciudad de Cerro de Pasco para el periodo de estudio.	66
Figura 20. Estructura de modelo climático compatible con el software AASHTOWare Pavement ME Design.	68
Figura 21. Configuración de los datos promedios que conforman la estructura del archivo climático.	69
Figura 22. Configuración de datos diarios que forman parte del modelo virtual.	70
Figura 23. Configuración de datos horarios de parámetros climáticos requeridos por el MEPDG.	71
Figura 24. Guardar de Microsoft Excel a formato texto.	72
Figura 25. Eliminación de exceso de espacio en Bloc de Notas.	72
Figura 26. Guardado del archivo del Block de Notas en formato ".icm".	73
Figura 27: Medición de tráfico diario en la Av. El Minero del 15/08/2021 – 21/08/2021 – Cerro de Pasco. Tomado Municipalidad Distrital de Simón Bolívar (2022).	78
Figura 28. Módulo de reacción k (kg/cm^3) de la subrasante.	81
Figura 29. Diseño Final de Pavimento rígido con la metodología empírica AASHTO 1993.	86
Figura 30. Interface principal de AASHTOWare Pavement ME Design.	87
Figura 31. Datos de entrada de la información general del proyecto en el software PMED.	88
Figura 32. Valores de los criterios de desempeño límite y nivel de confiabilidad ingresados en el PMED.	89

Figura 33. Datos de entrada de tránsito de camiones según el MEPDG 2015. Elaboración propia.

89

Figura 34. Interface del software para la caracterización del tránsito. 90

Figura 35. Datos de entrada generales del tránsito en el software PMED 2013..... 91

Figura 36. Datos de diseño para la capacidad de tráfico en el PMED v1.3..... 91

Figura 37. Valores por defecto en el PMED v1.3 para la caracterización del tránsito. 92

Figura 38. Interfaz de PMED sobre la distribución por clase de vehículo con una razón de crecimiento de 1.2..... 93

Figura 39. Ajuste mensual en el software PMED v1.3..... 94

Figura 40. Número promedio de ejes por cada tipo de camión y eje en PMED v1.3..... 95

Figura 41. Distribución de carga por eje en el software. Fuente: elaboración propia. 95

Figura 42. Distribución de carga por defecto para vehículos con eje simple del PMED v1.3. 96

Figura 43. Distribución de carga por defecto para vehículos con eje tándem del PMED v1.3. ... 96

Figura 44. Distribución de carga por defecto para vehículos con eje trídeme del PMED v1.3. 97

Figura 45. Distribución de carga por defecto para vehículos con eje cuádruple del PMED v1.3. 97

Figura 46. Interfaz de caracterización del clima con información horaria. 98

Figura 47. Resumen de condiciones climáticas de Cerro de Pasco. 99

Figura 48. Parámetros de entrada del JPCP sobre la superficie de absorción, espaciado entre juntas y propiedades de los dowels..... 101

Figura 49. Parámetros de entrada del JPCP en PMED v1.3. 101

Figura 50. Parámetros de fricción entre la base y la losa de concreto. 102

Figura 51. Consolidación de parámetros de diseño del JPCP..... 102

Figura 52. Datos de entrada para la capa de concreto..... 103

Figura 53. Datos de caracterización del concreto. 104

Figura 54. Parámetros de diseño consolidados para la caracterización de la capa de PPC. 105

Figura 55. Propiedades de la base del pavimento A-1-a.....	106
Figura 56. Propiedades de la subrasante del pavimento A-1-a.....	106
Figura 57. Estructura de los materiales de las capas del pavimento diseñado.....	107
Figura 58. Datos de entrada en el PMED v1.3.	108
Figura 59. Resultado del criterio de desempeño y de confiabilidad para un espesor de losa de 3 in. 108	
Figura 60. Modificación en espesor de losa de concreto, según Norma CE.010 Pavimentos Urbanos.....	109
Figura 61. Resultados de diseño de pavimento con espesor de losa 15 cm (5.906 in).....	109
Figura 62. Resumen de condiciones climáticas de Austin – Texas, archivo AUSTIN/BERGSTROM, TX (13904).....	111
Figura 63. Resultado de diseño de pavimento para un clima templado - Austin, Texas.....	112
Figura 64. Resumen de condiciones climáticas de Key West –Florida, archivo KEY WEST, FL (12836).....	113
Figura 65. Resultado de diseño de pavimento para un clima muy templado – Key West, Florida. 113	
Figura 66. Predicción del IRI para el pavimento durante su vida útil para Cerro de Pasco, Austin y Key West. Fuente: Elaboración propia.....	117
Figura 67. Predicción del escalonamiento promedio de juntas para el pavimento durante su vida útil para Cerro de Pasco, Austin y Key West. Fuente: Elaboración propia.....	118
Figura 68. Predicción de módulo de reacción de la base del pavimento – Cerro de Pasco, Perú. 121	
Figura 69. Predicción de módulo de reacción de la base del pavimento – Austin, Texas.....	121
Figura 70. Predicción de módulo de reacción de la base del pavimento – Key West, Estados Unidos.....	122

Figura 71. Predicción de módulo de reacción de la subrasante del pavimento – Cerro de Pasco, Austin y Key West. Fuente: Elaboración propia. 123

Figura 72. Predicción del daño acumulativo del PPC – Cerro de Pasco, Austin y Key West.... 124



LISTA DE ABREVIATURAS

- AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials (Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes)
- AADTT - Annual Average Daily Truck Traffic (Tránsito Promedio Diario Anual de Camiones en vías de dos sentidos)
- ASTM - American Society for Testing and Materials (Sociedad Americana de Pruebas y Materiales)
- ATPB – Asphalt Treated Permeable Base (Base Permeable Tratada con Asfalto)
- AVC - Automatic Vehicle Classification (Clasificación Automatizada de Vehículos)
- CMS - Climatic – Materials - Structural (Modelo Climático - Materiales - Estructura)
- CRCP – Continuously Reinforced Concrete Pavement (Pavimento de Concreto Continuamente Reforzado)
- EICM - Enhanced Integrated Climatic Model (Modelo climático integrado mejorado)
- FEA - Finite Element Analysis (Análisis de Elementos Finitos)
- FHWA - Federal Highway Administration (Administración Federal de Carreteras)
- HMA - Hot Mix Asphalt (Mezcla Asfáltica en Caliente)
- ICG - Instituto de la Construcción y Gerencia
- ICM- Integrated Climatic Model (Modelo climático integrado)
- ID - Infiltration and Drainage (Infiltración y Drenaje)
- IRI - International Roughness Index (Índice de Rugosidad Internacional)
- JPCP - Jointed Plain Concrete Pavement (Pavimento de Concreto simple con Juntas)
- M-E - Mecanístico Empírico
- MEPDG - Mechanistic Empirical Pavement Design Guide (Guía de Diseño Mecanístico Empírico de Pavimentos)
- MLET - Multi-layer Elastic Theory (Teoría Elástica Multicapa)

MTC - Ministerio de Transportes y Comunicaciones

MVCS - Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento

SENAMHI – Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú

OEFA – Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental

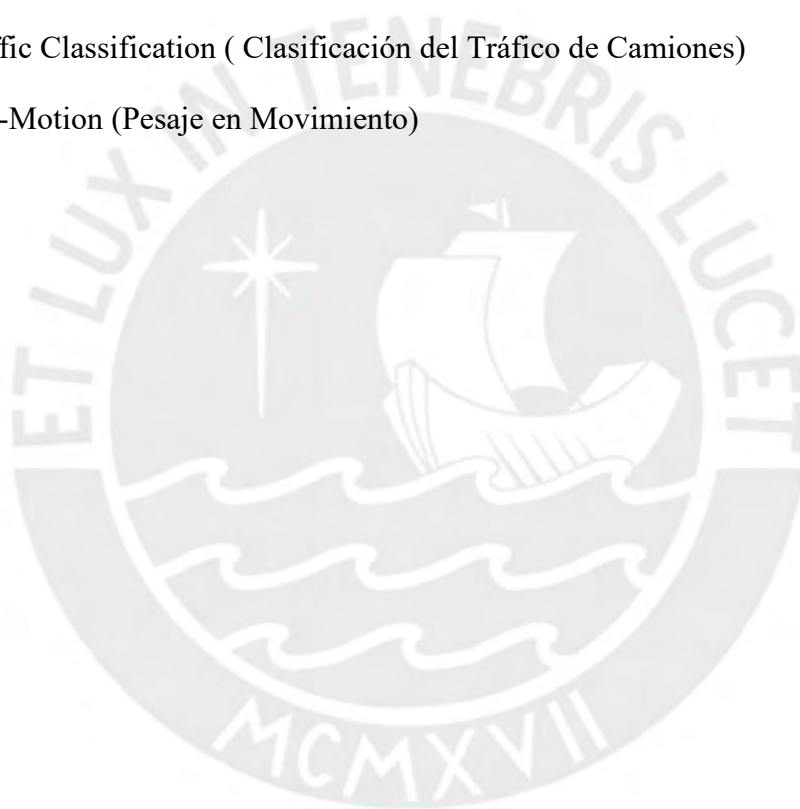
PCC - Portland Cement Concrete (Concreto de Cemento Portland)

PMED - AASHTOWare Pavement ME Design

RNV - Reglamento Nacional de Vehículos

TTC -Truck Traffic Classification (Clasificación del Tráfico de Camiones)

WIM - Weigh-In-Motion (Pesaje en Movimiento)



1.GENERALIDADES

1.1.Introducción

A lo largo del tiempo, la metodología de diseño de pavimentos ha evolucionado de un enfoque empírico a uno mecanicista-empírico. El primer método de diseño empírico desarrollado fue la Relación de Carga de California (*California Bearing Ratio - CBR*), por la División de Carreteras de California a mediados de la década de 1920 y, posteriormente, adaptado por el *US Army Corps of Engineers* (Cuerpo de Ingenieros de Ejército de los Estados Unidos) en 1945. El objetivo inicial del método CBR era determinar el espesor de las capas del pavimento a partir de los valores de CBR del material, a fin de evitar la falla por corte en la subrasante. Actualmente, el método empírico más utilizado es el método propuesto por la *American Association of State Highway and Transportation Officials* (Asociación Estadounidense de Funcionarios Estatales de Carreteras y Transporte), AASHTO 1993, de acuerdo con Hatoum et al. (2023).

La metodología empírica AASHTO 93 se sustenta principalmente en los resultados de la Prueba de Carretera de la AASHTO (*AASHTO Road Test*), desarrollada a finales de los años cincuenta e inicios de los años sesenta. Dicho estudio consistió en un experimento a gran escala, realizado en pistas de prueba que reproducían condiciones reales de servicio, pues se construyeron secciones de pavimentos reales en una carretera en Ottawa, Illinois. Estas pruebas dieron como resultado el desarrollo de la ecuación de diseño AASHTO, la cual es una relación de regresión entre el número de ciclos de carga de tráfico, la capacidad estructural de todas las capas del pavimento y el índice de capacidad de servicio, el cual es utilizado para medir el desempeño del pavimento (Hatoum et al., 2023). Sin embargo, este enfoque presenta muchas limitaciones, pues la prueba de carretera se llevó a cabo bajo ciertas condiciones climáticas y ambientales específicas,

presión de neumáticos, coeficientes de drenaje, conjunto específico de materiales de subrasante y pavimento, así como un volumen específico de tráfico de camiones. Como resultado, resulta difícil adaptar esas relaciones empíricas a diferentes factores locales de tránsito, materiales y clima. Por ello, no se puede visualizar la influencia de estos parámetros en el desempeño de los pavimentos (Fahim et al., 2023). Asimismo, la metodología empírica es conservadora al calcular el espesor de las capas estructurales de los pavimentos, lo que genera un sobrediseño (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2014).

Las limitaciones del método AASHTO 93 motivaron el desarrollo de una metodología mecanicista-empírica, impulsada por el Programa Nacional de Investigación Cooperativa de Carreteras (*National Cooperative Highway Research Program, NCHRP 1-37A*), y posteriormente adoptada y publicada por la AASHTO en 2002, siendo esta la primera aproximación a una metodología de diseño mecanicista-empírico (Li et al., 2011). En el 2008, la AASHTO publicó formalmente la Guía de Diseño de Pavimentos Mecanicista-Empírico (*Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide - MEPDG*), un enfoque más sofisticado y preciso que integraba principios mecánicos y modelos computacionales para predecir el comportamiento del pavimento. Posteriormente, se publicaron dos ediciones en las que se actualizó el manual: una en 2015 y otra en 2022. Según la Asociación Estadounidense de Funcionarios Estatales de Carreteras y Transporte (American Association of State Highway and Transportation Officials [AASHTO], 2015), uno de los enfoques de diseño de pavimentos que toma en consideración los parámetros de tránsito, propiedades de los materiales y los factores climatológicos es la Guía de Diseño de Pavimentos Mecanicista - Empírico (MEPDG, por sus siglas en inglés), el cual permite predecir y evaluar el desempeño de la estructura durante su vida útil mediante el análisis de esfuerzos, deflexiones y deformaciones. Asimismo, la metodología MEPDG puede utilizarse para programar

el mantenimiento de pavimentos en servicio. Por lo tanto, la metodología propuesta en la Guía AASHTO 2015 representa un cambio significativo en comparación con la de 1993. Finalmente, este método optimiza el diseño de los espesores de los pavimentos mediante iteraciones (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2014).

Uno de los componentes primordiales de la metodología de diseño empleando el AASHTO 2015 es el clima, el cual puede afectar positiva o negativamente el comportamiento del pavimento dependiendo del lugar y las condiciones ambientales a las que estará (Johanneck & Khazanovich, 2010). En los últimos años, diversos investigadores coinciden en que la variación climática constituye uno de los factores predominantes que influyen en el desempeño y la vida útil de los pavimentos, siendo la temperatura y la precipitación las variables de mayor relevancia.

Por un lado, en pavimentos flexibles (*Hot Mix Asphalt – HMA*), incrementos significativos de estos parámetros climáticos, provocan un cambio en la calidad del ligante asfáltico, alteración del módulo dinámico y desequilibrios de humedad en la subrasante, lo que se traduce en una reducción de rigidez estructural y en la aparición de deformaciones permanentes (Swarna & Hossain, 2022). Por otro lado, en pavimentos rígidos, la exposición a climas fríos extremos puede dar lugar a ciclos de hielo y deshielo, originados por variaciones de temperatura, que provocan fisuras debido a procesos de expansión y contracción térmica, lo que genera un debilitamiento estructural progresivo. Asimismo, cuando el pavimento está sometido a temperaturas elevadas, se acelera la pérdida de humedad, reduciendo su resistencia y acortando su durabilidad y capacidad de servicio, lo que incrementa los costos de mantenimiento (Sultana et al., 2022).

Ante la influencia directa del clima en el comportamiento estructural y funcional de los pavimentos, la metodología mecanística-empírica MEPDG incorpora los factores climáticos en su proceso de diseño mediante un *Integrated Climate Model - ICM* (Modelo Climático Integrado).

Dicho modelo emplea información climática y ambiental del sitio del proyecto, como temperatura, precipitación, velocidad del viento, humedad relativa, nubosidad, radiación solar y nivel freático, lo que permite una evaluación más representativa del desempeño del pavimento a lo largo de su vida útil (AASHTO, 2015).

En este contexto, la presente tesis tiene como objetivo desarrollar un Modelo Climático Integrado (*Integrated Climate Model – ICM*) a partir de información obtenida de estaciones meteorológicas cercanas a Cerro de Pasco e implementarlo posteriormente en el diseño de un prototipo de un pavimento rígido mediante el software *AASHTOWare Pavement ME Design* (versión 2013). Para ello, se emplearon datos de entrada correspondientes a la caracterización de materiales y al tránsito vehicular, obtenidos a partir de la revisión de la literatura especializada, considerando como área de estudio la ciudad de Cerro de Pasco. A partir del prototipo de diseño desarrollado, se analizó la influencia del clima en el diseño estructural y en la vida útil del pavimento, manteniendo constantes los parámetros de tránsito vehicular y la caracterización de los materiales, de modo que el clima sea la única variable de análisis. Con este propósito, se utilizaron modelos climáticos predeterminados por el software, que representan regiones con condiciones climáticas contrastantes: clima frío extremo (Cerro de Pasco), clima templado (Austin) y clima muy cálido (Key West).

1.2. Justificación

En Perú, el diseño de pavimentos aún se realiza mediante los lineamientos propuestos por la AASHTO 1993, los cuales están regulados por el *Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos - Sección de Suelos y Pavimentos*, publicado por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) en 2014, cuya aplicación se orienta principalmente a vías interurbanas y de alto tránsito. Asimismo, el diseño de pavimentos urbanos se rige por la Norma CE.010 *Pavimentos Urbanos* del Reglamento Nacional de Edificaciones, publicada por el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento en 2010, que establece requisitos mínimos para el diseño, construcción, rehabilitación, mantenimiento, rotura y reposición de pavimentos en entornos de menor volumen de tránsito. Tanto el manual como la norma permiten la aplicación de metodologías alternativas de diseño estructural, siempre que estas se encuentren debidamente sustentadas y validadas por las entidades competentes, lo que abre la posibilidad de evaluar y promover metodologías más avanzadas, como el enfoque mecanístico-empírico. No obstante, su implementación requiere un esfuerzo conjunto de profesionales del sector, entidades públicas y universidades, orientado al desarrollo de estudios que permitan disponer de una base de datos confiable de información climática, de tráfico y de caracterización de materiales, la cual actualmente constituye una de las principales limitaciones en el contexto nacional.

La importancia de la tesis radica en evaluar la aplicabilidad de la metodología mecanístico-empírica MEPDG AASHTO 2015 en la ciudad de Cerro de Pasco, a partir del análisis de la disponibilidad y la calidad de los datos climáticos proveniente de las estaciones meteorológicas del OEFA, así como de recursos electrónicos con bases de datos climatológicos. Este análisis permite la creación e implementación de un modelo climatológico, pues Cerro de Pasco es una

ciudad expuesta a ciclos de congelamiento y deshielo, que influyen de forma significativa en la vida útil de los pavimentos rígidos.

Asimismo, la investigación busca conocer el impacto de las condiciones climáticas en el análisis, diseño y predicción del desempeño de pavimentos rígidos sometidos a diferentes escenarios climáticos, contribuyendo a una mejor comprensión de la influencia del clima en este tipo de estructuras. En ese sentido, el estudio permite contrastar el comportamiento del pavimento rígido bajo condiciones climáticas frías, cálidas y secas, empleando la misma metodología de diseño.

Finalmente, la tesis pretende promover la difusión y el uso de la metodología MEPDG en el contexto peruano, donde su aplicación aún es limitada. El modelo climático desarrollado constituye un aporte a la base de datos de información climática disponible, el cual puede ser utilizado en futuras investigaciones orientadas a la calibración, validación e implementación del método mecanístico-empírico del AASHTO para el diseño de pavimentos en Cerro de Pasco.

1.3.Objetivos

1.3.1.Objetivo general

- Implementar un Modelo Climático Integrado (ICM), desarrollado a partir de información climatológica de la ciudad de Cerro de Pasco, en el software AASHTOWare Pavement ME Design para el diseño de pavimentos rígidos mediante la metodología mecanístico - empírica AASHTO 2015 MEPDG.

1.3.2. Objetivos específicos

- Desarrollar un Modelo Climático Integrado mediante la recopilación y procesamiento de información climatológica provenientes de estaciones meteorológica de la ciudad de Cerro de Pasco, a través de la generación de un archivo ICM conforme al MEPDG 2015.
- Diseñar un prototipo base de pavimentos rígido mediante la metodología MEPDG AASHTO 2015, mediante el software *AASHTOWare Pavement ME Design* (versión 2013), integrando el modelo climático desarrollado.
- Analizar la influencia de las condiciones climáticas en el comportamiento estructural del pavimento rígido, considerando el clima como la principal variable de análisis en el MEPDG 2015.

1.4. Alcances y Limitaciones

El modelo climático integrado presenta variables climáticas con información de data horaria que han sido registradas directamente de estaciones meteorológicas. Sin embargo, algunos parámetros se han obtenido de investigaciones previas y páginas web, debido a la inexistencia de herramientas de medición meteorológicas en Cerro de Pasco, los cuales son detallados en el Capítulo 3. La información climática analizada corresponde al periodo comprendido entre el 01 de enero del 2020 y el 31 de diciembre del 2021, pues la recopilación de los datos se realizó durante el año 2022. Cabe señalar que este modelo no puede ser implementado en otros lugares que no sea en la ciudad mencionada anteriormente, ya que el clima varía dependiendo el lugar del proyecto. Adicionalmente, los resultados de los diseños de pavimentos con el MEPDG son referenciales, debido a que la información ingresada en el software *AASHTOWare Pavement ME Design* (versión 2013), respecto a la caracterización de tránsito y materiales, no fueron obtenidos directamente de estudios de campo. En ese sentido, se emplearon valores basados en una revisión

de literatura respecto a la información de tráfico, caracterización de los materiales, valores umbrales de criterios de desempeño, así como valores por default propios del programa.

1.5. Normativa Peruana para el diseño de Pavimentos

a) Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos - Sección de Suelos y Pavimentos

Este manual fue emitido por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) en el año 2014, a través de su normativa especializada en Suelos y Pavimentos, en el cual se establece los lineamientos técnicos para el dimensionamiento de las capas estructurales, tanto en vías pavimentadas como no pavimentadas y en caminos. Con la finalidad de obtener durabilidad, calidad y eficiencia en el desempeño de las superficies de rodadura (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2014)

El manual se fundamenta bajo los lineamientos del método AASHTO 93 para el dimensionamiento de pavimentos, adicionalmente integra normativas técnicas internacionales (ASTM) y nacionales (NTP) para los ensayos de laboratorio de suelos y pavimentos.

b) Norma CE.010 Pavimentos Urbanos del Reglamento Nacional de Edificaciones

La normativa de Pavimentos Urbanos (CE.010) del Reglamento Nacional de Edificaciones fue publicada por el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento en el año 2010, con el objetivo de estandarizar criterios mínimos respecto a la estructuración, mantenimiento y reposición de pavimentos urbanos, el diseño necesario según esta normativa es que los pavimentos urbanos soporten cargas de tránsito, su implementación busca reducir fallas en los pavimentos, tales como fisuras, deformaciones y pérdida de capacidad estructural (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento del Perú, 2010).

Conforme a lo establecido en el capítulo 4 de la Norma CE.010, el proyectista puede seleccionar cualquier método de diseño estructural que posea respaldo teórico y validación empírica en el tiempo, en la práctica peruana predominan los métodos del AASHTO 93 y el PCA (Portland Cement Association). En caso de que se opte por otra metodología, la norma exige que se incluya como anexo a la memoria descriptiva.

1.6.Situación de la metodología mecanístico empírico en Latinoamérica

En la actualidad, la Guía de Diseño Mecanístico-Empírico de Pavimentos (MEPDG, por sus siglas en inglés), en su versión AASHTO 2015, constituye uno de los manuales más avanzado para el análisis y diseño de pavimentos. En este contexto, el Instituto de la Construcción y Gerencia (ICG), en colaboración con el Comité Internacional de Pavimentos M-E, han desarrollado la traducción del manual al idioma español, con la finalidad de difundir y fomentar la aplicación del método mecanístico empírico en América Latina.

Chang et al. (2013) realizaron una investigación con el objetivo de evaluar el nivel de conocimiento y uso de la metodología MEPDG AASHTO 2008 en los países de Latinoamérica. Para ello, encuestaron a un aproximado de 1000 profesionales de 15 países, entre los que se incluyeron estudiantes, consultores, entidades gubernamentales y docentes. Los resultados mostraron que el 77,5% de los encuestados conocen la metodología, pero su aplicación en la práctica es limitada, siendo el método AASHTO 93 el más utilizado actualmente. Asimismo, el 12,5% de los encuestados mencionaron que el MEPDG se emplea como un diseño alternativo para comparar resultados con los métodos de diseño clásicos. En contraste, el 10% de los encuestados expresaron que desconocen del MEPDG en su país. De los resultados obtenidos, los autores concluyeron que el diseño de pavimentos en Latinoamérica es limitado al emplear la metodología MEPDG.

Adicionalmente, en el estudio desarrollado por Chang et al. (2013), se identifica las principales limitaciones que presenta la implementación de la guía MEPDG en los países de América Latina, las cuales son los siguientes: la falta de conocimiento del método, las dificultades durante el proceso de calibración, la limitada accesibilidad al software de diseño, la insuficiencia de información climática, la carencia de equipos de laboratorio para ejecutar los ensayos de materiales, así como el apoyo limitado de las entidades del estado. No obstante, los países como Chile, Colombia, Argentina y Costa Rica han venido desarrollado acciones que favorecen la implementación de esta metodología.

Se han elaborado modelos climáticos y existen estudios sobre calibración de modelos de daños para pavimentos rígidos para diferentes zonas en Argentina y Chile con la finalidad de realizar estudios comparativos con la metodología del AASHTO 93. De modo similar, en Costa Rica se ha efectuado la calibración del módulo dinámico para su territorio, también se ha implementado cursos en posgrados y maestrías sobre la metodología en las universidades. De igual manera, en Colombia, se han realizado comparaciones entre las dos metodologías discutidas (Chang et al., 2013).

1.7. Metodología

La metodología de este trabajo consiste en comprender los principales conceptos del método mecanístico-empírico para la recolección de información climática necesaria para la elaboración del modelo climático integrado en Cerro de Pasco, a partir de datos de estaciones meteorológicas cercanas al lugar de estudio. En ese sentido, la metodología se desarrolla en las siguientes etapas:

Primero, se consultaron recursos electrónicos y físicos relacionados con el diseño de pavimentos rígidos, empleando el método mecanístico-empírico y la aplicación de la MEPDG

AASHTO 2015 en el análisis y el diseño de pavimentos, para definir los principales conceptos y desarrollar el marco teórico.

Segundo, se creó el archivo climático. icm (modelo climático integrado) de la ciudad de Cerro de Pasco, para lo cual se considera lo siguiente: estudio de los parámetros de entrada indispensables que requiere el MEPDG AASHTO 2015 para el diseño de pavimentos; evaluación de la disponibilidad de datos climáticos de Cerro de Pasco; recopilación y análisis de datos climatológicos del lugar en mención; y, finalmente, creación del modelo climático previamente estructurado con la información obtenida.

Tercero, se implementó el archivo. icm en el programa *AASHTOWare Pavement ME Design* (versión 2013), para diseñar un prototipo de pavimento rígido, donde el único parámetro real del lugar será la data climática. Cabe señalar que se asumirán valores y criterios basados en investigaciones previas de las variables adicionales que se requieren en el MEPDG tales como el tráfico y el material de construcción, con el fin de determinar los niveles de desempeño del pavimento. Seguidamente, se revisó si el diseño de prueba presenta errores relacionados con los datos de entrada o si el tipo de falla obtenido es consistente con el valor de confiabilidad asumido inicialmente.

Finalmente, se analizó la influencia del modelo climático en el comportamiento y diseño de las capas estructurales de pavimentos rígidos cuando se encuentran expuestas a diferentes condiciones ambientales empleando el programa *AASHTOWare Pavement ME Design* (versión 2013).

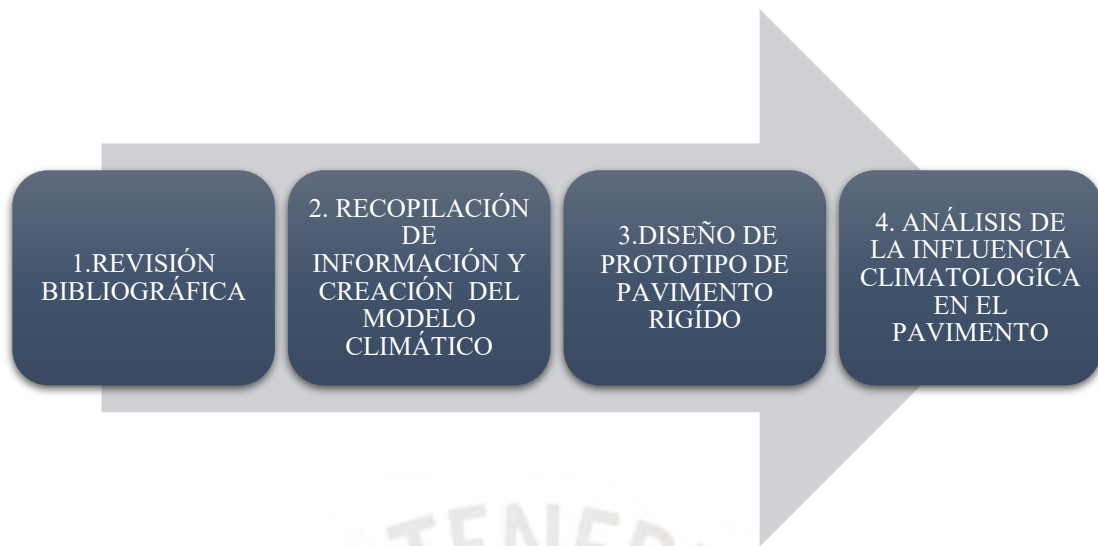


Figura 1. Metodología de Trabajo.



2.MARCO TEÓRICO

2.1.Definición de pavimentos

Un pavimento es una estructura compuesta por una o múltiples capas de diversos materiales y espesores, apoyada de manera continua sobre la superficie. Su diseño y construcción tienen como objetivo resistir cargas estáticas y móviles durante una vida útil determinada. Su función primordial es proporcionar una superficie de rodadura resistente a la abrasión y con adecuados niveles de servicio, así como mantener la estabilidad estructural frente a las cargas aplicadas. (Vivar, 1995).

Según Montejo (2002), los pavimentos deben contar con algunas características de diseño y ejecución para su adecuado funcionamiento, los cuales son los siguientes: ser resistente y capaz de soportar las cargas de tránsito; soportar los efectos ambientales; presentar una superficie de rodadura externa correspondiente a las velocidades de los vehículos, de tal forma que se diseñe un pavimento con una textura superficial resistente al desgaste abrasivo; la regularidad superficial deben permitir una adecuada facilidad de circulación de los usuarios tanto para las longitudes transversales como longitudinales; disponer de condiciones de drenaje adecuados; y evitar reflejos y deslumbramientos empleando un color adecuado de la carpeta para otorgar mayor seguridad al tránsito.

2.2.Clasificación de pavimentos

Existe una amplia gama de clasificaciones de los pavimentos según el uso, el tipo de textura externa y la forma de respuesta. De acuerdo con Huang (2004), los pavimentos se pueden dividir principalmente en los siguientes tres tipos: flexibles, rígidos y compuestos.

Primero, los pavimentos flexibles están conformados por una mezcla de capas de materiales bituminosos y granulares; se utilizan en zonas urbanas o en vías con tránsito ligero a moderado. Este tipo de pavimento se denomina flexible debido a que las rigideces de las capas que conforman la estructura son relativamente similares, pues presentan relaciones de rigidez inferiores a 20 veces, lo que permite que las capas se deformen de manera conjunta ante la aplicación de cargas. En este tipo de pavimentos, las capas superiores presentan una mayor resistencia debido a la mejor calidad de los materiales, mientras que en las capas inferiores disminuye la capacidad estructural. Un pavimento flexible está constituido, desde la base hasta la superficie, por capas como la subrasante (suelo natural), subbase, base y carpeta de rodadura (Huang, 2004).

Segundo, los pavimentos rígidos se caracterizan por estar constituidos por una losa de concreto armado en la capa superior, que se apoya directamente sobre el suelo natural o una capa de base, con o sin estabilización previa. La capacidad estructural del sistema depende principalmente de la resistencia de la losa de concreto y de la calidad de los materiales de las capas inferiores. En este tipo de pavimentos, los esfuerzos generados por el tránsito se disipan sobre un área más amplia en la carpeta de rodadura, siendo la losa de concreto el principal responsable de disipar dichos esfuerzos (Montejo, 2002).

Tercero, los pavimentos compuestos corresponden a una combinación de pavimentos rígidos y flexibles, donde la capa de rodadura flexible se apoya sobre una losa de concreto, o la losa de concreto se apoya sobre la superficie asfáltica. Este tipo de pavimento se emplea cuando se realizan proyectos de rehabilitación y trabajos de reforzamiento estructural; es decir, se busca construir una nueva estructura sobre una ya existente para mejorar el desempeño estructural y funcional del pavimento (Huang, 2004).

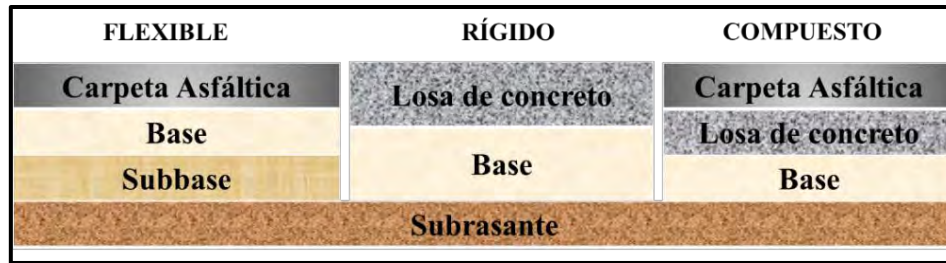


Figura 2. Estructura de los tipos de pavimentos.

2.3. Métodos de diseño de pavimentos rígidos

2.3.1. Método del AASHTO 1993

El método AASHTO 1993 corresponde a un enfoque empírico derivado de los resultados obtenidos de las pruebas viales AASHO (AASHO Road Test), realizadas en los años 1958 y 1960 en Ottawa, Illinois. Esta metodología se basa en modelos de regresión que vinculan el comportamiento estructural del pavimento con las cargas del tránsito y las condiciones de servicio. Para su aplicación, se requiere la realización de estudios de mecánica de suelos, de tráfico y pluviométricos, que se detallan a continuación.

Estudio de mecánica de suelos

El Estudio de Mecánica de Suelos (EMS) permite caracterizar el suelo natural sobre el que recaerá el pavimento, por lo que resulta importante su análisis. Con las muestras de suelos, según el Manual de Carreteras: sección Suelos y Pavimentos (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2014), los ensayos de laboratorio deben realizarse bajo las normas de la *American Society for Testing and Materials* (ASTM) o cumplir los lineamientos establecidos por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC). En la Tabla 1, se detallan los tipos de ensayos de laboratorio considerados.

Tabla 1. Resumen de ensayos de laboratorio.

ENSAYO DE LABORATORIO	NORMA
Análisis granulométrico por tamizado	ASTM D-6913
Límite líquido y plástico	ASTM D-4318
Contenido de humedad	ASTM D-2216
Clasificación SUCS	ASTM D-2487
Contenido de Sulfatos	ASTM D-516
Contenido de Cloruros	ASTM D-512
Contenido de sales solubles totales	MTC – E219
Clasificación AASHTO	M-145
Módulo resiliente de suelos de subrasante	T 274
Proctor modificado	ASTM D-1557
Equivalente de arena	ASTM D-2419
Ensayo de expansión libre	ASTM D-4546
Colapsabilidad potencial	ASTM D-5333
Consolidación uniaxial	ASTM D-2435

Nota. Tomado de “Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos - Sección de Suelos y Pavimentos”, por MTC, 2014.

Para el diseño de pavimentos rígidos, se requiere determinar las propiedades físicas del suelo mediante ensayos de granulometría, de plasticidad, de equivalente de arena y de humedad natural. Asimismo, se realiza la clasificación de suelos e índice de grupo según el sistema AASHTO, parámetros que se complementan con el ensayo CBR (California Bearing Ratio) y el ensayo de módulo resiliente.

Estudio de tráfico

A partir de este estudio, se cuantifica el tránsito vehicular en el lugar de estudio, una variable fundamental para el diseño del pavimento. El procedimiento consiste en estimar el IMDA (Índice Medio Diario Anual), a partir del cual se determina el número de ejes equivalentes (ESAL, por sus siglas en inglés). Asimismo, se analizan el número de carriles, el sentido de circulación y el uso funcional de la vía.

El IMDA es el promedio anual de tráfico vehicular en un tramo vial determinado. Este consiste en el conteo y la clasificación del volumen vehicular realizados durante los siete días de una semana, con registros hora a hora. Asimismo, se estima el comportamiento del tráfico para un periodo de un año, considerando un factor de corrección estacional (FCE), con la finalidad de eliminar el factor de estacionalidad, que influye en los movimientos de carga y pasajeros. Para su cálculo, el MTC (2014) propone la siguiente expresión:

$$IMDA = IMDS \times FC$$

$$IMDS = \sum Vi/7$$

Donde:

IMDS: Índice Medio Diario Semanal o Promedio de Tráfico Diario Semanal

FC: representa el Factor de Corrección Estacional.

Vi: Volumen vehicular diario de cada uno de los 7 días de conteo volumétrico.

Estudio pluviométrico

Se realizan mediciones de temperatura y precipitación debido a la amplia gama climática que presenta Perú, pues se registran temperaturas inferiores a 0 °C y superiores a 40 °C. Por un lado, la temperatura influye directamente en el desempeño del pavimento, pues para climas con valores altos, el pavimento tiene a deformarse, mientras que, a bajas temperaturas, estos tienden a agrietarse por los ciclos de hielo y deshielo. Sin embargo, este parámetro no es un dato de entrada para el diseño según el AASHTO 93. Por otro lado, a partir de la precipitación se puede obtener el coeficiente de drenaje “Cd o m”, variable requerida para el diseño según el AASHTO 93, donde el primero corresponde a pavimentos rígidos y el segundo a flexibles.

Los factores que intervienen en el diseño del espesor de la estructura del pavimento mediante el método AASHTO 93 son el tráfico, el período de análisis, la funcionalidad, el nivel de servicio, el grado de confiabilidad, la variabilidad, el suelo de subrasante, las propiedades del concreto, las condiciones ambientales y la capacidad de drenaje de la estructura del pavimento.

En el diseño de pavimentos rígidos, la metodología AASHTO 93 propuso una expresión para determinar el espesor de las capas estructurales del pavimento. A continuación, se presenta la relación matemática, que detalla los parámetros que intervienen.

$$\log W_{18} = Z_R S_0 + 7.35 \log(D + 1) - 0.06 + \frac{\log\left(\frac{\Delta PSI}{3}\right)}{1 + 1.624 * \frac{10^7}{(D + 1)^{8.46}}} + (4.22 - 0.32 p_t) \log \left\{ \frac{S_c C_d (D^{0.75} - 1.132)}{215.63 J * (D^{0.75} - 18.42 / (\frac{E_c}{k})^{0.45})} \right\}$$

Donde,

W_{18} : Repeticiones de carga por eje simple equivalente a 18 kips proyectada para la vida útil del (ESAL)

Z_R : Desviación estándar normal de la confiabilidad

S_0 : Error estándar de la predicción de tráfico y el desempeño de la estructura

D : Espesor de la losa de concreto (in)

ΔPSI : Variación de nivel de servicio inicial menos el final (PSI)

p_t : Índice de serviciabilidad final (PSI)

S_c : Módulo de ruptura del concreto (PSI)

C_d : Coeficiente de drenaje

J : Coeficiente de transferencia de carga en las juntas

E_c : Módulo de elasticidad del concreto (PSI)

k : módulo de reacción de la subrasante (lb/in³)

Además de la ecuación planteada, la guía propone el uso de nomogramas para determinar el espesor de la losa de concreto del pavimento.

2.3.2. Método de Portland Cement Association (PCA)

El método de *Portland Cement Asociación* (PCA) se basa en un enfoque mecanístico-empírico que analiza los esfuerzos y deflexiones del concreto que se generan en las juntas, esquinas y bordes del pavimento rígido. Este método considera dos criterios fundamentales de diseño: el de erosión y el de fatiga. El primero analiza el comportamiento de la subbase frente al fenómeno de bombeo y las diferencias en las elevaciones de las juntas debido al tránsito pesado. Por su parte, el criterio de fatiga analiza la falla por agrietamiento del concreto como resultado de las cargas constantes a lo largo de la vida útil del pavimento. Los factores de diseño que incorpora el método PCA son el tránsito, las propiedades de los materiales, las condiciones de la subrasante, el ambiente y el comportamiento estructural. La integración del análisis mecánico con criterios empíricos permite predecir los mecanismos de falla y garantizar pavimentos rígidos durables y funcionales durante su vida útil (Packard, 1984).

2.3.3. Método mecanístico–empírico del AASHTO

El desarrollo de la metodología mecanística-empírica se inició en el año 2002, mediante la presentación preliminar de la MEPDG (Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide) por parte de la AASHTO, proceso que se formalizó con la publicación de su primera versión oficial en el año 2008.

Según AASHTO (2008), este método surge como respuesta a las limitaciones del método empírico AASHTO 93. Esta metodología incorpora el enfoque mecanístico al enfoque empírico mediante el uso de herramientas de análisis de elementos finitos (FEA, por sus siglas en inglés) y teoría elástica multicapa (MLET, por sus siglas en inglés), lo que permite calcular la respuesta estructural del pavimento en términos de esfuerzos, deformaciones y deflexiones ante las cargas

del tráfico, las condiciones del clima y propiedades mecánicas de los materiales a través del tiempo.

Posteriormente, se desarrolló el software AASHTOWare Pavement ME Design, el cual permitió la implementación práctica de dicha metodología. Esta herramienta se consolidó con la publicación de la segunda versión de la MEPDG en el año 2015, que incorpora modelos de predicción del desempeño del pavimento, tales como desgaste, ahuellamiento, agrietamiento y la estimación del Índice de Rugosidad Internacional (IRI), para un nivel de confiabilidad previamente establecido. El software opera bajo un proceso iterativo de tres etapas: la creación de un diseño de prueba, la ejecución del programa y la revisión del comportamiento predicho en relación con los criterios de desempeño (AASHTO, 2015).

2.4.Diseño mecanístico–empírico de pavimentos AASHTO 2015

2.4.1.Proceso de diseño

De acuerdo con la Guía de Diseño Mecanístico-Empírico de Pavimentos (AASHTO, 2015), la metodología M-E se desarrolla a través de tres etapas: la evaluación, el análisis y la selección de la estrategia de diseño.

Primero, durante la fase de evaluación, se identifican los parámetros de entrada (materiales, tráfico y clima) para el diseño y se determinan sus valores correspondientes. Un aspecto fundamental de esta etapa es el análisis de la subrasante, para lo cual se realizan investigaciones locales en pavimentos nuevos, mientras que en proyectos de rehabilitación se efectúan evaluaciones de los pavimentos existentes. Asimismo, en esta fase se seleccionan los criterios de desempeño y el nivel de confiabilidad de diseño del proyecto.

Segundo, para la etapa de análisis, se realiza un proceso iterativo que inicia con la selección de un diseño preliminar, generado por el diseñador y que puede obtenerse mediante la aplicación de otras metodologías o de un catálogo general. Se emplean modelos de respuesta y de deterioro para analizar progresivamente la sección de ensayo de prueba del pavimento a lo largo del tiempo. Las respuestas del análisis abarcan las propiedades mecánicas y físicas de los materiales, la extensión y acumulación del daño en el pavimento, el Índice de Rugosidad Internacional (IRI), etc. Si el diseño inicial de prueba planteado no satisface ni supera los criterios de diseño, es necesario modificar los parámetros iniciales para luego volver a analizar la sección hasta lograr un resultado eficaz.

Tercero, la fase de selección de estrategia consiste en la evaluación de las alternativas de diseño de pavimentos estructuralmente viables. Para tal efecto, se realizan labores de análisis de costos de ciclo de vida, así como de ingeniería y de constructibilidad.

En la Figura 3 se presenta, de manera esquemática, el conjunto de etapas del procedimiento de análisis y diseño de pavimentos previamente descritas.

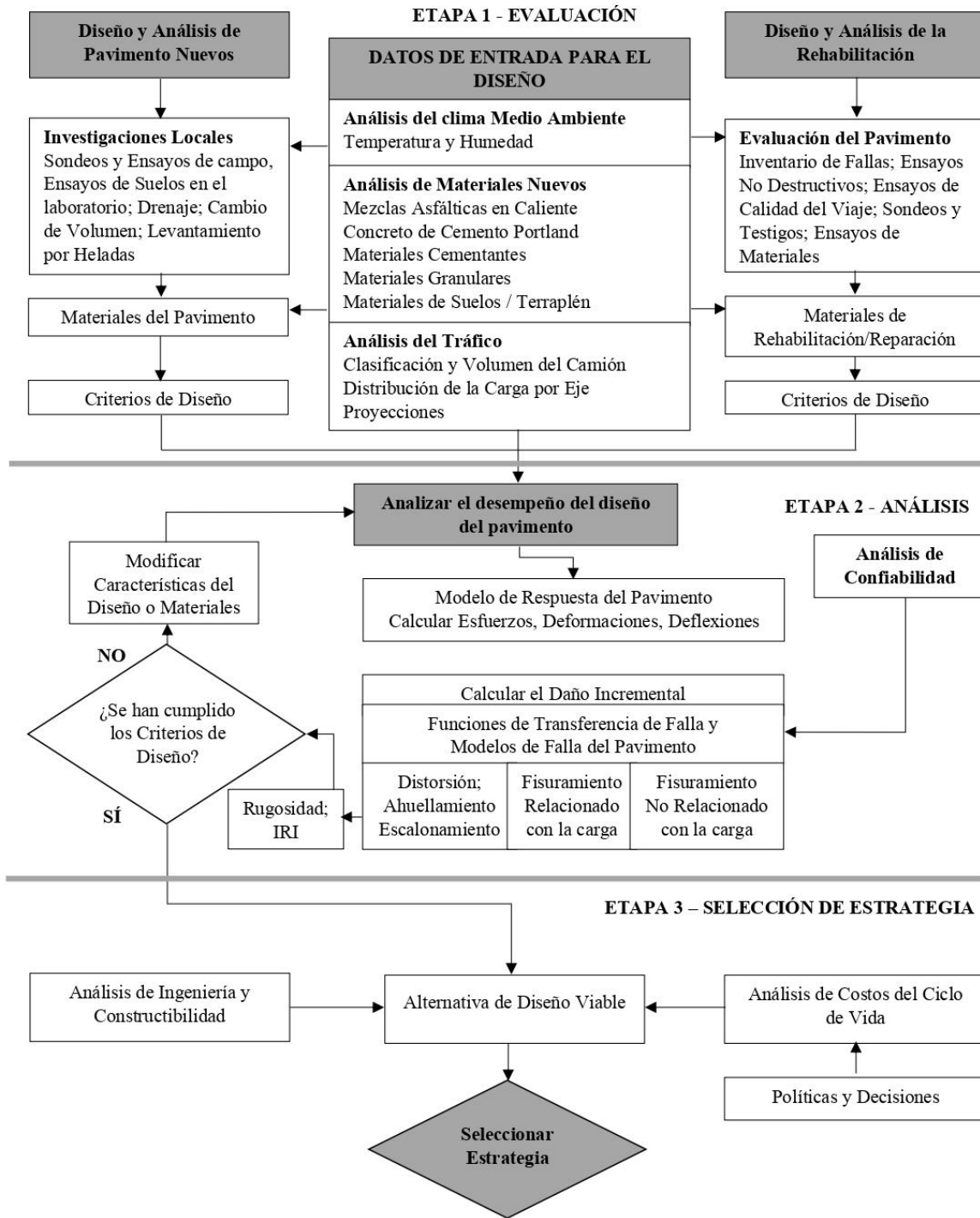


Figura 3. Diagrama del proceso de Diseño y Análisis en pavimentos mediante el enfoque MEPDG.

Adaptado de "Guía de Diseño Mecánico – Empírico de Pavimentos", por AASHTO, 2015.

2.4.2. Niveles jerárquicos de datos de entrada

Los parámetros de entrada requeridos para el diseño de pavimentos se obtienen a partir del análisis de la cimentación o del suelo de fundación, de la caracterización de los materiales, de las condiciones ambientales (clima) y del tránsito. De acuerdo con la metodología MEPDG (AASHTO, 2015), es posible jerarquizar la obtención de estos datos de entrada en tres niveles, con la finalidad de organizar y estructurar la información para el análisis en el software *AASHTOWare Pavement ME Design*. No obstante, el proceso de diseño permite obtener datos mediante una combinación de los tres niveles, los cuales se describen a continuación.

Por un lado, en el nivel de entrada 1, los datos se obtienen a partir de mediciones directas realizadas en el lugar de estudio para el proyecto; por ello, constituyen el conocimiento más preciso sobre las variables de entrada de un proyecto, lo que se traduce en un nivel más bajo de incertidumbre. Sin embargo, requiere mayores recursos y tiempo en cuanto a la recopilación de información y pruebas en comparación con los otros dos niveles.

Por otro lado, en el nivel 2, las variables de entrada se estiman mediante ecuaciones de regresión o de correlación. Los datos de entrada que se determinan en este nivel son aquellos que resultan más económicos de medir o los que se calculan para variables específicas. Dado que otorga un nivel de seguridad intermedio, solo debería utilizarse cuando no se cuente con los medios o equipamiento requeridos para realizar los ensayos solicitados en el nivel 1.

Finalmente, en el nivel 3, los datos de entrada consisten en resultados cualitativos o numéricos por defecto o aproximados, fundamentados en valores regionales o globales predeterminados. Este nivel representa el menor nivel de información sobre las variables iniciales para el diseño del pavimento; no obstante, presenta la ventaja de reducir los costos de ensayos de laboratorio y de recolección de datos. Además, podría usarse para diseñar en lugares donde los

riesgos de que se produzca una falla temprana sean mínimos. En la Tabla 2, se presentan los niveles de entrada típicos para cada parámetro requerido por los modelos de diseño de pavimentos en el software *AASHTOWare Pavement ME Design*.

Tabla 2. Niveles de entrada para la recalibración de las variables de ingreso.

Grupo de Entrada	Parámetros de Entrada	Nivel de Entrada usado para la Recalibración
Tráfico de camiones	Distribuciones de Carga por Eje (simple, tándem, tridem)	Nivel 1
	Distribución de Volumen de Camión	Nivel 1
	Distribución del carril y Direccional del Camión	Nivel 1
	Presión de los Neumáticos	Nivel 3
	Configuración del Eje, Espaciamiento entre los neumáticos	Nivel 3
	Zigzagado del Camión	Nivel 3
Climas	Temperatura, Velocidad del viento, Nubosidad, Precipitación, Humedad relativa	Estaciones Meteorológicas de Nivel 1
Capas Granulares y Subrasante	Módulo Resiliente - Todas las Capas no tratadas	Nivel 1; Retro cálculo
	Clasificación y Propiedades Volumétricas	Nivel 1
	Relaciones Humedad - Densidad	Nivel 1
	Relaciones respecto al suelo - agua	Nivel 3
	Conductividad Hidráulica Saturada	Nivel 3
	Módulo Dinámico de HMA	Nivel 3
Propiedades de los Materiales	Comportamiento de Fluencia Lenta y Resistencia a la Tracción Indirecta del HMA	Niveles 1, 2, y 3
	Propiedades Volumétricas	Nivel 1
	Coefficiente de Expansión Térmica del HMA	Nivel 3
	Módulo Elástico del PPC	Nivel 1
PPC	Resistencia a Flexión del PPC	Nivel 1
	Resistencia a la Tracción Indirecta del PPC (solo CRCP)	Nivel 2
	Coefficiente de Expansión Térmica del PPC	Nivel 1
	Peso Específico	Nivel 1
Todos los Materiales	Coefficiente de Poisson	Niveles 1 y 3
	Otras Propiedades Térmicas: conductividad, capacidad calorífica, absorción superficial	Nivel 3
	Estado de las Capas Existentes	Niveles 1 y 2

Nota. Tomado de “Guía de Diseño Mecánico – Empírico de Pavimentos”, por AASHTO, 2015.

2.4.3. Parámetros de diseño

Los parámetros de diseño de pavimentos según el MEPDG son cuatro (AASHTO, 2015): caracterización del suelo de cimentación, caracterización de los materiales, condiciones ambientales (clima) y tránsito.

Caracterización del suelo de cimentación

Un paso primordial previo al diseño de pavimentos nuevos es la caracterización de la cimentación, que consiste en determinar el módulo resiliente del suelo natural (subrasante) y realizar una evaluación del suelo. En dicha evaluación, se determina el potencial de expansión y/o contracción de suelos que presentan un alto valor de plasticidad, el desgaste por hinchamiento y descongelamiento en los suelos vulnerables, y problemas de drenaje. En ese sentido, primero se realiza una investigación subterránea y luego, experimentos de suelos tanto en el laboratorio como in situ (AASHTO, 2015).

Por un lado, las investigaciones subterráneas tienen como objetivo determinar la variabilidad horizontal y vertical de los tipos de suelo en el subsuelo, así como el porcentaje de humedad, las densidades, el nivel freático y la ubicación de los estratos rocosos. Asimismo, permiten evaluar la susceptibilidad de los suelos a las heladas, verificar si se trata de suelos expansivos y hallar el flujo del agua. El número de perforaciones para la investigación depende de la ubicación, la profundidad y el espesor de los principales estratos de suelo o roca donde sea necesario mejorar los cimientos; de lo contrario, puede producirse una disminución en la vida útil del pavimento. Según la metodología propuesta por AASHTO (2015), se siguen los siguientes pasos para realizar una investigación adecuada para la caracterización del cimiento. Primero, elaborar un plan de diseño de perforaciones y muestreos con el fin de conocer el perfil del subsuelo, tanto horizontal como verticalmente. Segundo, investigar el suelo desde una perspectiva topográfica y luego determinar

la cantidad de muestras (alteradas e inalteradas) necesarias para realizar las pruebas en el laboratorio. Dichas muestras permiten determinar la densidad y el módulo resiliente del suelo, por lo que deben tomarse con tubos de pared delgada, de modo que sea posible recuperarlas sin alterarlas. No obstante, es posible que no se puedan recuperar muestras inalteradas, por lo que pueden emplearse métodos de muestreo de barrena. Tercero, disponer de un plan de pruebas de laboratorio, para lo cual es esencial preparar y emplear registros de campo. Asimismo, se efectúan pruebas de campo para conocer las propiedades in situ de las capas del subsuelo, a partir de las cuales se pueden calcular la rigidez in situ y la relación de carga de California (CBR). El módulo in situ también puede estimarse empleando un penetrómetro de cono dinámico. Por último, se planifican las perforaciones que se llevarán a cabo a partir de los resultados de la investigación. A partir de las perforaciones, se miden la profundidad y espesor de los distintos estratos del suelo, profundidad de las capas rocosas, profundidad del nivel freático, y se estiman las condiciones que perjudicarán la construcción y el desempeño del pavimento.

Por otro lado, se realizan ensayos de suelos en el laboratorio y en campo con fines de diseño de pavimentos para determinar propiedades fundamentales, las cuales se basan en ensayos de clasificación, de resistencia y volumétricos. En primer lugar, los ensayos de clasificación se realizan para calcular la susceptibilidad del suelo a las heladas, evaluar el potencial de hinchamiento y el de drenaje (para la subrasante). El análisis de tamiz y los límites de Atterberg son ensayos que se realizan para clasificar la subrasante o la cimentación. En la Tabla 3, se muestran las características del suelo como material del pavimento. En segundo lugar, las pruebas volumétricas permiten determinar la densidad seca y el contenido de humedad de muestras inalteradas. Sin embargo, si no es factible obtener una muestra inalterada, se pueden emplear muestras alteradas para medir el contenido de humedad durante la perforación, siguiendo los

lineamientos de AASHTO T265. Finalmente, los ensayos de resistencia facilitan el cálculo de los módulos de los suelos de cimentación en zonas donde no se debe trabajar durante la construcción. El módulo de resiliencia de los suelos puede determinarse mediante el uso del penetrómetro de cono dinámico y de las propiedades físicas de las capas del suelo, pero también es factible calcularlo empleando el procedimiento propuesto por AASHTO T307 o el NNCHRP Project 1-28A(31).

Tabla 3. Características del suelo como material para el pavimento.

Divisiones Principales	Nombre	Resistencia cuando no está sujeta a la acción de la helada	Acción potencial de la helada	Comprensibilidad y expansión	Características de drenaje
Gravas y suelos con grava	Gravas bien graduadas o mezclas de grava y arena, poco a nada de finos; GW	Excelente	Ninguno a muy leve	Casi ninguno	Excelente
	Gravas pobremente graduadas o mezclas de grava y arena, poco o nada de finos; GP	Buena a Excelente	Ninguno a muy leve	Casi ninguno	Excelente
	Gravas limosas, mezclas de limo grava y arena; GM	Buena a Excelente	Leve a mediano	Muy Leve	Regular a pobre
	Gravas muy limosas, mezclas de limo grava y arena; GM	Buena	Leve a mediano	Leve	Pobre a prácticamente impermeable
	Gravas arcillosas, mezclas de limo, grava y arena; GC	Buena	Leve a mediano	Leve	Pobre a prácticamente impermeable
Arena y suelos arenosos	Arenas bien graduadas o arenas de grava, poco o nada de finos; SW	Buena	Ninguno a muy leve	Casi ninguno	Excelente
	Arenas pobremente graduadas o arenas de grava. Poco o nada de finos; SP	Regular a Buena	Ninguno a muy leve	Casi ninguno	Excelente
	Arenas limosas, mezclas de arena y limo; SP	Regular a Buena	Leve a alto	Muy Leve	Regular a pobre
	Arenas limosas, mezclas de arena y limo; SM	Regular	Leve a alto	Leve a mediano	Pobre a prácticamente impermeable
	Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla; SC	Pobre a Regular	Leve a alto	Leve a mediano	Pobre a prácticamente impermeable

Divisiones Principales	Nombre	Resistencia cuando no está sujeta a la acción de la helada	Acción potencial de la helada	Comprensibilidad y expansión	Características de drenaje
Limos y arcillas con el límite Líquido menor a 50	Limos inorgánicos y arena muy fina, polvo de roca, arena fina limosa o arcillosa o limos arcillosos con leve plasticidad	Pobre a Regular	Mediano a muy alto	Leve a mediano	Regular a pobre
	Arcillas inorgánicas de baja a mediana plasticidad, arcillas de grava, arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas simples	Pobre a Regular	Mediano a muy alto	Leve a mediano	Prácticamente impermeable
	Limos orgánicos y arcilla y limo orgánico o de plasticidad baja	Pobre	Mediano a muy alto	Mediano a alto	Pobre
Limos y arcillas con el límite Líquido mayor a 50	Limos inorgánicos, arena finicácea o diatomea o suelos limosos, limos elásticos	Pobre	Mediano a muy alto	Alto	Regular a pobre
	Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas gruesas	Pobre a Regular	Mediano a muy alto	Alto	Prácticamente impermeable
	Arcillas orgánicas de mediana a alta plasticidad, limos orgánicos	Pobre a Muy Pobre	Mediano	Alto	Prácticamente impermeable
Suelos altamente orgánicos	Turba y otros suelos altamente orgánicos	No Adecuado	Leve	Muy alto	Regular a pobre

Nota. Tomado de “*Guía de Diseño Mecánico – Empírico de Pavimentos*”, por AASHTO, 2015

Caracterización de los materiales

Según la Guía MEPDG (AASHTO, 2015), las propiedades de las nuevas capas de pavimentación se determinan, para la mayoría de los materiales, empleando niveles jerárquicos de entrada 2 o 3, debido a que usualmente no se cuenta con instalaciones de prueba necesarias para la caracterización de materiales. Sin embargo, es necesario señalar que la guía MEPDG plantea combinaciones de niveles de entrada de los materiales, donde también se requieren niveles de entrada 1. En las siguientes tablas, se detallan los parámetros de entrada requeridos para el diseño de pavimentos rígidos empleando concreto Portland (PPC), capas de base tratadas con cemento y concretos de baja resistencia. La Tabla 4 muestra las variables de entrada para caracterizar el PPC correspondientes al nivel 1, así como los protocolos que se siguen para el diseño de pavimentos nuevos y existentes. Asimismo, la Tabla 5 señala los parámetros y valores de entrada

recomendados por la MEPDG 2015 para ejecutar ensayos con material de PPC (Niveles de entrada 2 o 3).

Tabla 4. Variables de entrada y protocolos de ensayo para pavimentos nuevos y existentes.

Tipo de diseño	Propiedad Medida	Fuente de datos		Protocolo de Ensayo Recomendado y/o Fuente de Datos
		Ensayo	Estimado	
Pavimentos nuevos y reforzados de PCC y pavimentos de PCC existente sujetos a una recapa adherida de PCC	Modulo elástico	x		ASTM C469
	Coefficiente de Poisson	x		ASTM C469
	Resistencia a la flexión	x		AASHTO T 97
	Resistencia a la tracción indirecta (solo CRCP)	x		AASHTO T 198
	Peso específico	x		AASHTO T 121
	Contenido de aire	x		AASHTO T 152 o T 196
	Coefficiente de expansión térmica	x		AASHTO T 336
	Absorción de onda corta superficial		x	Utilizar el valor por defecto de AASHTOWare Pavement ME Design
	Conductividad térmica	x		ASTM E1952 (o utilizar el valor por defecto de AASHTOWare Pavement ME Design)
	Capacidad Calorífica	x		ASTM E2766 (o utilizar el valor por defecto de AASHTOWare Pavement ME Design)
	Temperatura de cero esfuerzo PCC		x	Protocolo nacional de ensayo no disponible. Estimar utilizando datos históricos de agencia o seleccionar los valores por defecto del AASHTOWare Pavement ME Design
	Tipo de cemento		x	Seleccionar en función a la fuente de cemento actual o esperado
	Contenido de cemento		x	Seleccionar en función al diseño de mezcla de concreto actual o esperado
	Relación agua -cemento		x	Seleccionar en función al diseño de mezcla de concreto actual o esperado
	Tipo de agregado		x	Seleccionar en función a la fuente de agregado actual o esperado
	Método de curado		x	Seleccionar en función a recomendaciones y prácticas de la agencia
	Retracción última		x	Ensayo no práctico. Estimaciones utilizando la ecuación de predicción del AASHTOWare Pavement ME Design
	Retracción Reversible		x	Estimar utilizando datos históricos de la agencia o seleccionar valores por defecto de AASHTOWare Pavement ME Design
	Tiempo para desarrollar 50 por ciento de la última refracción		x	Estimar utilizando datos históricos de la agencia o seleccionar valores por defecto de AASHTOWare Pavement ME Design

Tipo de diseño	Propiedad Medida	Fuente de datos		Protocolo de Ensayo Recomendado y/o Fuente de Datos
		Ensayo	Estimado	
PCC existente fracturable e intacto	Módulo elástico		x	ASTM C 469 (núcleos extraídos)
			x	AASHTO T 256 (ensayo de deflexión no destructivo)
	Coefficiente de Poisson		x	ASTM C469 (núcleos extraídos)
	Resistencia a la flexión		x	AASHTO T 97 (núcleos extraídos)
	Peso específico		x	AASHTO T 121 (núcleos extraídos)
	Absorción de onda corta superficial		x	Protocolo nacional no disponible. Utilizar valores por defecto del AASHTOWare Pavement ME Desing
	Conductividad térmica	x		ASTM E1 952 (núcleos extraídos)
Capacidad Calorífica	x		ASTM D2766 (núcleos extraídos)	

Nota. Tomado de “Guía de Diseño Mecánico – Empírico de Pavimentos”, por AASHTO, 2015.

Tabla 5. Parámetros de entrada recomendados para ejecutar ensayos para materiales de PPC.

Propiedad Medida	Niveles de entrada 2 y 3 recomendados	
Nuevo módulo elástico de PCC y resistencia a la flexión	Resistencia a la flexión de 28 días y módulo elástico de PCC de 28 días	
	Resistencia a la compresión de 28 días módulo elástico clásico PCC de 28 días	
	Resistencia SOLO a flexión de 28 días	
	Resistencia SOLO a la compresión de 28 días	
	Según la condición del pavimento, seleccionar los valores típicos del módulo del siguiente rango de valores dados:	
Modulo elástico de PCC intacto existente	Descripción cualitativa del estado del pavimento	Rangos del módulo típico, psi
	Adecuado	3 a 4 x 10 ⁶
	Marginal	1 a 3 x 10 ⁶
	Inadecuado	0.3 a 1 x 10 ⁶
Modulo clásico de PCC fracturado	Los tres métodos comunes para fracturar losas PCC incluyen y asentar, romper y asentar, y triturar el pavimento En términos de caracterización de materiales; las capas de PCC partidas o rotas y asentadas se consideran una categoría separada de las capas trituradas En el nivel 37 se pueden adoptar los valores del módulo típicos para el diseño (ver debajo):	
	Tipo de capa de PCC fracturado	Rangos del módulo típico, psi
	Partir y asentar o romper y asentar	3 a 4 x 10 ⁶
	Marginal	1 a 3 x 10 ⁶

Propiedad Medida**Niveles de entrada 2 y 3 recomendados**

El coeficiente de Poisson para PCC nuevos típicamente varía entre 0.10 y 0.21 y los valores de 0.20, 0.15 y 0.18 son típicamente asumidos para el diseño de PCC. Ver debajo los valores típicos del coeficiente de Poisson para materiales de PCC.

Coeficiente de Poisson

Materiales de PCC	Nivel 3, típico
Losas de PCC (nuevas o ya existentes)	0.20
Losa Fracturada	
Partir/Asentar	0.20
Romper/Asentar	0.20
Triturado	0.20

Peso específico

Seleccionar los datos históricos de la agencia del rango típico para peso normal de concreto: 140 a 160 lb/ft³.

Coeficiente de expansión térmica

Seleccionar los valores de la agencia o los valores típicos basados en el tipo de agregado grueso de PCC

Tipos de Agregado	Coeficiente de expansión térmica (10⁻⁶)
Andesita	5.3
Basalto	5.2
Diabasa	4.6
Gabro	5.3
Granito	5.8
Esquisto	5.6
Pedernal	6.6
Dolonia	5.8
Caliza	5.4
Cuarcita	6.2
Arenisca	6.1
Esquisto expandido	5.7

Donde el tipo de agregado grueso es desconocido, utilizar el valor por defecto del AASHTO Ware Pavement ME Design de 5.5*10A-6/OF

Absorción de onda corta superficial

Utilizar el nivel 3 del valor por defecto de 0.85 del AASHTO Ware Pavement ME design

Capacidad térmica

Valores típicos para el rango de concreto asfáltico de 0.2 a 2.0 BTU/(pie)³*(h)²*(OF). Utilizar el valor por defecto configurado en el programa: 1.25 BTU/(pies)³*(h)²*(OF)

Capacidad calorífica

Valores típicos para el rango de concreto asfáltico de 0.1 a 0.50 BTU/(pie)³*(h)²*(OF). Utilizar el valor por defecto configurado en el programa: 0.28 BTU/lb-OF

Nota. Tomado de “Guía de Diseño Mecánico – Empírico de Pavimentos”, por AASHTO, 2015.

Condiciones climáticas

Los datos de entrada que consideran los parámetros climáticos son indispensables para evaluar el desempeño y predecir el deterioro de los pavimentos a lo largo de su vida útil. Según el MEPDG (AASHTO, 2015), los datos climáticos requeridos para el diseño y que forman el modelo climático denominado *Enhanced Integrated Climatic Model* (EICM) internamente son la temperatura, la velocidad del viento, la humedad relativa, la precipitación y la nubosidad en frecuencia horaria. Por ello, la Guía MEPDG 2015 recomienda utilizar diferentes estaciones meteorológicas para estimar estas variables cuando existan errores en la base de datos de una estación específica o falten datos.

El software AASHTOWare Pavement ME Design integra una amplia base de datos climáticos de estaciones meteorológicas de Estados Unidos y Canadá. Adicionalmente, el programa permite crear una estación meteorológica virtual basada en la realidad geográfica del proyecto.

Tránsito de camiones

La Guía MEPDG analiza el daño que ocasiona cada vehículo empleando un espectro de carga que varía según el tipo de eje, lo cual difiere del AASTHO 93, pues en este último se trabaja con números de ejes equivalentes (ESAL). Por ello, el tránsito de camiones es un parámetro fundamental en el análisis y el diseño de pavimentos. Los datos de pesaje en movimiento (WIM) permiten determinar los espectros de carga por eje, los cuales se obtienen tras procesar la información obtenida.

En la Tabla 6 y Tabla 7 se recomienda el tamaño mínimo de las muestras que se requieren para determinar las distribuciones normalizadas de carga por eje y las distribuciones normalizadas

de tráfico del camión, a partir del error estándar que se busca obtener y del nivel de confianza. Es indispensable conocer las siguientes consideraciones para el uso de estas tablas: requiere que se realicen mediciones continuamente; si se requiere la diferencia de volumen de camiones entre semana y fines de semana, se realizan mediciones todos los días de la semana; y la temporada que usa el software AASHTOWare Pavement ME Design es diferente al de la Tabla 7, pues esta última se basa en patrones de camión variantes para calcular la confianza y el error estándar de la distribución de volumen normalizada de camiones.

Tabla 6. Número mínimo de días por año (tamaño de la muestra) de datos WIM para estimar la distribución normalizada de la carga por eje.

Error Estándar (±%)	Nivel de confianza o Relevancia %				
	80	90	95	97.5	99
20	1	1	1	1	1
10	1	1	2	2	3
5	2	3	5	7	10
2	8	19	30	43	61
1	32	74	122	172	242

Nota. Tomado de “Guía de Diseño Mecánico – Empírico de Pavimentos”, por AASHTO, 2015.

Tabla 7. Mínimo número de días por estación (tamaño de muestra) de datos AVC para estimar la distribución normalizada del tráfico de camiones.

Error Estándar (±%)	Nivel de confianza o Relevancia %				
	80	90	95	97.5	99
20	1	1	1	2	2
10	1	2	3	5	6
5	3	8	12	17	24
2	20	45	74	105	148
1	78	180	295	Nota 1	Nota 1

Nota. Tomado de “Guía de Diseño Mecánico – Empírico de Pavimentos”, por AASHTO, 2015.

Según AASHTO (2015), los parámetros de entrada respecto al tráfico que requiere el MEPDG se dividen en tres grandes grupos: datos propios de la carretera, datos extraídos de las estaciones de pesaje WIM (*Weighing in Motion*) y datos no incluidos en la base de datos WIM.

En primer lugar, las variables de entrada, características de la carretera, son aquellos datos específicamente locales, por lo que deben ser adquiridos del departamento de tránsito o de planificación: tráfico promedio diario anual inicial de camiones (AADTT), porcentaje de camiones en el carril de diseño, porcentaje de camiones en dirección del diseño, velocidad de operación y crecimiento del tránsito de camiones (AASHTO, 2015). Primero, el AADTT es la media del tránsito de camiones en vías de dos sentidos entre los días hábiles y los fines de semana, la cual se obtiene mediante contadores automáticos o manuales de vehículos o mediante el procesamiento de datos WIM. Es importante señalar que se debe diseñar ingresando un valor representativo para ambas direcciones de todos los carriles, por lo que, si solo se ingresa un valor en un solo sentido, es necesario colocar 100% como el porcentaje de camiones correspondiente a la dirección de diseño. Segundo, el porcentaje de camiones en el carril de diseño se estima mediante la relación entre el tránsito de camiones en el carril de diseño y el tránsito total de camiones en una dirección. Sin embargo, para el software *AASHTOWare Pavement ME Design*, este parámetro depende del tipo de camión y de la clase más predominante, por lo que puede hallarse a partir de datos de conteo manual de vehículos o de las estaciones de AVC (Clasificador Automático de Vehículos). Tercero, el porcentaje de camiones en la dirección donde se realiza el diseño es el porcentaje de camiones que circulan por la calzada en ambas direcciones. De la misma forma que la variable anterior, se puede determinar mediante un conteo manual de vehículos o a partir de los datos de AVC. Cuarto, la velocidad de operación es la velocidad límite mínima que puede alcanzar un camión. De acuerdo con los daños incrementales calculados por el *AASHTOWare Pavement ME Design*, las velocidades más bajas generan mayores daños, por lo que esta variable se emplea en la evaluación de diseños de prueba, con excepción de áreas especiales que presentan baja velocidad, pendiente pronunciada o una parada de autobús. Finalmente, el crecimiento del tránsito

de camiones es difícil de estimar, pues no es posible hacer pronósticos con mucha exactitud. Este valor puede hallarse mediante consultorías a los departamentos de tránsito y planificación del lugar a estudiar. No obstante, el *AASHTOWare Pavement ME Design* puede pronosticar este dato, pues emplea razones de crecimiento constantes (tasa independiente del transcurso del tiempo) para los distintos tipos de camiones.

En segundo lugar, los parámetros de entrada obtenidos de las estaciones de pesaje WIM (*Weighing in Motion*) necesarios para ejecutar el software mencionado anteriormente son: distribución de carga por eje, distribución de volumen de camión normalizado, configuración de carga por eje, factores de distribución mensuales y factores de distribución por horario (AASHTO, 2015). El primero consta de una gran cantidad de datos, por lo que su procesamiento se realiza de forma externa al software; sin embargo, existen otros programas para procesar datos de distribuciones de carga por eje. El segundo suele requerirse cuando no se tienen datos WIM o su disponibilidad es limitada. Este parámetro considera el porcentaje de cada tipo de camión en la distribución del tráfico de camiones, determinado tras analizar los datos de AVC de varios años. La distribución mencionada depende de los diferentes grupos de la Clasificación de Tránsito de Camiones (TTC) y de los volúmenes de camiones. En ese sentido, en las Tablas 9 y 10 se pueden observar, con más detalle, las distribuciones a considerar para la clasificación del tránsito de camiones según sus características. El tercero está relacionado con el espacio y la distancia entre ejes y se determina a partir de los datos WIM. Las distancias para los tipos de ejes empleados durante el proceso de calibración son las siguientes: para los ejes tándem, 51.6 in; para los trídems, 49.2 in; y para los cuádruples, 49.2 in. El cuarto se emplea para distribuir el tráfico de camiones a lo largo del año, considerando cada tipo de camión, pero usualmente se usan valores de 1.0 durante el periodo de calibración. Finalmente, el factor de distribución por hora permite asignar todo el

tránsito de camiones a un día común. Dicho factor por hora se puede determinar empleando datos WIM, AVC o conteo de tráfico manual. Es importante señalar que este parámetro solo se requiere para analizar y diseñar un pavimento rígido, ya que permite relacionar el volumen de camiones que transitan en una hora con los gradientes de temperatura de la losa de concreto.

Tabla 8. Descripción de la Clasificación de Tránsito de Camiones (TTC) y distribución de las clases de camiones incluidos en el software de diseño AASHTOWare Pavement ME Design.

Descripción y Grupo TTC	Distribución de las Clases de Camiones (%)										
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
1 Ruta principal de camiones con remolque simple (tipo I)	1.3	8.5	2.8	0.3	7.6	74	1.2	3.4	0.6	0.3	
2 Ruta principal de camiones con remolque simple (tipo II)	2.4	14.1	4.5	0.7	7.9	66.3	1.4	2.2	0.3	0.2	
3 Ruta principal de camiones con remolque simple (tipo I)	0.9	11.6	3.6	0.2	6.7	62	4.8	2.6	1.4	6.2	
4 Ruta principal de camiones con remolque simple (tipo III)	2.4	22.7	5.7	1.4	8.1	55.5	1.7	2.2	0.2	0.4	
5 Ruta principal de camiones con remolques simples o múltiples (tipo II)	0.9	14.2	3.5	0.6	6.9	54	5	2.7	1.2	11	
6 Ruta intermedia de camiones con remolque simple y liviano (tipo I)	2.8	31	7.3	0.8	9.3	44.8	2.3	1	0.4	0.3	
7 Ruta principal de camiones mezclados (tipo I)	1	23.8	4.2	0.5	10.2	42.4	5.8	2.6	1.3	8.4	
8 Ruta principal de camiones con remolques múltiples (tipo I)	1.7	19.3	4.6	0.9	6.7	44.8	6	2.6	1.6	11.8	
9 Ruta intermedia de camiones con remolque simple y liviano (tipo II)	3.3	34	11.7	1.6	9.9	36.2	1	1.8	0.2	0.3	
10 Ruta principal de camiones mezclados (tipo II)	0.8	30.8	6.9	0.1	7.8	37.5	3.7	1.2	4.5	6.7	
11 Ruta principal de camiones con remolques múltiples (tipo II)	1.8	24.6	7.6	0.5	5	31.3	9.8	0.8	3.3	15.3	
12 Ruta intermedia de camiones con remolque simple y liviano (tipo III)	3.9	40.8	11.7	1.5	12.2	25	2.7	0.6	0.3	1.3	
13 Ruta principal de camiones mezclados (tipo III)	0.8	33.6	6.2	0.1	7.9	26	10.5	1.4	3.2	10.3	
14 Ruta principal de camiones livianos (tipo I)	2.9	56.9	10.4	3.7	9.2	15.3	0.6	0.3	0.4	0.3	
15 Ruta principal de camiones livianos (tipo II)	1.8	56.5	8.5	1.8	6.2	14.1	5.4	0	0	5.7	
16 Ruta principal de camiones con remolques múltiples livianos	1.3	48.4	10.8	1.9	6.7	13.4	4.3	0.5	0.1	12.6	
17 Ruta principal de autobuses	36.2	14.6	13.4	0.5	14.6	17.8	0.5	0.8	0.1	1.5	

Nota. Tomado de “Guía de Diseño Mecánico – Empírico de Pavimentos”, por AASHTO, 2015.

Tabla 9. Descripciones de los grupos TTC.

Buses en el flujo de tránsito	Productos siendo transportados por el tipo de camión		Grupo TTC N°
	Camión con múltiples remolques	Camiones con remolque simple y unidad simple	
Bajo a Ninguno (<2%)	Cantidad relativamente alta de camiones con remolque múltiple (>10%)	Predominantemente camiones con remolque simple	5
		Alto porcentaje de camiones con remolque simple, pero pocos camiones de unidad simple	8
		Tránsito de camiones mezclados con un porcentaje mayor de camiones con remolque simple	11
		Tránsito de camiones mezclados con porcentajes iguales de camiones de unidad simple y remolque simple	13
		Predominantemente camiones de unidad simple	16
	Cantidad moderada de camiones con remolque múltiple (2 a 10%)	Predominantemente camiones de unidad simple	3
		Tránsito de camiones mezclados con un porcentaje mayor de camiones con remolque simple	7
		Tránsito de camiones mezclados con porcentajes iguales de camiones de unidad simple y remolque simple	10
		Predominantemente camiones de unidad simple	15
		Bajo a Moderado Bajo a Ninguno (<2%)	Bajo a Ninguno (<2%)
Predominantemente camiones de remolque simple, pero con un bajo porcentaje de camiones de unidad simple	2		
Predominantemente camiones de remolque simple, pero con una baja a moderada porcentaje de camiones de unidad simple	4		
Tránsito de camiones mezclado con un porcentaje mayor de camiones con remolque simple	6		
Tránsito de camiones mezclados con porcentajes iguales de camiones con unidad simple y remolque simple	9		
Tránsito de camiones mezclado con un porcentaje mayor de camiones con unidad simple	12		
Predominantemente camiones con unidad simple	14		
Ruta principal de buses (>25%)	Bajo a Ninguno (<2%)	Tránsito de camiones mezclados con porcentajes iguales de camiones de unidad simple y remolque simple	17

Nota. Tomado de “Guía de Diseño Mecánico – Empírico de Pavimentos”, por AASHTO, 2015.

Por último, los datos de entrada no contenidos en las estaciones de pesaje WIM son datos que se requieren para ejecutar el software *AASHTOWare Pavement ME Design*, pero que no se pueden obtener de los datos WIM. Primero, el espaciado entre llantas duales es de 12 in como valor predeterminado, pues los neumáticos de la mayoría de los camiones son duales. Sin embargo,

si se tiene otro tipo de camión predominante, se recomienda modificar este valor en el programa, ya sea aumentando el espacio entre llantas o simulando neumáticos simples. Segundo, respecto a la presión de las llantas, el software asume una presión uniforme para todos los camiones, por lo que se usan valores de 10 in al realizar los esfuerzos de calibración. La guía MEPDG señala que, para anchos de carril menores a 10 ft, se sugiere usar 8 in como valor para el desplazamiento lateral, mientras que, para anchos de carril mayores a 12 ft, se sugiere usar 12 in. Finalmente, el espacio entre los ejes del camión, distancia entre el eje delantero y el posterior, se divide en tres categorías: cortas (12 ft), medianas (15 ft) y largas (18 ft).

En la Figura 4 se presenta, de manera resumida, los datos de entrada requeridos para el diseño de pavimentos nuevos respecto al tránsito.



Figura 4. Esquema de datos de tránsitos de camiones.

Equivalencias de camiones de la FHWA y RNV

La caracterización del tránsito vehicular propuesta por la AASHTO se fundamenta en los criterios de clasificación vehicular de la FHWA (Administración Federal de Carreteras de Estados Unidos). No obstante, dicha clasificación difiere de lo establecido en el RNV (Reglamento Nacional de Vehículos), por lo que Menéndez (2016) plantea una equivalencia entre ambos sistemas de clasificación. La clasificación de la FHWA presenta un total de 13 tipos de vehículos pesados, mientras que el RNV agrupa al tránsito en 40 clases vehiculares. En la Figura 5, se presenta la clasificación de vehículos por la FHWA y en la Tabla 10, se muestra la equivalencia de cargas entre ambos sistemas, de acuerdo con la propuesta de Menéndez (2016).

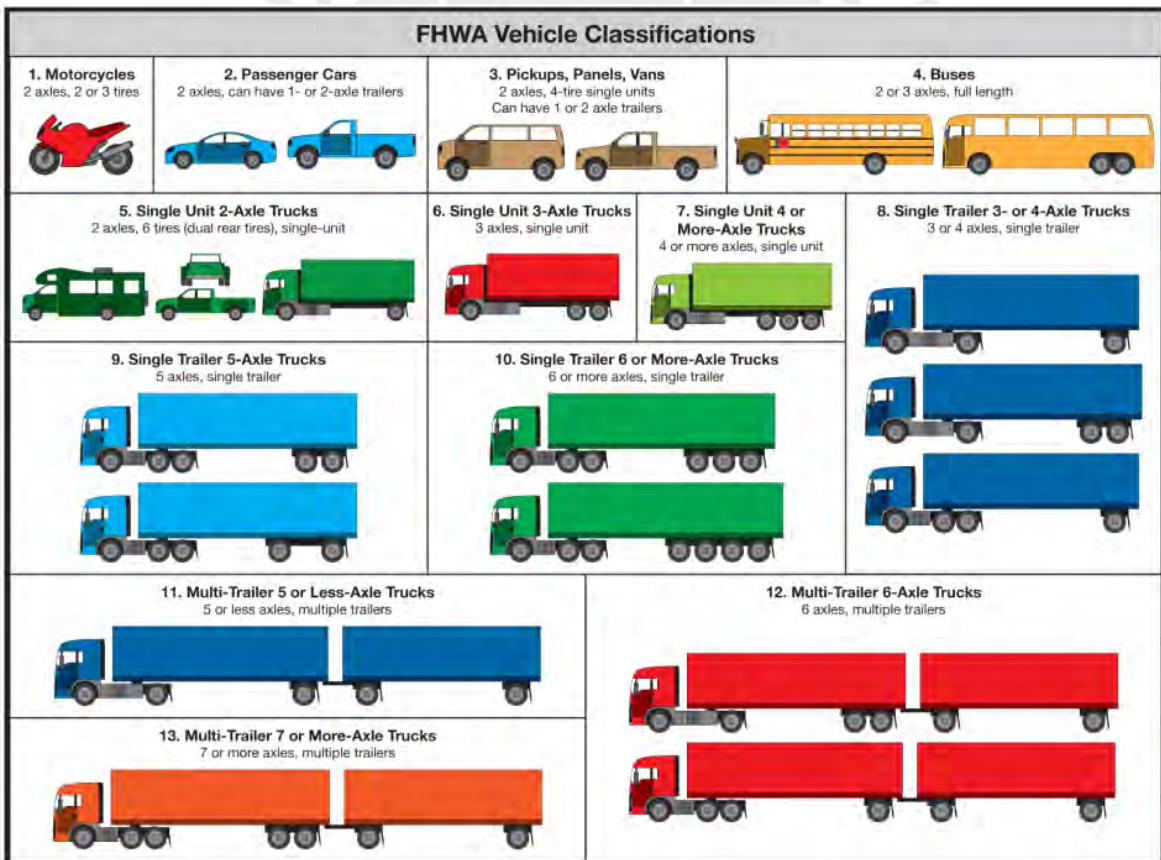


Figura 5. Clasificación de vehículos FHWA. Adaptado de “Guía de Diseño Mecánico – Empírico de Pavimentos”, por AASHTO, 2015.

Tabla 10. Equivalencia de clasificación de vehículos del Reglamento Nacional de Vehículos y el FHWA

Clasificación del FHWA		Clasificación del RNV
Clase	Descripción	Clase
1	Motocicleta: 2 ejes, 2 0 3 llantas	Motocicleta, mototaxi
2	Carros: 2 ejes, pueden tener 1 o 2 ejes remolques	Auto, station wagon
3	Camionetas, furgonetas, paneles: 2 ejes y 4 ruedas individuales, pueden tener 1 o 2 ejes remolque	Camionetas, combies, vans
4	Buses: 2 0 3 ejes	B2, B3-1, B4-1, BA-1
5	Una sola unidad de camiones de 2 ejes	C2
6	Una sola unidad de camiones de 3 ejes	C3
7	Una sola unidad de camiones de 4 o más ejes	C4, 8X4
8	Remolque único de camión de 3 o 4 ejes	T2S1, T2S2, T2se2, T3S1
9	Remolque único de camión de 5 ejes	T2S3, T2se3, T3S2, T3se2
10	Remolque único de camión de 6 o más ejes	T3S3, T3se3
11	Múltiples remolques de camiones de 5 o menos ejes	C2R2, C2R3, C3R2, 8X4R2, C2RB1, C2RB2, C3RB1, C3RB2, C4RB1, 8X4RB1
12	Múltiples remolques de camiones de 6 ejes	C3R3, C3R4, C4R2, C4RB2, 8X4RB2
13	Múltiples remolques de camiones de 7 o más ejes	C4R3, 8X4R3, 8X4R4, T3S2S2, T3se2se2, T3S2SIS2, T3se2S1se2

Nota. Tomado de “Ingeniería de Pavimentos”, por Menéndez, 2016.

2.4.4. Características y factores de diseño no considerados en el MEPDG

Según AASHTO (2015), existen algunas características y factores no incluidos en la metodología del MEPDG, donde no se han considerado ciertos modelos de predicción de deterioros, ya que no fue posible realizar una calibración por insuficiencia de datos, falta de base teórica para el modelado, entre otros. Cabe señalar que, si estos modelos se consideran indispensables, se debe realizar un trabajo adicional durante la calibración local para que los datos sean válidos para las condiciones bajo las cuales se usarán. Las consideraciones más destacadas que no se tomaron en cuenta son las que se describen con más detalle a continuación.

Primero, la fricción y el ruido no están incluidos entre las variables de análisis en el *AASHTOWare Pavement ME Design*, por lo que no puede predecir la pérdida de resistencia de la

superficie del pavimento al desplazamiento ni la reducción del ruido. Por ello, la persona responsable del diseño debe examinar los métodos históricos y poner en práctica su experiencia para evaluar la capacidad de la carpeta de rodadura para soportar los esfuerzos mínimos de deslizamiento y atenuar el ruido.

Segundo, respecto a los neumáticos simples y dobles, el software mencionado anteriormente asume que todos los ejes analizados del tráfico son duales, pero es posible simular ejes simples.

Tercero, la desintegración y resistencia de la mezcla de las capas del pavimento son otros factores no considerados en la metodología, pues no es posible conocer los problemas de desintegración que se puedan presentar en el concreto durante el vaciado en obra y la durabilidad de la mezcla. Asimismo, resulta complicado pronosticar la durabilidad de la mezcla durante la ejecución en obra, pues puede estar expuesta a diversos agentes ambientales. Para pavimentos de PPC, los problemas de durabilidad se pueden enfrentar mediante un diseño adecuado de mezclas con materiales específicos, según el proyecto, donde se modela empíricamente a partir de la relación agua/cemento, el contenido de aire, la resistencia, etc.

Cuarto, el *AASHTOWare Pavement ME Design* no analiza el cambio de volumen en suelos problemáticos; es decir, no le es posible pronosticar el potencial de cambio de volumen de suelos expuestos a heladas o de suelos arcillosos expansivos altamente plásticos. Para mitigarlo, se emplean técnicas de mejoramiento de la subrasante con el fin de reducir el impacto a lo largo de la vida útil de la superficie de rodadura.

Quinto, en cuanto a la base permeable tratada con asfalto (ATPB, por sus siglas en inglés), las superficies de las secciones de pavimento flexible no presentan un proceso de calibración adecuado, pues durante dicho proceso se considera una mayor cantidad de pavimentos rígidos que

flexibles para la calibración global. Asimismo, para la calibración se considera que la capa de asfalto presenta un alto porcentaje de vacíos, lo que implica una disminución considerable del ciclo de vida del pavimento flexible, ya que estará sometido a esfuerzos de fatiga constantes.

Finalmente, el programa de preservación de pavimentos es otro factor no considerado para predecir la durabilidad del pavimento diseñado en el software. No obstante, si se aplican tratamientos de conservación en las etapas tempranas de su vida útil, esta podría incrementarse. En ese sentido, se pueden establecer coeficientes de calibración locales para el agrietamiento de la estructura con o sin carga. En la Figura 6, se muestran las características y factores no considerados en la metodología del MEPDG 2015.



Figura 6. Características de diseño no incluidas en el MEPDG.

2.4.5. Indicadores de desempeño para pavimentos rígidos por AASHTOWare Pavement Me Design

Existen diferentes tipos de indicadores de desempeño para los pavimentos rígidos propuestos por la MEPDG AASTHO 2015, tales como la falla de junta transversal media, agrietamiento transversal de abajo hacia arriba, fisuramiento transversal de arriba hacia abajo y el punzonamiento en pavimentos de concreto continuamente reforzado (CRCP, por sus siglas en inglés) como se presenta en la Figura 7.

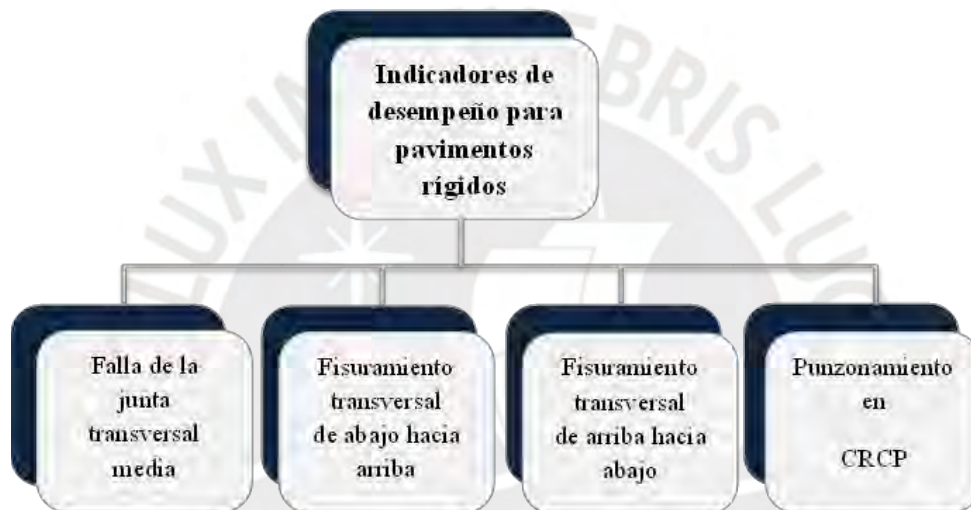


Figura 7. Indicadores de desempeño en pavimentos rígidos.

La falla de la junta transversal media se presenta como la variación de elevación entre dos caras de una misma junta, donde la distancia en la losa se estima a una distancia entre 1 a 3 pies (ft) de su borde externo. *AASHTOWare Pavement ME Design* permite predecir el escalonamiento medio en una determinada sección de análisis del pavimento para el total de las juntas transversales presentes, este calcula el promedio pues el escalonamiento varía entre junta y junta de manera significativa.

El fisuramiento transversal de abajo hacia arriba se produce cuando existe un gradiente de temperatura alto positivo en la losa, pero las zonas cercanas a la superficie externa están más

calientes en comparación a zonas con mayor profundidad. Ello genera que se incrementen los esfuerzos en la losa por las cargas repetidas de los camiones, lo cual ocasiona que en el borde inferior de la losa se produzcan deterioros por fatiga, generando así una grieta transversal a lo largo de la superficie del pavimento, *AASHTOWare Pavement ME Design* determina dicha falla como un porcentaje del número total de losas.

El fisuramiento transversal de arriba hacia abajo se produce cuando la losa presenta un gradiente de temperatura negativo elevado: las mayores temperaturas se encuentran en la parte inferior de la losa, mientras que en las más superficiales son más bajas. Debido a los esfuerzos a los que está sometida la estructura, se producen fallas transversales que se originan en la capa de rodadura del pavimento. La falla se estima de la misma forma que para el fisuramiento de abajo hacia arriba.

Finalmente, el punzonamiento en CRCP se debe a los grandes esfuerzos transversales en la parte superior de la losa cuando los ejes de los camiones transitan cerca del borde longitudinal de la losa. Este esfuerzo se incrementa considerablemente cuando se produce una pérdida en la transferencia de carga, lo que genera fisuras a lo largo de la losa.

2.4.6. Criterios de desempeño y confiabilidad de diseño

Por un lado, los criterios de desempeño son valores máximos que pueden tener cada indicador de deterioro para que el diseño de pavimento se comporta de manera eficaz a lo largo de su vida útil, sus valores son seleccionados por el diseñador (AASHTO, 2015). La Guía de Diseño recomienda los valores umbrales para cada indicador de desempeño según el tipo de carretera, cuyos valores se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11. Valores recomendados por la MEPDG para los criterios de desempeño

Tipo de Pavimento	Criterios de Desempeño	Valor Umbral al final de la Vida Útil de Diseño
JPCP	Escalonamiento promedio de la junta	Interestatal: 0.15 pulgadas Primaria: 0.20 pulgadas Secundaria: 0.25 pulgadas
	Porcentaje de fisuramiento transversal de la losa	Interestatal: 10% Primaria: 15% Secundaria: 20%
	IRI	Interestatal: 160 pulgadas/milla Primaria: 200 pulgadas/milla Secundaria: 200 pulgadas/milla

Nota. Tomado de “Guía de Diseño Mecánico – Empírico de Pavimentos”, por AASHTO, 2015.

Por otro lado, la confiabilidad se define como la probabilidad de que el daño en el pavimento durante el periodo de diseño sea inferior a un nivel crítico. El diseñador define el nivel de confiabilidad de cada indicador de desempeño según la clasificación de la vía. El MEPDG recomienda niveles de confiabilidad mínimos según el tipo de carretera, cuyos valores se muestra en la Tabla 12.

Tabla 12. Valores recomendados por la MEPDG para los niveles de confiabilidad.

Clasificación funcional	Nivel de confiabilidad	
	Urbano	Rural
Interestatal/Autopista	95	95
Arterias Principales	90	85
Colectores	80	75
Local	75	70

Nota. Tomado de “Guía de Diseño Mecánico – Empírico de Pavimentos”, por AASHTO, 2015.

2.5. Modelo climático integrado mejorado

Los efectos del clima son considerados en un modelo climático denominado *Enhanced Integrated Climatic Model* (EICM), es un programa unidimensional que permite modelar los gradientes de temperatura y humedad presentes en todas las capas estructurales que constituyen el

pavimento para evaluar el desempeño y predecir el deterioro de los pavimentos durante su vida útil.

Este modelo fue elaborado en 1989 por la Administración Federal de Carreteras (FHWA) en la Universidad A&M de Texas. Desde sus inicios, surgieron nuevas modificaciones con la finalidad de mejorar la elaboración de la Guía de Diseño. Asimismo, el EICM está compuesto por tres modelos principales que están interconectados, los cuales se detallan a continuación:

- Modelo Climático-Materiales-Estructura (CMS), elaborado en la Universidad de Illinois.
- Modelo de Levantamiento por Heladas y Asentamiento por Deshielo (CRREL), desarrollado en Estados Unidos.
- Modelo de Infiltración y Drenaje (ID) elaborado en la Universidad A&M de Texas.

La incorporación del software del EICM es una parte integral del desarrollo del MEPDG, ya que el clima está vinculado en su totalidad a la metodología de diseño. Los datos de entrada son registrados mediante interfaces que son proporcionadas por el programa *AASHTOWare Pavement ME Design*, el cual procesa la data y alimenta el proceso de los tres elementos principales de la Guía MEPDG que son los materiales, respuestas estructurales y predicción del desempeño. A continuación, se resumen las actividades que son brindadas por el EICM en el proceso de diseño de pavimentos flexibles y rígidos (Gaspard et al., 2020, p. 5)

Por un lado, para el diseño de pavimentos flexibles se siguen los siguientes pasos. Primero, se añade el Módulo Resiliente (MR) previamente determinado por el diseñador en cada una de las capas de los materiales no adheridos, como condición de entrada. En general, este valor es de la misma magnitud o cercano a la densidad seca máxima y al contenido de humedad máximo. Segundo, se analizan las variaciones esperadas en el porcentaje de humedad a partir de las

condiciones iniciales, cuando la subrasante y los materiales alcanzan el equilibrio de humedad. Asimismo, se considera la influencia de los cambios estacionales en los niveles de humedad. Tercero, se evalúa el impacto de las variaciones en el contenido de humedad del suelo respecto a la condición inicial en el módulo resiliente introducido por el diseñador. Asimismo, se evalúa el efecto de los ciclos de hielo (en las capas del pavimento) y de deshielo (para la recuperación del suelo congelado) sobre el módulo resiliente. Cuarto, se utiliza el valor del módulo de resiliencia correspondiente a cada capa, el cual varía con el tiempo, para calcular las variables críticas de desempeño y las fallas en distintos puntos del sistema interno del pavimento. Finalmente, se analiza el gradiente de temperatura en cada una de las capas que conforman el pavimento, donde las variaciones que presenta dependen del tiempo.

Por otro lado, las actividades mencionadas anteriormente también se aplican al diseño de pavimentos rígidos en la etapa inicial. Sin embargo, es necesario añadir las siguientes instrucciones propuestas por el EICM. Primero, se elaboran los perfiles de temperatura tanto en la losa de concreto (PCC) como en las capas inferiores de la sección de diseño analizada, para lo cual se utiliza la información de la estación climática. Segundo, se convierte el perfil no lineal de la temperatura en un gradiente lineal efectivo que se emplea para modelar la curvatura de la losa y las tensiones térmicas. Tercero. Se crea un archivo que muestre la distribución de probabilidad de los gradientes lineales efectivos del flujo de calor. Asimismo, se calcula el índice de congelación y el número de periodos de hielo y deshielo para la ubicación estudiada. Finalmente, se proporcionan valores promedio mensuales de humedad relativa para su uso en la estimación de la humedad de alabeo de las losas de PCC.

Las actividades mencionadas son desarrolladas internamente por el EICM en el software de la Guía de Diseño. En adición, una de las variables de salida del EICM que permite el diseño de

pavimentos rígidos y flexibles es el conjunto de factores de ajuste aplicables a las capas de materiales no adheridos. Estos factores consideran los impactos de las variables y condiciones ambientales, tales como los ciclos de congelamiento y deshielo, así como la variación del porcentaje de humedad. Este factor de ajuste se denomina “Fenv” y varía con la posición dentro de la estructura de pavimento y con el tiempo durante el período de análisis.

Por su parte, las respuestas generadas por el modelo EICM se describen en dos niveles: salidas internas y salidas externas. A continuación, se detalla el contenido de cada una (Instituto para el Desarrollo de los Pavimentos en el Perú, 2005).

Por un lado, la salida interna tiene como resultado a los parámetros del contenido de humedad volumétrico (θ_w) y el contenido de humedad volumétrico-saturada (θ_{sat}), a partir de ello se determina el grado de saturación (S) cuyo valor es principalmente en su estado de equilibrio (S equil). Asimismo, se obtienen la relación de recuperación (RR) y los valores de los siguientes factores de ajuste: para la condición no congelada (FU), para la condición congelada (FF), para la reducción debido al deshielo (RF) y para la recuperación (FR).

Por otro lado, las salidas externas, que son mencionadas a continuación, son usadas para otros componentes del software de diseño, ya que estos resultados ingresan en la caracterización de materiales, cálculo de respuesta estructural y predicción del comportamiento.

- Factor de ajuste del Módulo de Resiliencia de los materiales no adheridos, dependiente de la posición y el tiempo.
- Las temperaturas en la superficie y en la mitad de cada una de las capas adheridas al asfalto son otras de las salidas externas. Los valores de los resultados están sometidos a evaluaciones estadísticas de cada etapa de análisis, las cuales pueden ser llevadas a cabo

durante 1 mes o 2 semanas. El promedio y la desviación estándar se utilizan para predecir los cálculos de fatiga y de deformación permanente.

- Magnitudes de temperatura en la carpeta de rodadura externa del pavimento, que se utilizarán en el modelo de agrietamiento térmico.
- Promedio del porcentaje de humedad volumétrica de las capas individuales de los materiales no adheridos, que se utilizará en el modelo de deformación permanente.
- El perfil de temperatura en el concreto hidráulico, a partir de ello se generan valores horarios para ser utilizados en los modelos de agrietamiento y escalonamiento en pavimentos rígidos del tipo JPCP (concreto simple con juntas), y el modelo de punzonamiento en el de tipo CRCP (pavimentos de concreto con refuerzo continuo).
- El número de ciclos de hielo-deshielo y el índice de congelamiento para su uso en la predicción del comportamiento de JPCP.
- La humedad relativa mensual, que se utiliza para modelar los gradientes de humedad a través de las losas de JPCP y CRCP.

3.MODELO CLIMÁTICO DE LA CIUDAD DE CERRO DE PASCO

En el presente capítulo se describe el proceso de recopilación de la información climática necesaria para la aplicación del modelo EICM. Del mismo modo, se genera un documento con extensión “.icm” siguiendo los lineamientos de la MEPDG, para luego ser incorporado al programa *AASHTOWare Pavement ME Design*. Como se mencionó anteriormente, los datos climatológicos pertenecen a una jerarquía de datos de entrada de nivel 1, por lo que se obtuvieron a partir de mediciones realizadas en el lugar de estudio.

El programa *National Cooperative Highway Research Program* [NCHRP] (2004), en el marco del proyecto 1-37A, recomienda que el periodo mínimo de registro de datos para la elaboración de archivo climático requerido por el modelo EICM sea de dos años, por lo tanto, se obtuvo información climática de la ciudad de Cerro de Pasco para el período comprendido entre el 01 de enero de 2020 y 31 de diciembre de 2021. A continuación, se presenta un esquema resumido de los pasos seguidos durante el proceso de investigación para obtener el archivo climático ICM.

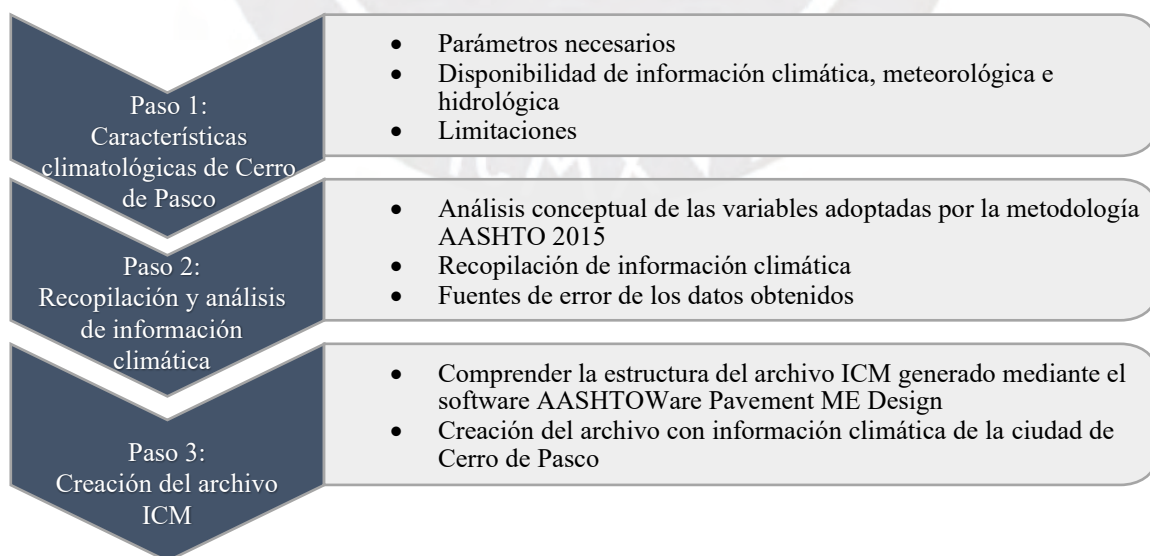


Figura 8. Flujo de metodología para el archivo climático ICM.

3.1.Características climatológicas de la ciudad de Cerro de Pasco

La ciudad de Cerro de Pasco está localizada en la ladera del cerro Uliachin y en la parte inferior de la laguna Patarcocha, a una altitud de 4333 m.s.n.m. En general, presenta un clima frío, con amplitud térmica promedio, y es moderadamente lluvioso durante las estaciones de otoño, primavera y verano, mientras que en invierno se registran lluvias persistentes y continuas, acompañadas de bajas temperaturas.

3.1.1.Parámetros requeridos

De acuerdo con el MEPDG (AASHTO, 2015), la aplicación del modelo climático requiere información histórica climática correspondiente a las variables tales como temperatura, precipitación, humedad relativa, nubosidad y velocidad del viento. En virtud de ello, se recopiló data climática de diferentes bases de datos del lugar de estudio, la cual fue posteriormente incorporada en el software *AASHTOWare Pavement ME Design*. No obstante, previo a su integración, fue necesario realizar un proceso de compatibilización y conversión de unidades, a fin de asegurar la coherencia de los parámetros climáticos con los formatos, las unidades de medida y la frecuencia de registro establecidos por el programa. En ese sentido, en la Tabla 13 se presentan los parámetros climáticos requeridos por el EICM con sus respectivas unidades y frecuencia de registro.

Tabla 13. Parámetros climáticos requeridos por el modelo EICM según la metodología MEPDG

Parámetros	Unidades	Frecuencia
Precipitación	Pulgadas (in)	Horaria
Temperatura del aire	Fahrenheit (°F)	Horaria
Nubosidad	Porcentaje (%)	Horaria
Velocidad del viento	millas por hora (mph)	Horaria
Nivel freático	Pie (ft)	Horaria
Salida y puesta del sol	Hora en decimal	Diaria
Humedad relativa	Porcentaje (%)	Mensual
Radiación solar	But / ft ² ·día	Diaria
Coordenadas geodésicas	Latitud (°)	-
	Longitud (°)	
	Altitud (ft)	

3.1.2. Disponibilidad de información climatológica

Se realizaron consultas a los principales organismos y agencias que brindan información climática de la ciudad de Cerro de Pasco, tales como el Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA) y el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI); así como a páginas en línea como *Weather Spark* y *Sunrise and Sunset*.

El OEFA cuenta con 33 estaciones meteorológicas en todo el país, tanto convencionales como automáticas. Una de sus estaciones automáticas se encuentra en la ciudad de Cerro de Pasco, específicamente en el centro poblado de Paragsha, del distrito Simón Bolívar, provincia y departamento de Pasco.

La diferencia entre una estación meteorológica convencional y una automática radica en que la primera permite registrar variables climáticas, como mínimo, a escala diaria, mientras que la segunda realiza dicho registro a escala horaria, lo cual resulta fundamental para alcanzar la precisión requerida por el modelo climático.

Luego del procesamiento y la consolidación de la base de datos obtenida a partir de las fuentes previamente mencionadas, en la Tabla 14 se presenta un resumen de la cantidad de

información recopilada y disponible para la creación del archivo climático virtual ICM correspondiente al período 2020-2021.

Tabla 14. Información obtenida para la creación del archivo ICM

Parámetro	Frecuencia	Número de datos	Información completa
Precipitación	Horaria	17544	No
Temperatura	Horaria	17544	Si
Nubosidad	Horaria	17544	Si
Velocidad del viento	Horaria	17544	Si
Nivel freático	Horaria	1	Si
Salida y puesta del sol	Diaria	731	Si
Humedad relativa	Mensual	24	Si
Radiación solar	Diaria	731	Si

3.1.3.Limitaciones

En relación con la información proporcionada por el SENAMHI, se identificó que, en la ciudad de Cerro de Pasco, únicamente se dispone de estaciones meteorológicas convencionales, lo cual representó un impedimento para obtener información de las variables climáticas con escala horaria, necesario para cumplir con la metodología establecida por la AASHTO 2015. Asimismo, se evidenciaron períodos con ausencia de información, por lo que se recurrió a otras fuentes de recopilación. Adicionalmente, se identificó una limitación de factor económico, debido a que, para acceder a información detallada de sus estaciones, se necesita realizar varias solicitudes y se requiere efectuar un pago correspondiente.

Adicionalmente, la disponibilidad de información de salida y puesta del sol fue una de las principales limitaciones, pues tanto el OEFA como el SENAMHI no disponen de información respecto a este parámetro. En consecuencia, fue necesario recurrir a páginas en línea para la obtención de esta data. Sin embargo, se realizó una comparación con diferentes plataformas virtuales con el fin de obtener valores representativos o promedios. Por otro lado, el nivel freático

en la ciudad de Cerro de Pasco no cuenta con una entidad o agencia responsable de su medición o que presentase dicha información, por lo que este valor se obtuvo mediante revisión de literatura de diversas tesis que tuvieron como lugar de estudio dicha ciudad.

3.2. Recopilación y Análisis de información climática

En el presente apartado, se describe el procedimiento seguido para la recopilación y verificación de la información climatológica requerida por la MEPDG, correspondiente a la ciudad de Cerro de Pasco, con la finalidad de obtener valores confiables y representativos del lugar de estudio.

3.2.1. Precipitación

La precipitación consiste en la caída de agua desde la atmósfera hacia la superficie del terreno y se presenta en varias formas, tales como las heladas, el granizo, la lluvia y la llovizna. La MEPDG señala que las unidades de este parámetro deben ingresarse en pulgadas y en escala horaria; es decir, se mide la cantidad de precipitación acumulada en la hora previa. En el modelo EICM, la precipitación se considera en forma de lluvia; es necesaria para estimar la infiltración en la estructura del pavimento (National Cooperative Highway Research Program [NCHRP], 2008).

Con la finalidad de implementar este parámetro para elaborar el archivo climático ICM, se recopilaron los datos horarios de precipitación de la estación de monitoreo del OEFA, correspondiente al período entre enero de 2020 y diciembre de 2021, para la ciudad de Cerro de Pasco. Los registros se obtuvieron en milímetros (mm) y, para su compatibilidad con el modelo MEPDG fueron convertidos a pulgadas (in). En las Figura 9 y Figura 10, se muestra el resumen mensual de la precipitación acumulada durante los dos años, expresada en unidades de milímetros y pulgadas, respectivamente. Se observa que el mayor valor de precipitación mensual se registró

en enero de 2021, con aproximadamente 200 mm (7.87 in), y que, durante los meses de enero, febrero, marzo y diciembre, la precipitación presenta valores significativamente mayores que los de junio, julio y agosto.

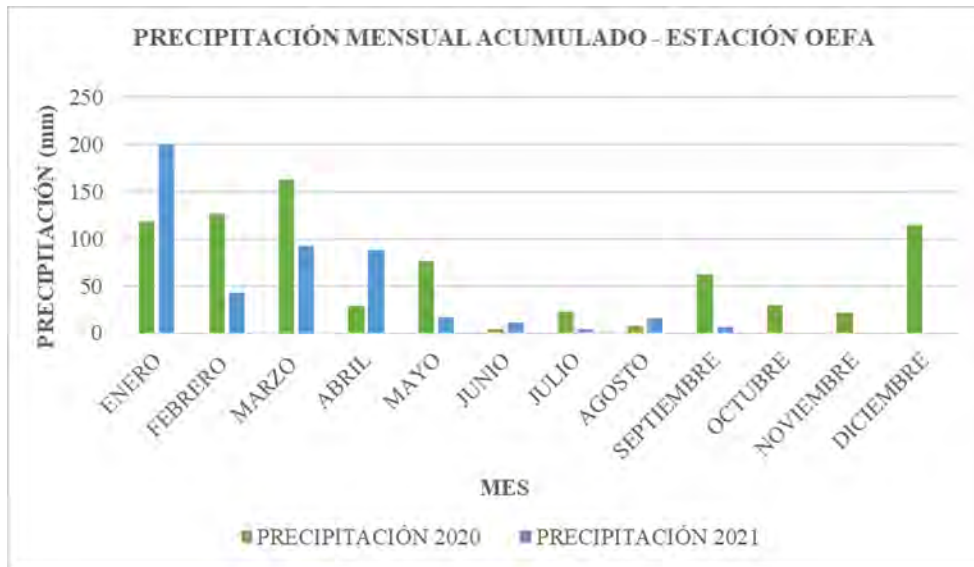


Figura 9. Precipitación mensual acumulada (mm) registrada en la estación del OEFA de la ciudad de Cerro de Pasco durante el periodo 2020-2021.



Figura 10. Precipitación mensual acumulada (in) registrada en la estación del OEFA de la ciudad de Cerro de Pasco durante el periodo 2020-2021.

3.2.2. Temperatura

Es la componente del clima que indica el grado de calentamiento del aire en la atmósfera. La temperatura tiene unidades de grados Fahrenheit en la MEPDG y la escala de medición es horaria a una altura de aproximadamente dos metros sobre la superficie terrestre. Este parámetro es empleado en la ecuación de balance de calor en el EICM con la finalidad de determinar la radiación de onda que emite el aire y para analizar la transferencia de calor desde la superficie de los pavimentos hacia sus capas internas. Adicionalmente, esta permite definir los periodos en los que ocurrirán ciclos de hielo y deshielo, los cuales afectan las capas internas de los pavimentos (National Cooperative Highway Research Program [NCHRP], 2004).

Los valores de temperatura se obtuvieron de la base de datos del OEFA durante el período de análisis. Los registros se obtuvieron en grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$) y posteriormente se convirtieron a grados Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$). Para la creación del archivo climático, se recopiló información horaria de la estación del OEFA, en el periodo comprendido desde enero de 2020 hasta diciembre de 2021. En las Figuras 11 y 12 se presenta un resumen mensual de la temperatura promedio, máxima y mínima, expresada en grados Celsius y Fahrenheit, con frecuencia mensual, correspondiente a los dos años de registro. Se observa en los datos obtenidos que la temperatura máxima es de 17°C ($62,6^{\circ}\text{F}$), mientras que la temperatura mínima es de -8°C ($17,6^{\circ}\text{F}$) y el promedio varía entre 4°C ($39,2^{\circ}\text{F}$) y 7°C ($44,6^{\circ}\text{F}$).

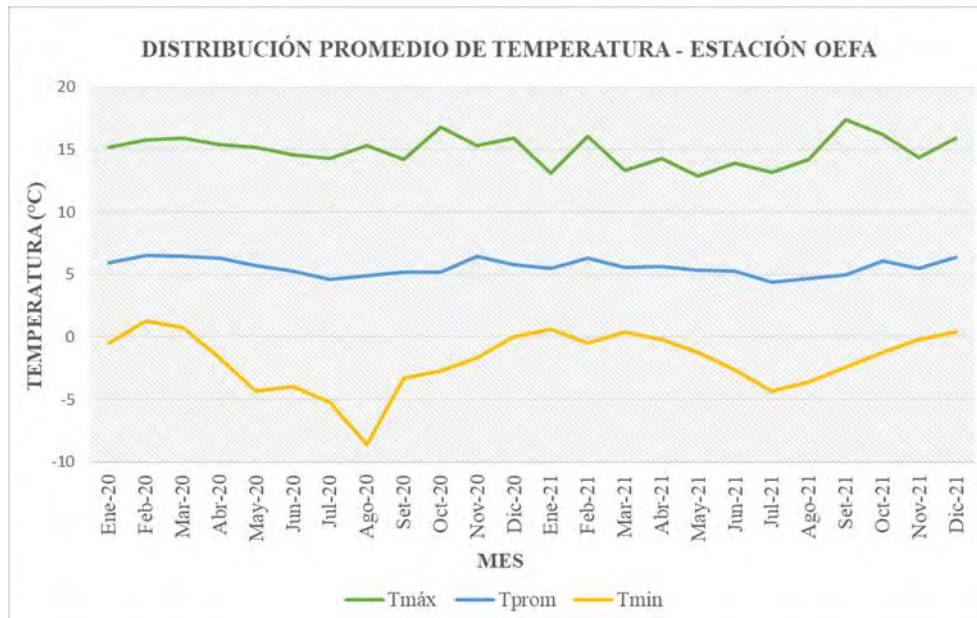


Figura 11. Temperatura promedio mensual (°C) registrada en la estación del OEFA de la ciudad de Cerro de Pasco durante el periodo 2020-2021.

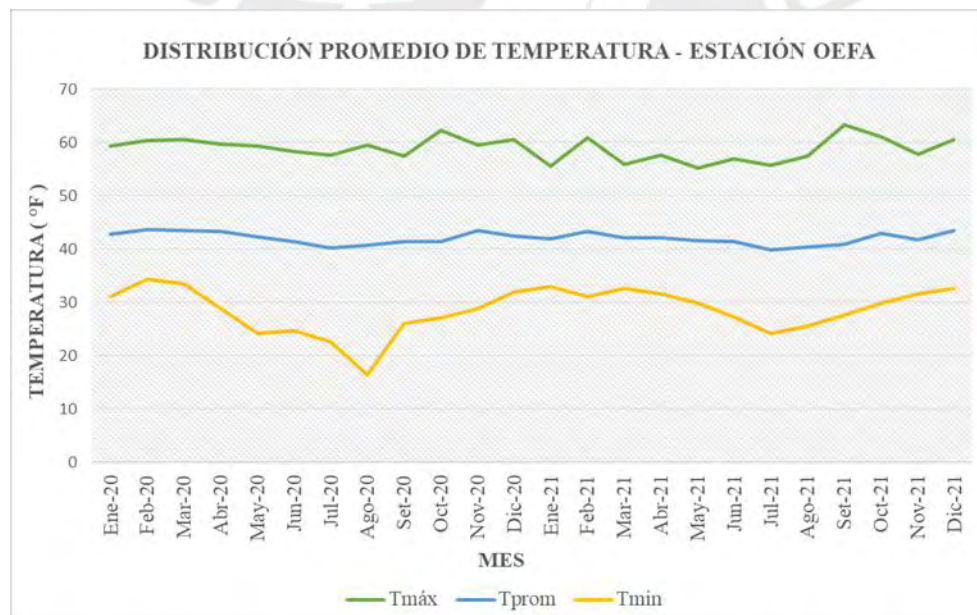


Figura 12. Temperatura promedio mensual (°F) registrada en la estación del OEFA de la ciudad de Cerro de Pasco durante el periodo 2020-2021.

3.2.3. Nubosidad

La nubosidad es el grado de cobertura del cielo por nubes en un lugar y en un momento específico, lo que permite identificar si el cielo está despejado o nublado. Este parámetro es

incorpora en el modelo EICM en valores porcentuales con una frecuencia horario y que actúa como regulador del balance energético superficial. En consecuencia, influye directamente en las variaciones de temperatura de las capas estructurales.

Los datos de esta variable se obtuvieron de la plataforma en línea *Weather Spark* (2022) con frecuencia diaria para el período de estudio, ya que organismos como el OEFA o el SENAMHI no registran mediciones de este parámetro. Cabe mencionar que la data recopilada corresponde a un año y que los valores fueron extrapolados para cubrir los dos años de análisis, ya que la plataforma solo proporciona el valor de nubosidad de un año.

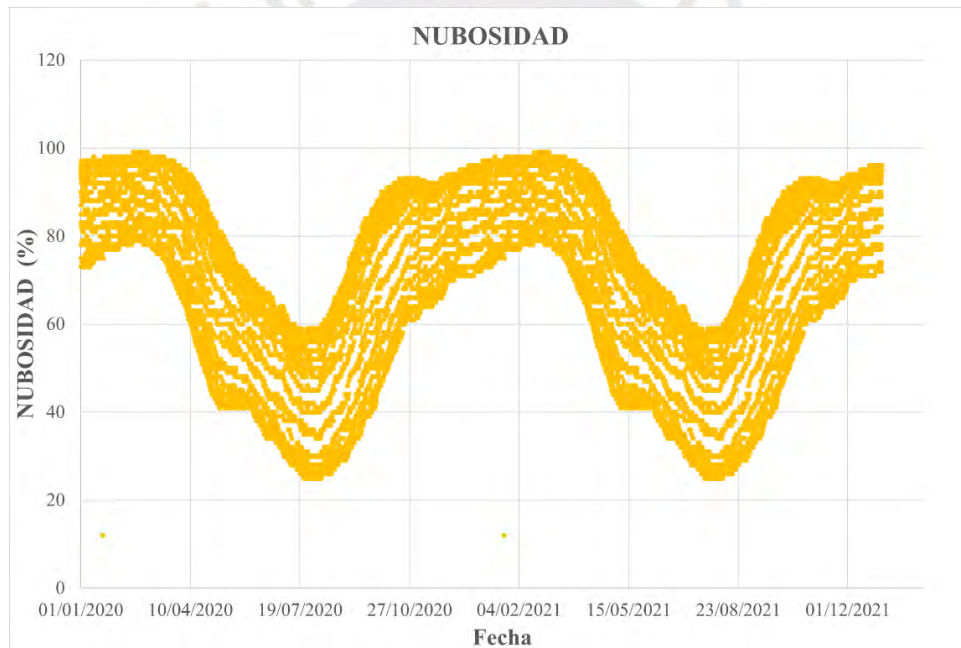


Figura 13. Nubosidad horaria (%) registrada de Weather Spark de la ciudad de Cerro de Pasco para el periodo 2020–2021

3.2.4. Velocidad del viento

El viento es el cambio en el estado de movimiento del aire, ocasionado por la variación de presión debido al calentamiento de diferentes zonas de la Tierra y la atmósfera. Presenta dos componentes de medición: dirección y velocidad. La dirección del viento se considera 0° cuando

viene del norte y aumenta en sentido horario hasta 360° . De acuerdo con esta convención, un viento proveniente del sureste equivale a 135° y uno del sur, a 180° . Respecto a la velocidad del viento, se puede expresar en dos escalas: el nudo (kt), unidad que representa una milla náutica por hora, equivalente a 1.852 km/h; y Beaufort, que estima la velocidad del viento a partir de los efectos observables que este produce sobre la superficie del mar (World Meteorological Organization, 2018).

De acuerdo con la metodología del MEPDG, la velocidad del viento se mide en millas por hora (mph), ya que esta unidad es requerida por el EICM para ajustar el coeficiente de transferencia de energía por convección en la carpeta de rodadura del pavimento. Se recopiló la información meteorológica de la estación del OEFA correspondiente al periodo de estudio. Los registros de la velocidad del viento se obtuvieron en metros por segundo (m/s) y se convirtieron a millas por hora (mph). En las Figuras 14 y 15 se presenta un resumen de la velocidad promedio diaria del viento durante los años 2020 y 2021, representada en metros por segundo (m/s) y millas por hora (mph), respectivamente. Se observa que los valores de la velocidad promedio diaria del viento se encuentran entre 0.5 m/s (1.12 mph) y 1.5 m/s (3.35 mph). Asimismo, hacia finales del año 2021 se identifican valores inferiores a 0.5 m/s (1.12 mph).



Figura 14. Velocidad promedio diaria del viento (m/s) registrada en la estación del OEFA de la ciudad de Cerro de Pasco durante el período 2020-2021.



Figura 15. Velocidad promedio diaria del viento (mph) registrada en la estación del OEFA de la ciudad de Cerro de Pasco, durante el período de 2020-2021.

3.2.5. Nivel Freático

El nivel freático se define como la superficie que delimita la parte superior de la zona saturada del suelo, en la cual los vacíos se encuentran completamente llenos de agua y la presión del agua es igual a la presión atmosférica. La profundidad de este nivel influye en el desempeño de los pavimentos, debido a su incidencia en la resistencia mecánica de los materiales que

conforman la estructura del pavimento y en la magnitud de los esfuerzos a los que estos se encuentran sometidos (Sadasivam & Morian, 2006).

La incorporación de la profundidad del nivel freático en el MEPDG se realiza a través del EICM, el cual permite estimar la variación temporal del contenido de humedad en la subrasante y capas granulares. Estas variaciones influyen en la determinación de los módulos resilientes y en el desempeño estructural del pavimento durante su vida útil (AASHTO, 2015)

Este parámetro fue determinado empleando un nivel de entrada 3 conforme al MEPDG, lo cual implica su estimación a partir de la revisión de literatura. Específicamente se consideró de la tesis titulada “Análisis de estabilidad de taludes, empleando métodos aproximados de dovelas, en depósito de desmonte de la mina Excélsior - Pasco” (Condezo, 2019), donde se establece una profundidad de 1,85 m medidos desde la superficie del terreno. La metodología del MEPDG requiere que este parámetro sea ingresado en pies (ft) y en escala horaria, la profundidad fue convertida a dicha unidad, resultando un valor equivalente a 6,07 ft, manteniéndose constante respecto al nivel del terreno durante el periodo de análisis.

3.2.6. Salida y puesta del sol

La salida y la puesta del sol representan las horas transcurridas entre los crepúsculos matutinos (salida del sol) y el crepúsculo vespertino (puesta del sol). De acuerdo con la metodología MEPDG, la elaboración del archivo climático requiere dicha variable en horas decimales. Para obtener los valores de este parámetro, se recurrió a la página en línea "*Sunrise and Sunset*" para recopilar los datos del período de estudio. La Figura 16, muestra las horas de salida y puesta del sol, así como la duración del día para los años 2020 y 2021.

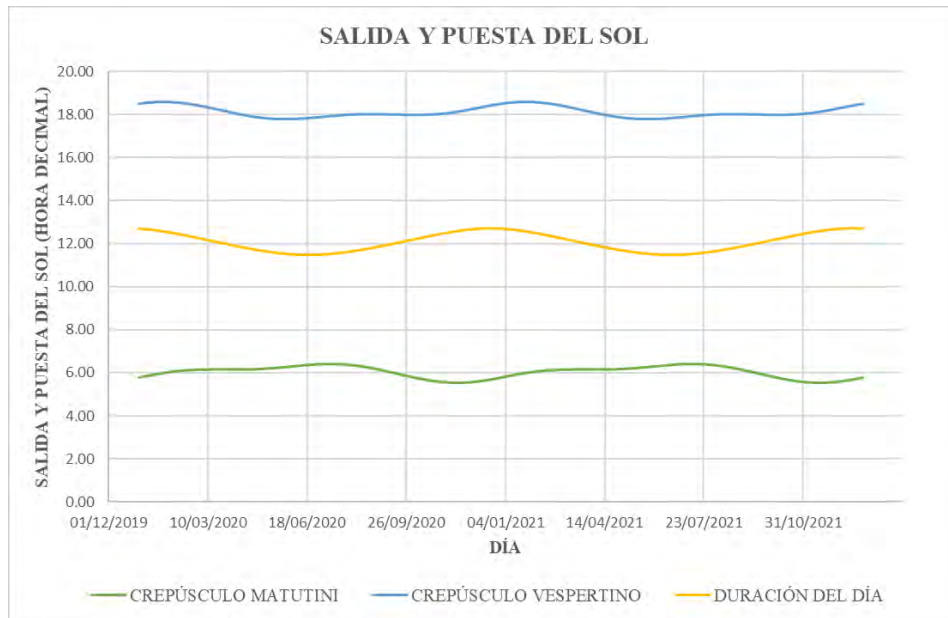


Figura 16. Salida y puesta del sol diarias (en horas decimales) de la ciudad de Cerro de Pasco para el período 2020–2021, registradas en la página en línea Sunrise and Sunset.

3.2.7. Humedad relativa

La humedad relativa es la relación entre la presión de vapor del entorno respecto a la presión de vapor del agua. El contenido de agua en la atmósfera depende en mayor medida de la temperatura; por lo tanto, cuando las temperaturas son cálidas, el aire tiene una mayor capacidad de retención de humedad, mientras que, a temperaturas más frías, la capacidad de retención disminuye.

La humedad relativa influye en el deterioro de las estructuras de los pavimentos rígidos, pues provoca deformaciones y afecta el Índice de Rugosidad Internacional (IRI). De acuerdo con el MEPDG, esta variable se incorpora al EICM, expresada en porcentajes, a escala mensual. Los valores de este parámetro se obtuvieron a partir de la base de datos del OEFA y se complementaron con datos del SENAMHI durante el periodo de enero de 2020 a diciembre de 2021. En la Figura 17, se muestra un resumen de la humedad relativa promedio con frecuencia mensual de los dos

años de registro. Se observa que los valores promedio de la humedad relativa en la ciudad de Cerro de Pasco varían entre un máximo de 87% y un mínimo de 63% durante el periodo analizado.

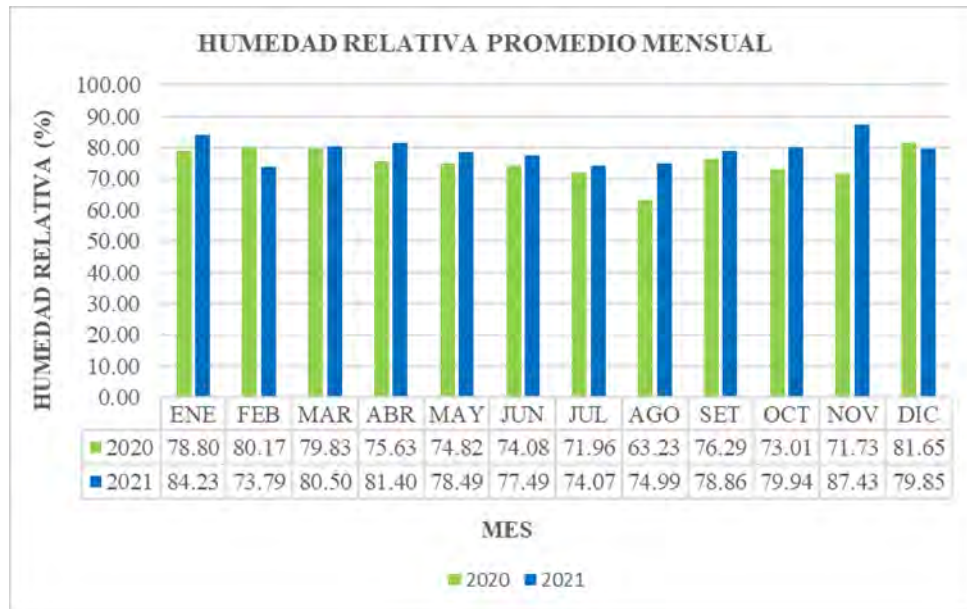


Figura 17. Humedad relativa promedio mensual (%) registrada en las estaciones del OEFA y del SENAMHI de la ciudad de Cerro de Pasco para el periodo 2020-2021.

3.2.8. Radiación solar

La radiación solar es la energía que incide en una superficie por unidad de área y se obtiene al integrar la irradiancia en un período de tiempo. En el MEPDG, este parámetro está expresado en unidades térmicas británicas por pie cuadrado por día (But/ft²·día), el cual considera la incidencia por radiación directa (onda corta) y radiación difusa (onda larga) en la superficie terrestre. La radiación solar es uno de los principales agentes que modifican el gradiente de temperatura en los estratos del pavimento, pues permite determinar el balance energético calculado por el EICM, junto con otros factores que interactúan durante el mismo período.

Se realizó una revisión de las bases de datos de los principales organismos peruanos con la finalidad de obtener información sobre la radiación solar de la ciudad de Cerro de Pasco durante los períodos de estudio; sin embargo, dichos organismos no disponen de datos actualizados. Por

este motivo, se recurrió al *Atlas de Energía Solar del Perú* (SENAMHI, 2003), el cual presenta valores de irradiación solar diaria promedio mensual en las unidades kilovatio-hora por metro cuadrado (kWh/m²) para el período 1975-1990, tal como se muestra en la Tabla 15. Adicionalmente, se consideraron los datos reportados por el Global Solar Atlas, que analiza la irradiación global horizontal para el período 1999-2018, cuyos valores para la ciudad de Cerro de Pasco se encuentran aproximadamente en un rango de 5,2 a 5,6 kWh/m², como se evidencia en (World Bank Group, 2019). La comparación entre ambas fuentes evidencia que la radiación solar para la ciudad de estudio se mantiene dentro del rango de 5,2 a 6,25 kWh/m² durante los periodos mencionados, lo que evidencia la estabilidad de este parámetro. Por consiguiente, para incorporar este parámetro en el EICM, se utilizaron los datos del *Atlas de Energía Solar del Perú* (SENAMHI, 2003), dado que constituye un valor estable a lo largo del tiempo. Asimismo, los datos fueron convertidos a unidades But/ ft²·día, tal como lo requiere la metodología MEPDG.

Tabla 15. Irradiación solar promedio mensual en la ciudad de Cerro de Pasco para el periodo de 1975-1990

Mes	En ero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Setiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Rad. Min	5	5.25	6	5.5	5.5	5.5	5	5	5.5	6	6	5
Rad. Máx	5.5	5.75	6.5	6	6	6	5.5	5.5	6	6.5	6.5	5.5
Rad. Prom (kWh/ m²)	5.2 5	5.5	6.25	5.75	5.75	5.75	5.25	5.25	5.75	6.25	6.25	5.25

Nota. Tomado de “*Atlas de Energía Solar del Perú*”, por SENAMHI, 2003.

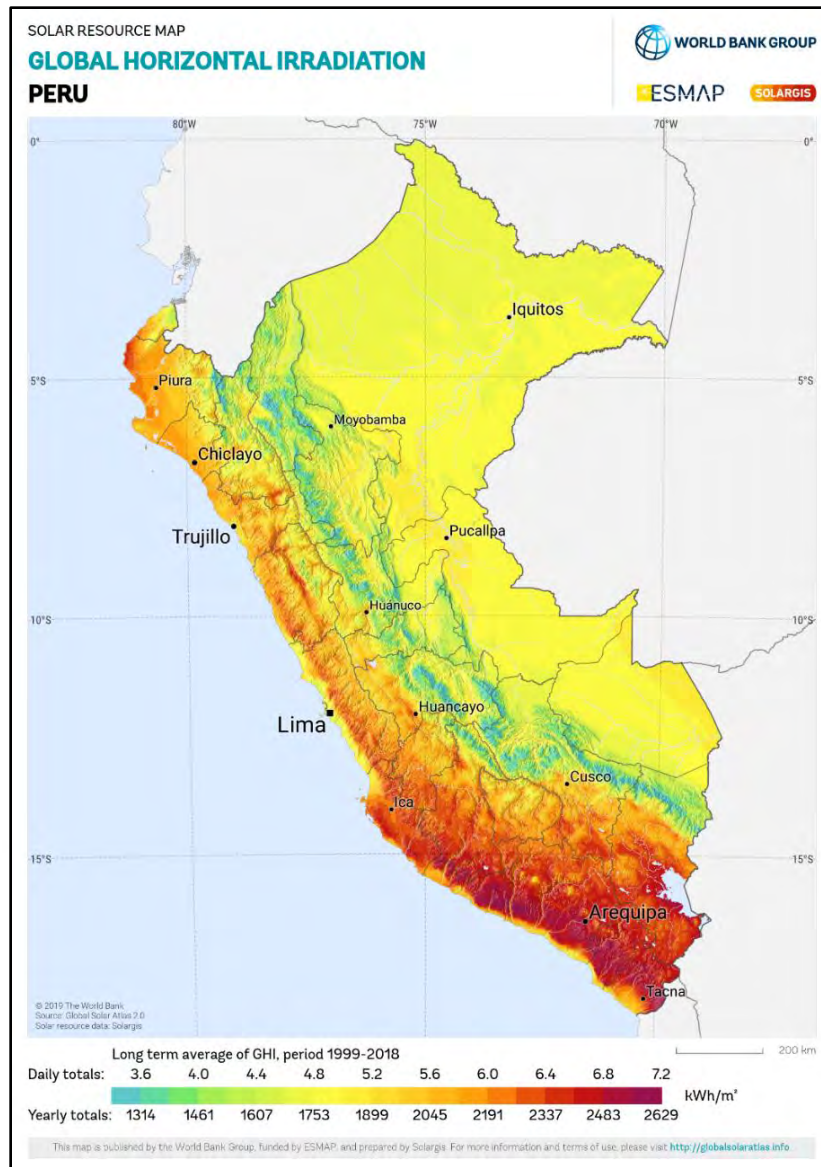


Figura 18. Radiación solar horizontal global diaria promedio durante el período de 1999 a 2018 en el Perú.

Adaptado de “Global Solar Atlas Solar”, por World Bank Group, 2019.

En la Figura 19, se muestra la gráfica de radiación solar durante los dos años de análisis. Sin embargo, es importante mencionar que el valor de la radiación solar se tomó de información de años anteriores al período de análisis.

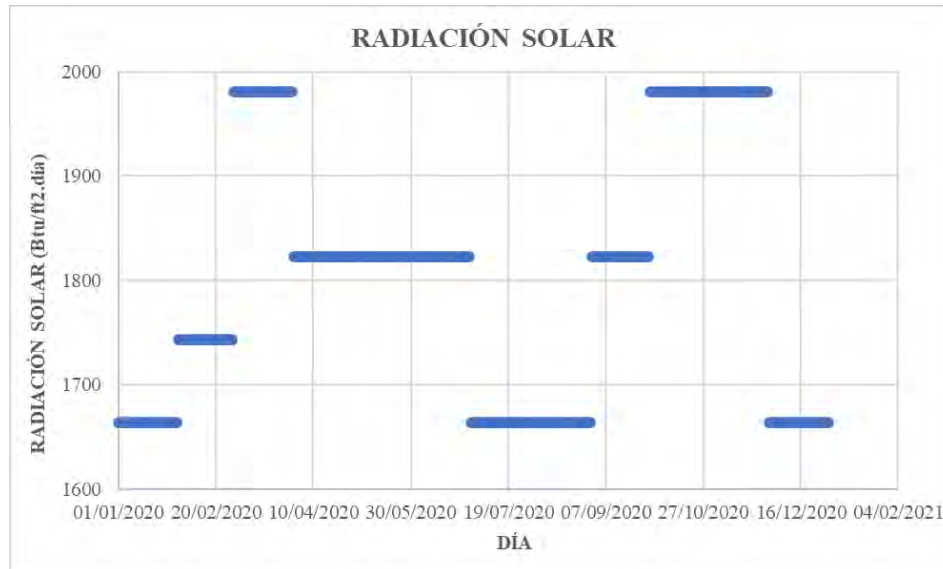


Figura 19. Gráfico de salida y puesta del sol diaria de la ciudad de Cerro de Pasco para el periodo de estudio.

3.2.9. Coordenadas geodésicas

Las coordenadas geodésicas son descripciones tridimensionales de un punto determinado mediante una longitud, una latitud geodésica, y una altura geométrica respecto a un elipsoide de referencia. En la MEPDG se considera el Sistema Geodésico Mundial de 1984 (WGS84) para la medición de estas coordenadas, donde tanto la longitud como la latitud están expresadas en grados decimales ($^{\circ}$), mientras que la elevación se mide respecto al nivel del mar en pies (ft).

Se consideraron las coordenadas geodésicas correspondientes a la estación del OEFA en la ciudad de Cerro de Pasco. Estas variables se presentan en la Tabla 16, las cuales son parámetros requeridos para el modelo climático.

Tabla 16. Datos de las coordenadas geodésicas de la estación OEFA

Descripción	Valor
Estación	OEFA
Localización	Cerro de Pasco
Longitud ($^{\circ}$)	-76.2566
Latitud ($^{\circ}$)	-10.66748
Elevación (ft)	14370.08

3.2.10.Fuentes de error de los datos obtenidos

Respecto a la precipitación, se realizó la compatibilización de registros de diferentes estaciones del mismo lugar de estudio para completar la información faltante. En cuanto a los datos de la nubosidad y la salida y puesta del sol fueron obtenidos de plataformas digitales, las cuales predicen sus resultados en base a aproximaciones de satélites, lo que podría introducir ligeras imprecisiones en los horarios registrados. Por otro lado, el nivel freático no es constante en toda la superficie de la ciudad de Cerro de Pasco; sin embargo, se ha considerado un valor referencial de acuerdo a Condezo (2019), para completar la información requerida para el modelo climático. Finalmente, los datos de radiación solar de la ciudad de estudio fueron considerados del Atlas de Energía Solar del Perú (SENAMHI, 2003), lo cual puede conllevar a ciertas imprecisiones en cuanto a los resultados, debido a que los datos corresponden a un período distinto al considerado en el presente análisis.

3.3.Elaboración del archivo climático integrado ICM

Previo a la creación del archivo climático con extensión “.icm”, se describe la estructura requerida para su reconocimiento por el software *AASHTOWare Pavement ME Design 2013*, lo que permite integrar la información climática en el diseño de pavimentos. La elaboración del archivo se realizó con base en un formato climático propio del software, pues este cuenta con una base de datos de diversos observatorios climáticos de Estados Unidos. La estructura se divide en cuatro secciones: datos informativos, datos promedios, diarios y horarios.

Luego de establecer la estructura del archivo que integra toda la información meteorológica, se procede a identificar los parámetros de manera diferenciada. Cabe señalar que el archivo se denominó “Cerro de Pasco.icm”. En la Figura 20, se muestra la estructura del archivo virtual.

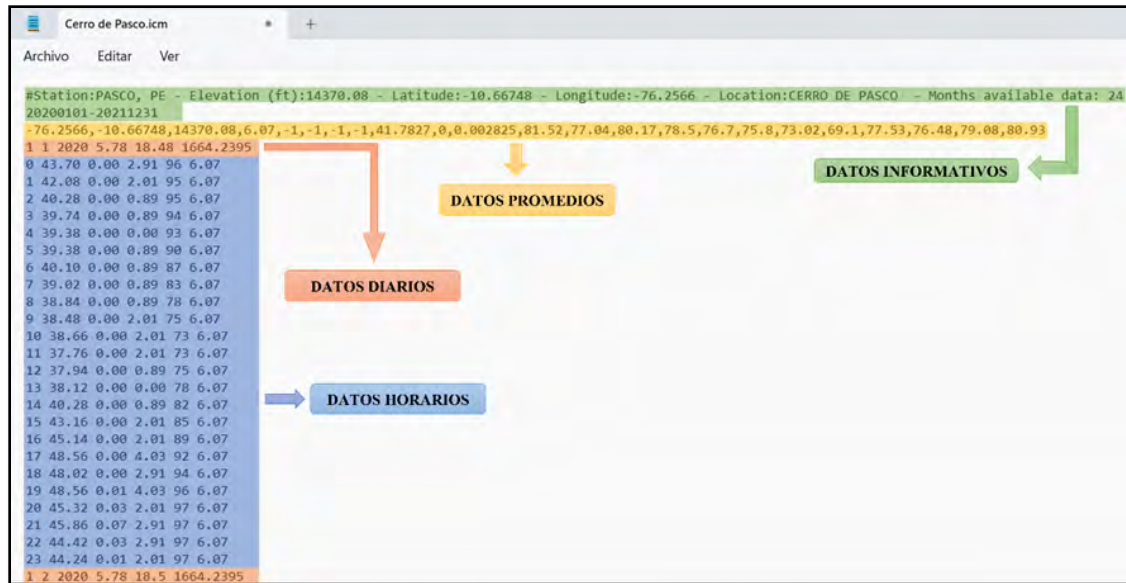


Figura 20. Estructura de modelo climático compatible con el software AASHTOWare Pavement ME Design.

3.3.1. Estructura del archivo ICM

Datos informativos

Se describen las características de la estación meteorológica empleada, incluyendo su localización geográfica (latitud y longitud) y su elevación sobre el nivel del mar, así como el período de recolección de información utilizado para la elaboración del archivo climático. Asimismo, se especifican las fechas de inicio y término de los registros de datos mediante la codificación YYYYMMDD-YYYYMMDD; para el presente estudio, corresponden al intervalo entre el 1 de enero de 2020 y el 31 de diciembre de 2021 (20200101–20211231). En la Tabla 17, se muestran los datos informativos de la estación.

Tabla 17. Datos informativos de la estación total ubicada en Cerro de Pasco.

Descripción	Cerro de Pasco.icm
Elevación (ft)	14370.08
Latitud (°)	-10.66748
Longitud (°)	-76.2566
Localización	Cerro de Pasco
Meses disponibles de información	24
Fecha de inicio y fin de registro	2020/01/01 - 2021/12/31

Datos promedios

Los parámetros integrados en esta sección comprenden variables geográficas y meteorológicas, tales como la longitud, la latitud, la elevación, la profundidad del nivel freático, la temperatura media anual, los días bajo cero, la precipitación anual y la humedad relativa media mensual. En la Figura 21, se presenta la configuración de los datos promedios que forman parte del modelo climático.

Datos promedios:	
-76.2566,-10.66748,14370.08,6.07,-1,-1,-1,-1,41.7827,0,0.002825,81.52,77.04,80.17,78.5,76.7,75.8,73.02,69.1,77.53,76.48,79.08,88.93	
Descripción de cada parámetro :	
-76.2566,-10.66748,14370.08	Longitud (°), Latitud (°), Elevación (ft)
6.07,-1,-1,-1,-1	Profundidad del Nivel Freático (ft) (*)
41.7827	Temperatura Media anual (°F)
0	Días bajo cero (°F)
0.002825	Precipitación Anual (in)
81.52,77.04,80.17,78.5,76.7,75.8,73.02,69.1,77.53,76.48,79.08,88.93	Humedad Media mensual (%)

Figura 21. Configuración de los datos promedios que conforman la estructura del archivo climático.

Cabe indicar que, la profundidad del nivel freático es de 6.07 ft, pero se coloca -1 si se van a emplear profundidades temporales como primavera, verano, invierno u otoño. Sin embargo, si no se consideran las estaciones del año, se utiliza únicamente el valor inicial (6.07 ft en el caso

actual) como representativo para todo el año. En el presente modelo se emplea esta segunda opción para crear el archivo.

Datos diarios y horarios

Los datos diarios integran la información cronológica (mes, día y año), los parámetros de salida y puesta del sol, así como los valores de radiación solar. En la Figura 22, se muestra la configuración del tercer componente del archivo, en el cual se diferencian los distintos parámetros medidos a escala diaria.

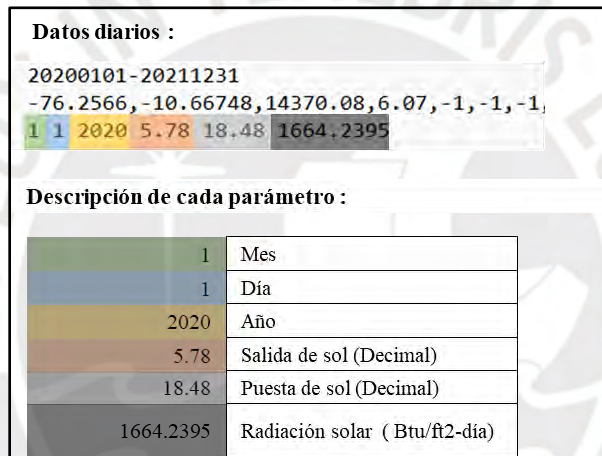


Figura 22. Configuración de datos diarios que forman parte del modelo virtual.

Los datos horarios conforman la estructura vertical del archivo climático ICM, pues hay una gran cantidad de información compuesta por los datos de los parámetros obtenidos en escala horaria como la precipitación, temperatura, velocidad del viento y nubosidad. En la Figura 23, se muestra la configuración de los datos horarios obtenidos para los 731 días del periodo de análisis.

Datos horarios :						
-76.2566, -10.66748, 14370.08, 6.07, -1, -1,						
1 1 2020 5.78 18.48 1664.2395						
0	43.70	0.00	2.91	96	6.07	
1	42.08	0.00	2.01	95	6.07	
2	40.28	0.00	0.89	95	6.07	
3	39.74	0.00	0.89	94	6.07	
4	39.38	0.00	0.00	93	6.07	
5	39.38	0.00	0.89	90	6.07	
6	40.10	0.00	0.89	87	6.07	
7	39.02	0.00	0.89	83	6.07	
8	38.84	0.00	0.89	78	6.07	
9	38.48	0.00	2.01	75	6.07	
10	38.66	0.00	2.01	73	6.07	
11	37.76	0.00	2.01	73	6.07	
12	37.94	0.00	0.89	75	6.07	
13	38.12	0.00	0.00	78	6.07	
14	40.28	0.00	0.89	82	6.07	
15	43.16	0.00	2.01	85	6.07	
16	45.14	0.00	2.01	89	6.07	
17	48.56	0.00	4.03	92	6.07	
18	48.02	0.00	2.91	94	6.07	
19	48.56	0.01	4.03	96	6.07	
20	45.32	0.03	2.01	97	6.07	
21	45.86	0.07	2.91	97	6.07	
22	44.42	0.03	2.91	97	6.07	
23	44.24	0.01	2.01	97	6.07	
1 2 2020 5.78 18.5 1664.2395						

- HORA
- TEMPERATURA(°F)
- PRECIPITACIÓN (in)
- VELOCIDAD DEL VIENTO (mph)
- NUBOSIDAD (%)
- PROFUNDIDAD NIVEL FREÁTICO (ft)

Figura 23. Configuración de datos horarios de parámetros climáticos requeridos por el MEPDG.

3.3.2. Integración de información climatológica

Se utilizó el programa Microsoft Excel para la unificación de los datos horarios, diarios y promedios. Luego de organizar la información conforme a la estructura compatible con el software *AASHTOWare Pavement ME Design 2013*, se procedió con la secuencia de pasos que se detallan a continuación para generar el archivo en formato “.icm”.

Inicialmente, la hoja de cálculo se guardó como “Texto delimitado por tabulaciones”, como se muestra en la Figura 24. Posteriormente, el archivo generado se abre con el Bloc de Notas de Microsoft Windows y se emplea la herramienta de “reemplazar todo” para suprimir los espacios en blanco excedentes en el documento, tal como se observa en la Figura 25. Luego, se integran los valores de las variables faltantes en la parte superior del formato. Por último, se guarda este archivo

con extensión “.icm” con codificación ANSI (*American National Standards Institute*), tal como se evidencia en la Figura 26.

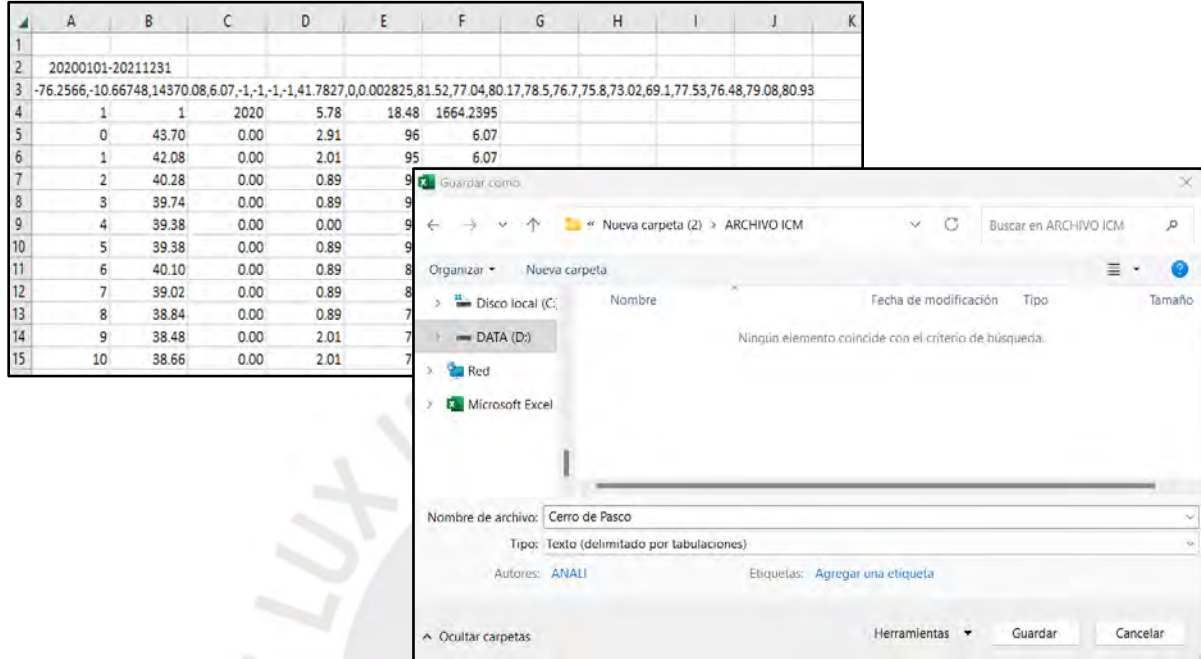


Figura 24. Guardar de Microsoft Excel a formato texto.

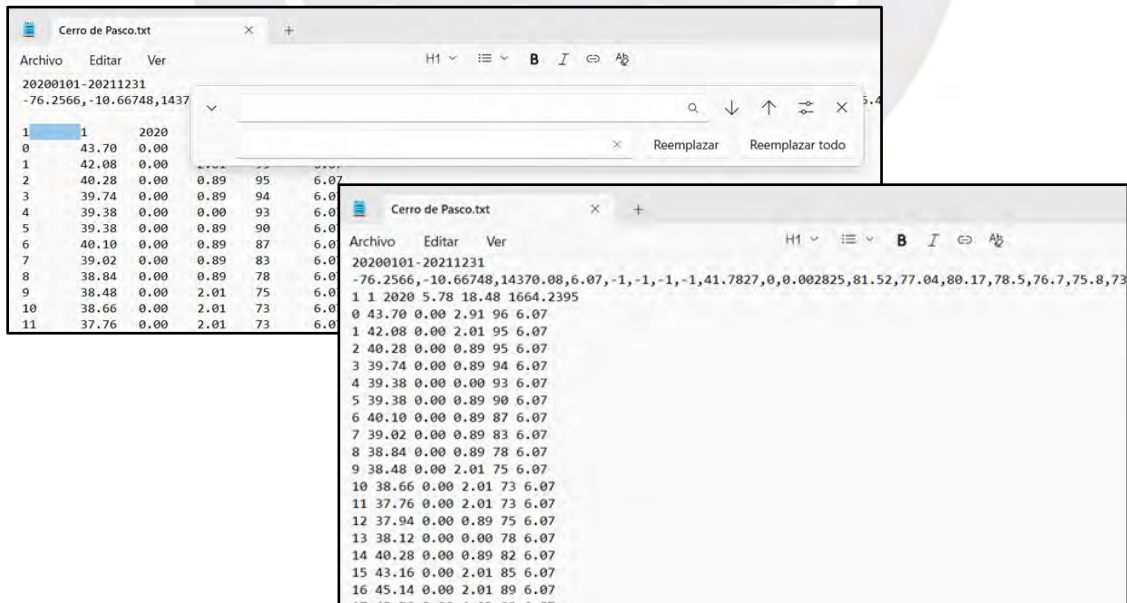


Figura 25. Eliminación de exceso de espacio en Bloc de Notas.

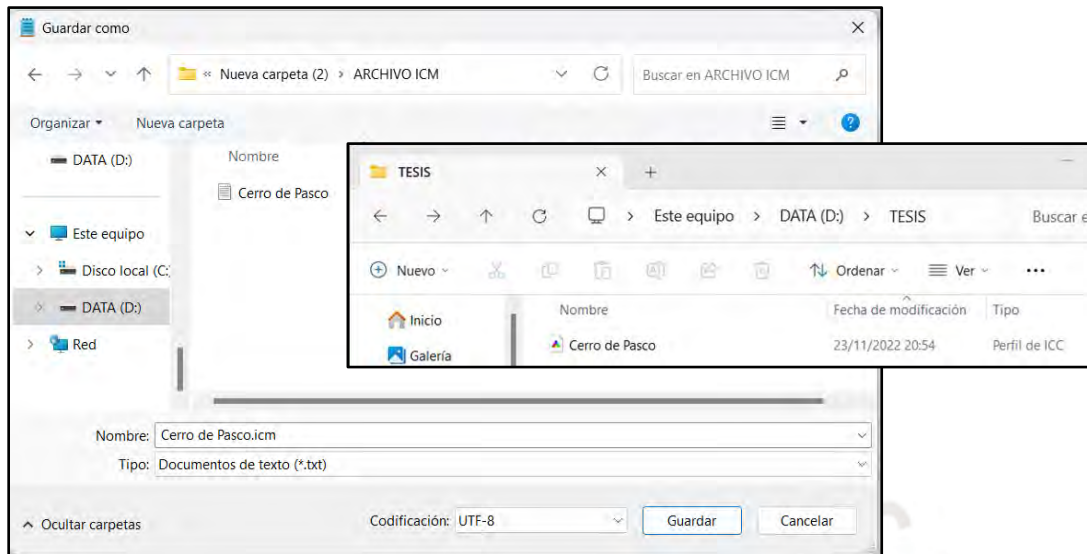


Figura 26. Guardado del archivo del Block de Notas en formato ".icm".

4.DISEÑO DEL PROTOTIPO DE PAVIMENTO RÍGIDO EN CERRO DE PASCO

En este apartado, se desarrolla el diseño de prototipo del pavimento rígido para la ciudad de Cerro de Pasco, empleando la metodología propuesta por el AASHTO 93 y el enfoque mecanístico-empírico MEPDG 2015. El diseño se considera de carácter prototípico, ya que los datos de entrada (inputs) utilizados corresponden a información de referencia obtenida de la revisión bibliográfica, clasificada como nivel 3 según la jerarquía de datos del MEPDG, tanto para la estimación del tráfico como para la caracterización de los materiales. Asimismo, ante la ausencia de factores de calibración locales, los valores de calibración empleados en el análisis se han adoptado de acuerdo con los valores predeterminados del software *AASHTOWare Pavement ME Design* (PMED).

Adicionalmente, con fines comparativos, se generaron diseños bajo escenarios climáticos representativos de climas templados y muy cálidos, utilizando los archivos climáticos disponibles en PMDE v1.3 para las ciudades de Austin, Texas y Key West, Florida. Estas simulaciones permiten evaluar la influencia del clima sobre el desempeño del pavimento, manteniendo constantes las demás variables del modelo.

En cuanto a los parámetros de tránsito vehicular y caracterización de la subrasante, la data utilizada proviene de los estudios realizados durante la formulación del expediente técnico de un proyecto de pavimentación ejecutado por el Estado peruano en la ciudad de Cerro de Pasco. Estos estudios corresponden al proyecto titulado “*Mejoramiento y Ampliación del Servicio de Movilidad Urbano en la Interconexión Vial de la Av. El Minero - Jr. Huancavelica Centro Poblado de Paragsha del Distrito de Simón Bolívar - Provincia de Pasco - Departamento de Pasco*”, elaborado por la Municipalidad Distrital de Simón Bolívar (2022), y constituyen la base de

información empleada para el diseño del pavimento rígido desarrollado en la presente investigación.

4.1. Diseño de pavimento rígido AASHTO 93

4.1.1. Parámetros de diseño

Periodo de diseño: es la vida útil proyectada del pavimento, que depende de las especificaciones del proyecto. El periodo de vida se puede determinar dependiendo el tipo de la vía (Tabla 18). Dado que el conteo de tránsito realizado para la vía en análisis corresponde a una vía urbana de moderado volumen de tránsito, el periodo de análisis recomendado varía entre 15 y 25 años, por lo que se establece un periodo de diseño del pavimento de 20 años.

Tabla 18. Directrices para la duración del periodo de análisis de un diseño.

Condiciones de la Carretera	Periodo de Análisis (años)
Urbano de alto volumen	30 - 50
Rural de alto volumen	20 - 50
Pavimentado de bajo volumen	15 - 25
Superficie de agregado de bajo volumen	10 - 20

Nota Adaptado de AASHTO (1986).

Tráfico de Diseño: este parámetro se determina a partir de un estudio de tránsito vehicular, en el cual, luego del procesamiento de la información, las diferentes configuraciones de ejes y sistemas de neumáticos de los vehículos se convierten en ejes simples equivalentes de 8.2 Ton de peso, a los que se les denomina ESAL (*Equivalent Single Axle Load*). El valor del ESAL diario inicial ($ESAL_{D,0}$) se obtiene multiplicando el número de repeticiones de cada configuración vehicular por su correspondiente Factor de Equivalencia de Carga por Eje (*Equivalent Axle Load Factor - EALF*). Adicionalmente, el valor del ESAL de diseño depende de otros factores como la tasa de crecimiento ($i\%$), el factor direccional (D), el factor de distribución de carril (L), periodo de diseño

(Y), el número de sentidos y la cantidad de carriles por sentido. La clasificación vehicular, así como la asignación de pesos y dimensiones del conteo realizado por la Municipalidad Distrital de Simón Bolívar se efectuó conforme a lo establecido en el Reglamento Nacional de Vehículos DS 053-2003-MTC.

Confiabilidad (R): representa la variabilidad asociada a los procesos constructivos y a las propiedades de los materiales, por lo que puede interpretarse como un factor de seguridad que amplifica el tráfico de diseño considerado. El tramo vial que conecta la Av. El Minero y Jr. Huancavelica, ubicado en el Centro Poblado de Paragsha, se clasifica como vía colectoras según lo establecido en la Norma CE. 010 *Pavimentos Urbanos*, ya que cumple la función de canalizar el tránsito proveniente de las vías locales hacia las vías arteriales. En ese sentido, para este tipo de vía y su localización en un entorno urbano, se podría adoptar un nivel de confiabilidad comprendido entre el 80% y el 95% según la Tabla 19. Sin embargo, como Cerro de Pasco es una ciudad que está sometida a climas extremos, se considera 99.9% para el diseño del pavimento.

Tabla 19. Niveles de confiabilidad recomendados para varias clasificaciones funcionales de vías

Clasificación funcional	Nivel de confiabilidad recomendado	
	Urbana	Rural
Interestatales y otras autopistas	85 - 99.9	80 - 99.9
Arterias principales	80 - 99	75 - 95
Colectoras	80 - 95	75 - 95
Locales	50 - 80	50 - 80

Nota. Resultados basados en una encuesta de la AASHTO Pavement Design Task Force. Adaptado de AASHTO (1986).

Tasa de crecimiento (i%): Según el MTC (2014), la tasa de crecimiento del tránsito anual está relacionada con el crecimiento socioeconómico, cuyos valores podrían situarse entre el 2% y el 6%. Para el diseño desarrollado en el presente capítulo, se ha considerado una tasa de crecimiento

de 1.2% para la ciudad de Cerro de Pasco (INEI,2007, como se citó en Municipalidad Distrital de Simón Bolívar, 2022).

4.1.2.Procedimiento de diseño de pavimento rígido

A continuación, se detalla el procedimiento de diseño, empleando la metodología AASHTO 93, para un tramo de vía que conecta la Av. El Minero y Jr. Huancavelica, que consta de dos sentidos (un carril por sentido). La capa de rodadura es una losa de concreto simple con $f'c=280$ kg/cm², con barras de transferencia. Asimismo, según lo descrito anteriormente, el periodo de diseño (Y) considerado es de 20 años, la razón de crecimiento anual del tráfico (r) es de 1.2 y el nivel de confiabilidad considerado en el diseño es de 99%. Para calcular la distribución de carril (D), el factor de líneas de tráfico (L), la confiabilidad (R) y el nivel de servicio (PSI) se emplearon valores recomendados por la AASHTO 1986.

Primero, se calcula el ESAL de diseño a partir del conteo vehicular de un aforo de 7 días según la Figura 27, donde se obtuvo un IMDS de 535 vehículos/día. Para calcular el IMDA, el Factor de Corrección Estacional (FC) considerado se tomó de la Oficina de Desarrollo Vial Ministerio de Transportes y Comunicaciones, cuyo valor se detalla en la Tabla 20. Asimismo, según el AASHTO 93, el factor de distribución direccional (D) es 1 para vías en un sentido y 0.5 para 2 sentidos, por lo tanto, como la vía es de 2 sentidos, el valor de D es 0.5. Finalmente, el valor del factor de carril de tráfico (L) es de 1, según la Tabla 21.












DIA	FECHA	AUTO	STATION WAGON	CAMIONETAS			MICRO	BUS		CAMION			TOTAL DE VEHICULOS
				PICK UP	PANEL	RURAL Combi		2 E	>=3 E	2 E	3 E	4 E	
DIAGRAMA VEHICULAR													
DOMINGO	15/08/2021	139	86	76	8	24	3	0	0	4	2	0	342
LUNES	16/08/2021	210	154	122	13	89	8	0	0	6	3	1	606
MARTES	17/08/2021	170	156	130	11	84	5	0	0	7	3	0	566
MIERCOLES	18/08/2021	174	154	131	13	85	6	0	0	8	3	0	574
JUEVES	19/08/2021	176	158	138	7	82	4	0	0	7	3	1	576
VIERNES	20/08/2021	174	160	135	6	72	5	0	0	4	2	0	558
SABADO	21/08/2021	178	150	116	4	60	3	0	0	4	2	0	517
PARCIAL:		1221	1018	848	62	496	34	0	0	40	18	2	3739

Figura 27: Medición de tráfico diario en la Av. El Minero del 15/08/2021 – 21/08/2021 – Cerro de Pasco. Tomado Municipalidad Distrital de Simón Bolívar (2022).

Tabla 20. Factor de Corrección Estacional

Tipo de Tráfico	FCE
Liviano	1
Pesado	1.147

Nota. Valores adoptados según la Oficina de Desarrollo Vial Ministerio de Transportes y Comunicaciones que corresponde al período 2000 – 2010.

Tabla 21. Factor distribución de carril (L)

Nº de carriles en cada dirección	Porcentaje de ESAL de 18 kips en el carril de diseño
1	100
2	80 - 100
3	60 - 80
4	50 - 75

Nota. Adaptado de AASHTO (1986).

Con toda la información descrita, se determina el ESAL mediante el uso de las fórmulas que se describen a continuación, mismas que fueron descrita en el Capítulo 2.

$$IMDS = \sum \frac{V_i}{7}$$

$$IMDA = IMDS * FC$$

$$ESAL_{d,i} = IMDA_i * FE_i$$

$$ESAL_{D,0} = \sum ESAL_{d,i} * FE_i$$

$$G = \frac{1}{2} [1 + (1 + r)^Y]$$

$$ESAL = ESAL_{D,0} * (G) * (D) * (L) * (365) * (Y)$$

Donde:

IMDS: Índice Medio Diario Semanal o Promedio de Tráfico Diario Semanal

IMDA: Índice Medio Diario Anual

IMDA_i: Tránsito diario por clase

FC: Factor de Corrección Estacional

Vi: Volumen vehicular diario de cada uno de los 7 días de conteo volumétrico

ESAL_{D,0}: Número de promedio ejes equivalentes por día al inicio del periodo de diseño

r: razón de crecimiento anual del tráfico

G: Tasa de crecimiento vehicular

D: Factor de distribución direccional

L: Factor de líneas de tráfico

Y: Periodo de diseño

A continuación, se presenta los valores de cada parámetro necesario para el cálculo del ESAL, así como el valor de este último.

Tabla 22. Resumen de cálculo del ESAL

Tipo de Estratigrafía	General
Cant. Sentid.	2 sentidos
Carril/sentido	1
Y	20
r	0.012
G	1.135
D	0.5
L	1
ESAL _{d,o}	40.20
ESAL	1.665E+05

Nota: Elaboración propia

En segundo lugar, se calculan las propiedades de los materiales del pavimento. Con la información de resistencia de diseño del pavimento, se determinan los módulos de elasticidad y rotura empleando las siguientes fórmulas, cuyo resultado se presenta en la Tabla 23.

$$E_c = 15,000 * (f'_c)^{0.5}$$

$$S'_c = \alpha * (f'_c)^{0.5}$$

Donde,

E_c : Módulo de elasticidad

S'_c : Módulo de rotura

α : Coeficiente de correlación, varía entre 3.18 y 1.99

f'_c : Resistencia del concreto en kg/cm²

Tabla 23. Resultado de módulo de rotura y elasticidad de un concreto $f'_c=280$ kg/cm²

Parámetro	Valor	Unidades
E_c	3.5700E+06	psi
S_c	614.02	psi

Asimismo, el resultado del EMS (Estudio de Mecánica de Suelos) del lugar en estudio muestra una subrasante con suelos gravo-arenosos tipo GP, SP; cuyo CBR al 95% crítico es de 12% (Tabla 24). Según el MTC (2014), de forma simplificada, se recomienda que el espesor de la subbase sea de entre 10 y 20 cm, siempre que se trate de un suelo granular. Por tanto, para el diseño se considera un CBR del 12% en el escenario más crítico y un espesor de la subbase de 20 cm.

Tabla 24. Resultado de Calicatas en Av. El Minero y Jirón Huancavelica

Resultado de EMS	CALICATA N° 01	CALICATA N° 02
Clasificación SUCS	SP	GP
Clasificación AASHTO	A-1-a	A-1-a
Límite Líquido	0	0
Límite Plástico	0	0
Índice Plástico	0	0
Densidad Proctor (gr/cc)	2.07	2.09
Optima Humedad (%)	10.02	10.08
CBR AL 100%	16.6	20.3
CBR AL 95%	12	16

Nota: Tomado de la Municipalidad Distrital De Simon Bolivar, 2022.

Luego, el módulo de reacción de la subrasante (k) se calcular a partir del CBR de la subrasante en el ábaco de la Figura 28, el cual determina el efecto de la subrasante en la subbase. El valor de k obtenido es 6 kg/cm^3 .

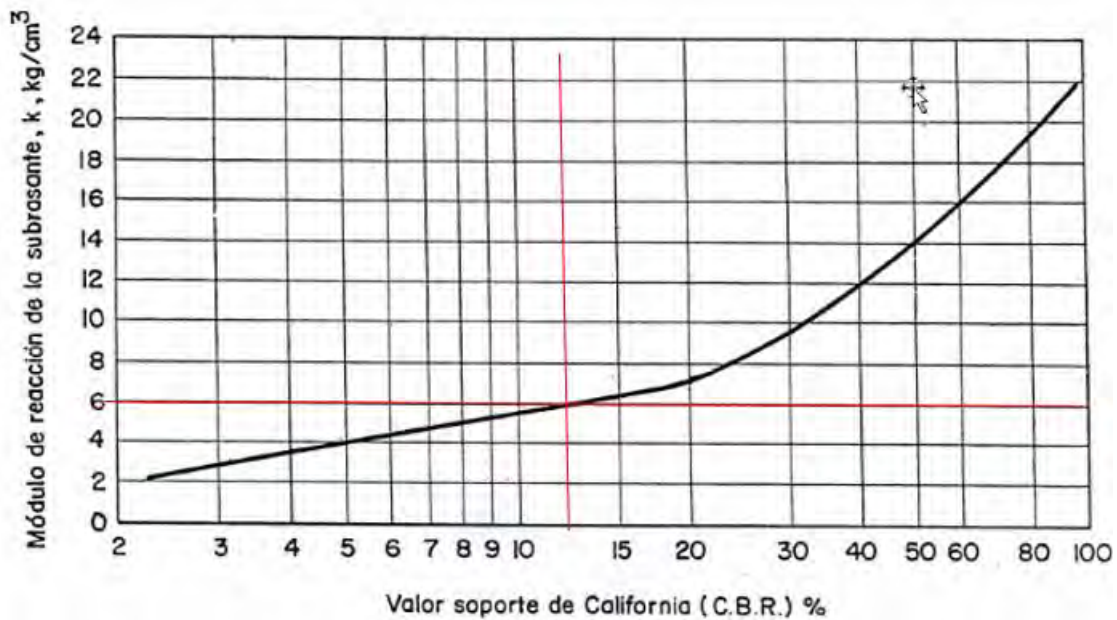


Figura 28. Módulo de reacción k (kg/cm^3) de la subrasante.

Tomado de AASHTO, 1986.

Luego, se calcula el módulo de reacción efectivo corregido k' (pci) de la subrasante y la base interpolando el valor de “ k ” y el espesor de la base en la Tabla 25 mostrada a continuación, con lo cual se obtuvo un k' igual a 380.07 pci. Complementariamente, el coeficiente de drenaje considerado es de 1.25 debido a que como el suelo es granular, la capacidad de drenaje es excelente (Tabla 26). En la Tabla 27 se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 25. Efecto de la subbase sin tratar en los valores de k (pci)

Valor de k de la subrasante (pci)	Valores de k' de la subbase (pci)			
	Espesor subbase (in)			
	4	6	9	12
50	65	75	85	110
100	130	140	160	190
200	220	230	270	320
300	320	330	370	430

Nota: Tomado de PCA (1984).

Tabla 26. Valores de coeficiente de drenaje recomendado (C_d) para el diseño de pavimentos rígidos

Calidad de Drenaje	Porcentaje de tiempo que la estructura del pavimento está expuesta a niveles de humedad cercanos a la saturación					
	Menos que 1%	1-5%		5-25%		Más de 25%
Excelente	1.25	1.2	1.15	1.15	1.10	1.10
Bueno	1.20	1.15	1.10	1.10	1.00	1.00
Regular	1.15	1.10	1.00	1.00	0.90	0.90
Pobre	1.10	1.00	0.90	0.90	0.80	0.80
Muy pobre	1.00	0.90	0.80	0.80	0.70	0.70

Nota: Tomado de AASHTO 93.

Tabla 27. Resultado de k y k' para una subrasante con CBR de 12 y una subbase de 20 cm.

Parámetro	Valor	Unidades
k	216.72	pci
k'	271.71	pci

Finalmente, el coeficiente de transferencia de carga (J) es de 3.2 para pavimentos con barra de transferencia. La pérdida de nivel de servicio (Δ PSI) se calcula a partir de los niveles de servicio

inicial y terminal, según la NTE CE0.10. En donde, para pavimentos rígidos, P_0 es 4.5 y, por el tipo de vía, colectora, P_t es 2.25. Como ya se mencionó anteriormente, el nivel de confiabilidad (R) es del 99 %, por lo que el valor del coeficiente de desviación estándar normal, Z_R , es -2.327 según la Tabla 28. Adicionalmente, la variabilidad en pavimentos rígidos (S_0) que se considera es de 0.39, debido a que se han tomado varios parámetros de referencias bibliográficas.

$$\Delta PSI = P_0 - P_t$$

Donde,

ΔPSI : Pérdida de nivel de servicio

P_0, P_t : Nivel de Servicio inicial y final respectivamente

Tabla 28. Coeficiente de desviación estándar normal Z_R

Confiabilidad (%)	Z_R
50	0
60	-0.253
70	-0.524
75	-0.674
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
99	-2.327
99.9	-3.09
99.99	-3.75

Nota. Adaptado de AASHTO, 1896.

A continuación, en la Tabla 29 se presenta el resumen de todos los parámetros para el cálculo del espesor, así como el valor del espesor de la losa del pavimento calculada mediante la ecuación descrita en el capítulo 2.3.1 del marco teórico. El espesor de la losa calculada con el AASHTO 93 resultó en 12 cm; sin embargo, el espesor final de la losa a construir debe ser de 15 cm, según lo descrito en la Norma Técnica CE.010 Pavimentos Urbanos (Tabla 30), pues el espesor mínimo de la capa de rodadura de un pavimento rígido para vías colectoras es de 15 cm (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento del Perú, 2010). Por lo tanto, la Norma Técnica Peruana establece diseños conservadores dentro de sus lineamientos metodológicos.

Tabla 29. Resultados del espesor de la losa del pavimento rígido en Cerro de Pasco

Parámetro	Valor	Unidades
Tráfico acumulado	1.665E+05	ESAL
Ec	3.5700E+06	psi
Sc	614.02	psi
k	216.72	pci
k'	271.71	pci
R	99	%
Zr	-2.327	
So	0.4	
Pt	2.25	
Delta PSI	2.25	
J	3.2	
Cd	1.25	
D (espesor losa)	4.71	in
D (espesor losa)	12	cm
*Df (espesor losa Final)	15	cm

Nota *Representa el espesor final del pavimento considerando la Norma CE.010 Pavimentos Urbanos.

Tabla 30. Requisitos mínimos de diseño para los diferentes tipos de pavimentos - Norma CE.010 Pavimentos Urbanos.

Elemento	Tipo de Pavimento		
	Flexible	Rígido	Adoquines
Sub-rasante	95% de compactación: Suelos Granulares - Próctor Modificado Suelos Cohesivos - Próctor Estándar		
Sub-base	Espesor compactado: ≥250 mm - Vías locales y colectoras ≥ 300 mm - Vías arteriales y expresas		
Base	CBR ≥ 40%	CBR ≥ 30%	
Imprimación/capa de apoyo	CBR ≥ 80%	N.A*	CBR ≥ 80%
Esesor de la capa de rodadura	Penetración de la Imprimación ≥ 5 mm	N.A*	Cama de arena fina, de espesor comprendido entre 25 y 40 mm
Vías locales	≥ 50 mm		≥ 60 mm
Vías colectoras	≥ 60 mm	≥ 150 mm	≥ 80 mm
Vías arteriales	≥ 70 mm		NR**
Vías expresas	≥ 80 mm	≥ 200 mm	NR**
Material	Concreto asfáltico***	MR ≥ 34 kg/cm ² (3.4 MPa)	f _c ≥ 380 kg/cm ² (38 MPa)

Nota. Adaptado de Norma CE.010 Pavimentos Urbanos. *N.A: No aplicable; ** N.R: No Recomendable; ***

El concreto asfáltico debe ser preferentemente con mezcla en caliente. Donde el proyecto considere mezclas en frío, estas deben ser hechas con asfalto emulsificado. Adaptado de la Norma CE.010 Pavimentos Urbanos. Tomado de PCA (1984).

Finalmente, se presenta el diseño final del pavimento rígido en la Figura 29, el cual cumple con los requisitos mínimos para los diferentes tipos de pavimentos por la Norma CE.010 Pavimentos Urbanos descrito en la Tabla 30.

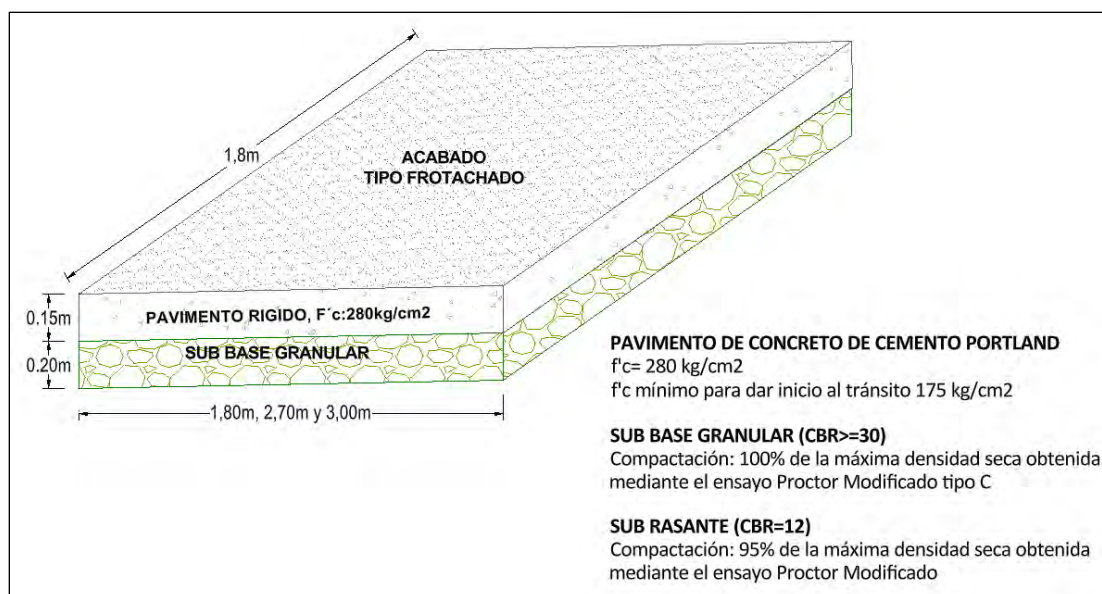


Figura 29. Diseño Final de Pavimento rígido con la metodología empírica AASHTO 1993.

4.2. Diseño de un pavimento rígido con el método Mecanístico-Empírico

En este inciso, se describe el proceso de diseño Mecanístico-Empírico de un pavimento de concreto con juntas (Jointed Plain Concrete Pavement – JPCP) utilizando el software *AASHTOWare Pavement ME Design 2013 (PMED)* - versión 1.3. A continuación, se muestra la interfaz principal del software (Figura 30), la cual está seccionada de la siguiente forma: menú, panel de exploración, pestaña de proyecto, panel de salida, lista de errores y comparaciones, y panel de progreso. El diseño consta de colocar datos de ingreso de información general del proyecto, tráfico, clima y caracterización de los materiales según lo comentado en el Capítulo 2. Asimismo, la data de tráfico se obtuvo del conteo vehicular realizado en la Av. El Minero en Cerro de Pasco. Cabe señalar que, los factores de calibración empleados son los predeterminados por el software.

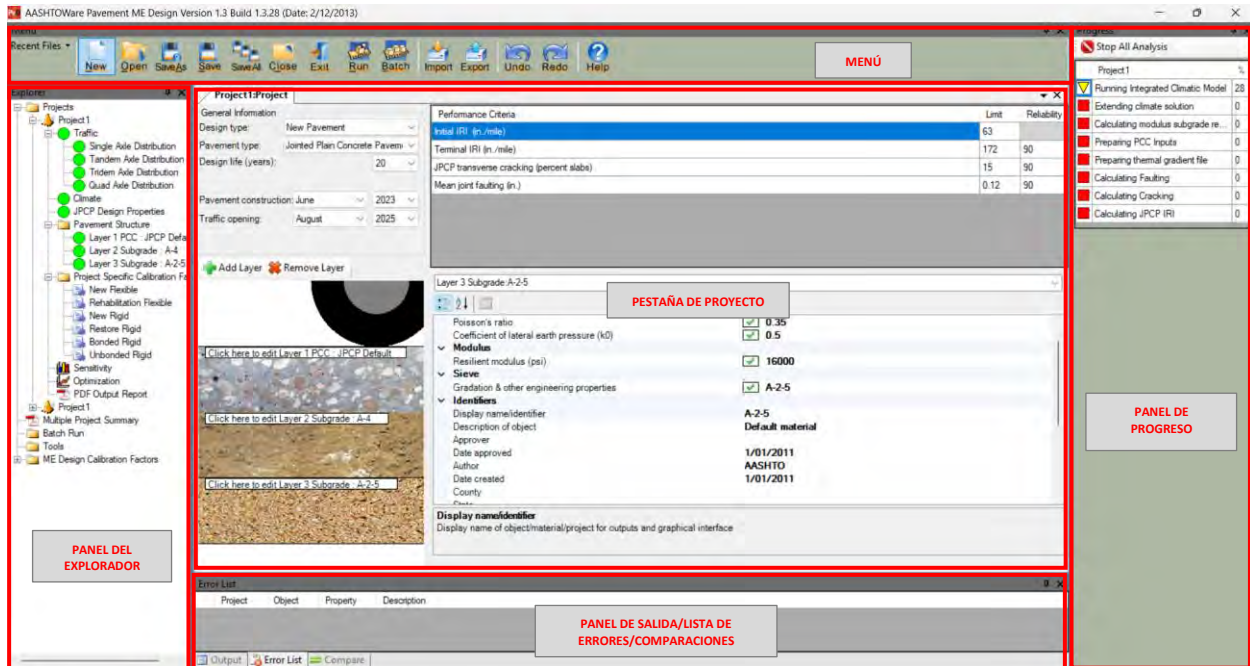


Figura 30. Interface principal de AASHTOWare Pavement ME Design.

4.2.1. Información general

Se requiere datos del proyecto con la finalidad de determinar el punto de inicio temporal y espacial de los elementos a analizar. Los datos requeridos son el tipo de diseño de pavimento (nuevo o rehabilitado), tipo de pavimento (flexible o rígido), período de vida del pavimento, así como el mes y año del término de la construcción del pavimento y la apertura al tráfico de la vía.

El proyecto por diseñar se denomina ‘‘Diseño Cerro de Pasco’’, en el cual se diseña un pavimento nuevo rígido con una vida útil de 20 años. La construcción de la carpeta de rodadura del pavimento se considera desde setiembre del 2023 y se abre al tránsito en diciembre del 2024. En la Figura 31 se muestra la información general del proyecto en el software.

General Information			
Design type:	New Pavement		
Pavement type:	Jointed Plain Concrete Pavement		
Design life (years):	20		
Pavement construction:	June	2028	
Traffic opening:	September	2028	

Figura 31. Datos de entrada de la información general del proyecto en el software PMED.

4.2.2. Criterios de desempeño

Los indicadores de desempeño para el diseño de pavimento rígido de este proyecto se basan en las recomendaciones de la Guía de Diseño AASHTO 2015. En la Tabla 31 que se presenta a continuación se muestran los valores de los criterios de desempeño límite, extraídos de la Tabla 11. Se espera que, al final de los 20 años de vida útil del pavimento, el Índice de Rugosidad Internacional (IRI) sea menor o igual a 200 pulgadas/milla. El IRI inicial considerado es de 63 pulg/milla, un valor recomendado para pavimentos JCPC según el MEPDG 2015. Asimismo, el porcentaje de fisuramiento transversal de la losa no debe superar el 15% y el escalonamiento promedio de las juntas no debe exceder 0.2 pulgadas. Si bien es cierto que el MEPDG 2015 sugiere que el valor del nivel de confiabilidad para vías colectoras urbanas sea 80% (Tabla 12), para el diseño se ha considerado 99% para asegurar que la probabilidad de daño en el pavimento durante el periodo de diseño sea menor que un nivel crítico, mismo valor considerado para el diseño con el AASHTO 93.

Tabla 31. Datos de entrada de los indicadores de desempeño en software

Criterios de Desempeño	Valor Umbral
IRI inicial (pulg/milla)	63
IRI terminal (pulg/milla)	200
Fisuramiento transversal de la losa (%)	15
Escalonamiento promedio de juntas	0.2

Nota. Elaboración propia.

En Figura 32, se muestran los datos recolectados de los valores de los criterios de desempeño límite y su confiabilidad ingresados en el software.

Performance Criteria	Limit	Reliability
Initial IRI (in./mile)	63	
Terminal IRI (in./mile)	200	99
JPCP transverse cracking (percent slabs)	15	99
Mean joint faulting (in.)	0.2	99

Figura 32. Valores de los criterios de desempeño límite y nivel de confiabilidad ingresados en el PMED.

4.2.3. Caracterización del tránsito

La metodología ME del AASHTO caracteriza el tráfico mediante espectros de carga por eje para cada tipo de eje y cada clase de vehículo, junto con otros parámetros propios de un estudio vial. Para ello, el MEPDG 2015 considera cuatro fuentes para obtener datos de tráfico: pesaje en movimiento (WIM, Weigh-In-Motion), clasificación automatizada de vehículos (AVC), conteo vehicular, y modelos de generación de viajes y pronósticos de tráfico. Asimismo, los parámetros que conforman la caracterización del tránsito, según la guía, se detallan en la siguiente imagen:

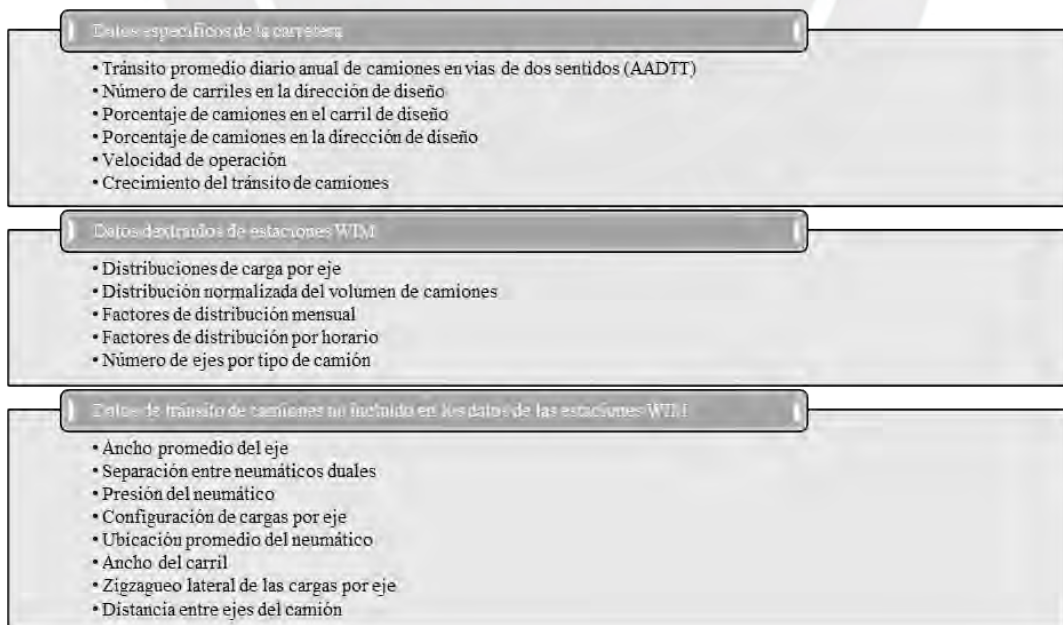


Figura 33. Datos de entrada de tránsito de camiones según el MEPDG 2015. Elaboración propia.

Dado que la ciudad de Cerro de Pasco no cuenta con una base de datos sobre la caracterización de tráfico con el método mecanístico empírico, los parámetros de tránsito que se ingresan al software PMED para el diseño son de jerarquía de Nivel 1 y 3. Dichos valores se basan en el estudio de tráfico realizado para la interconexión de la Av. El Minero y Jr. Huancavelica en Cerro de Pasco, por la Municipalidad Distrital de Simón Bolívar (2022). En la Figura 34 se muestra la interfaz del software sobre la cual se colocan los datos del tránsito.

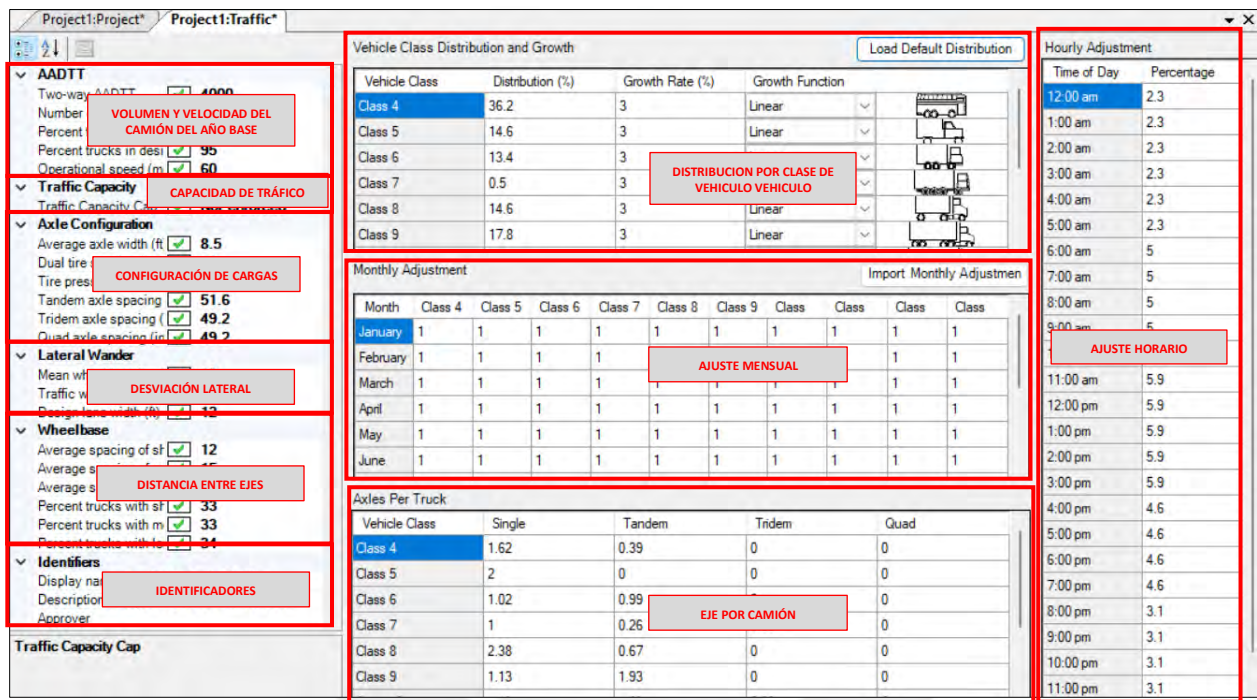


Figura 34. Interface del software para la caracterización del tránsito.

Volumen y velocidad de camiones

El tramo de vía a analizar posee 2 sentidos, 1 carril en cada sentido de diseño y la razón de crecimiento anual del tráfico es de 1.2%. El tráfico promedio diario anual inicial de camiones (AADTT, por sus siglas en inglés) en las dos direcciones es 22 camiones. El porcentaje de camiones en la dirección de diseño es 51.1% y el porcentaje de camiones en el carril de diseño es 100%, pues solo hay un carril en cada sentido. Cabe resaltar que, el MEPDG solo considera

vehículos pesados (camiones) para caracterizar el tráfico. Adicionalmente, la velocidad de operación a escoger es 60 Km/h (38 mph) cuyo valor se determinó con base en el Manual de Carreteras: Diseño Geométrico DG-2018. En la Figura 35 se muestra la ventana del software con los valores de los parámetros mencionados ingresados.

▼ AADTT		
Two-way AADTT	<input checked="" type="checkbox"/>	22
Number of lanes	<input checked="" type="checkbox"/>	2
Percent trucks in design direction	<input checked="" type="checkbox"/>	51.1
Percent trucks in design lane	<input checked="" type="checkbox"/>	100
Operational speed (mph)	<input checked="" type="checkbox"/>	38

Figura 35. Datos de entrada generales del tránsito en el software PMED 2013.

Capacidad de tráfico

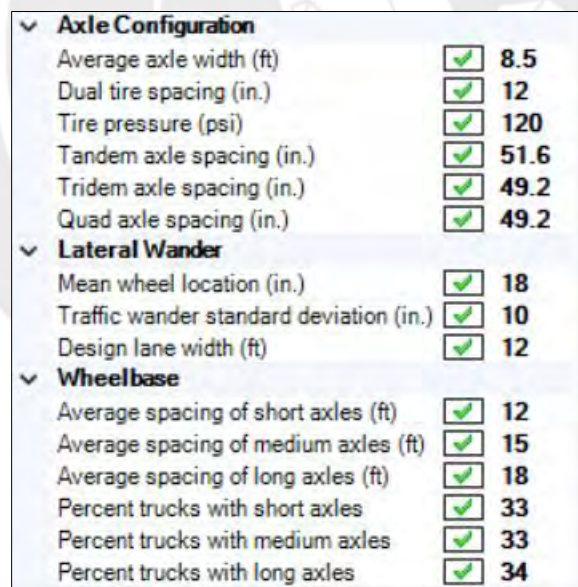
La capacidad de tráfico permite establecer un límite en los volúmenes de tráfico estimados utilizados en el diseño y análisis, con el fin de no exceder la capacidad prevista de la autopista. En la Figura 36, se observa que tanto el ADT como la tasa de crecimiento vehicular, son los mismos valores considerados para el diseño de pavimentos con el AASHTO 93.

bgrade : A-2-7		▼ Traffic Capacity	
c Calibration Factors		Traffic Capacity Cap	<input checked="" type="checkbox"/> nforced
Annual average daily traffic excluding trucks (i.e. cars) 526			
Non-truck linear traffic growth rate (%):		1.2	
Highway facility type:		Freeway (0) ▼	
<input type="checkbox"/> Traffic lights			
Highway terrain type:		Level (0) ▼	
Rural or urban highway environment:		Urban (0) ▼	
<input type="checkbox"/> User-Specified Capacity Limit		155520	
<input checked="" type="checkbox"/> Enforce highway capacity limits			

Figura 36. Datos de diseño para la capacidad de tráfico en el PMED v1.3.

Configuración de cargas, desviación lateral y distancia entre ejes

Los valores de los parámetros que forman parte de la configuración de cargas (*Axel Configuration*), la desviación lateral (*Lateral Wander*) y la distancia entre ejes (*Wheelbase*) son predeterminados en el software – Nivel 3 de datos de entrada y corresponden a valores sugeridos por el AASHTO 2015. Es importante mencionar que los valores por defecto que incluye el PMED corresponden a vehículos y ejes de tipo americano, los cuales fueron obtenidos del análisis de datos de alrededor de 200 estaciones de pesaje (WIM, por sus siglas en inglés) del programa LTPP de Estados Unidos (AASHTO, 2015). En la siguiente imagen se muestra que el ancho del carril de diseño predeterminado en el software es de 12 ft (3.66 m), lo cual es razonable para una vía colectora por la que circula el transporte público. El Manual de Diseño Geométrico del MTC recomienda un ancho de 3.2 m.



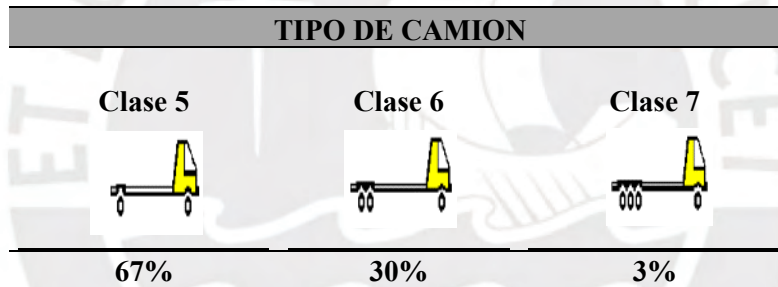
▼ Axle Configuration		
Average axle width (ft)	<input checked="" type="checkbox"/>	8.5
Dual tire spacing (in.)	<input checked="" type="checkbox"/>	12
Tire pressure (psi)	<input checked="" type="checkbox"/>	120
Tandem axle spacing (in.)	<input checked="" type="checkbox"/>	51.6
Tridem axle spacing (in.)	<input checked="" type="checkbox"/>	49.2
Quad axle spacing (in.)	<input checked="" type="checkbox"/>	49.2
▼ Lateral Wander		
Mean wheel location (in.)	<input checked="" type="checkbox"/>	18
Traffic wander standard deviation (in.)	<input checked="" type="checkbox"/>	10
Design lane width (ft)	<input checked="" type="checkbox"/>	12
▼ Wheelbase		
Average spacing of short axles (ft)	<input checked="" type="checkbox"/>	12
Average spacing of medium axles (ft)	<input checked="" type="checkbox"/>	15
Average spacing of long axles (ft)	<input checked="" type="checkbox"/>	18
Percent trucks with short axles	<input checked="" type="checkbox"/>	33
Percent trucks with medium axles	<input checked="" type="checkbox"/>	33
Percent trucks with long axles	<input checked="" type="checkbox"/>	34

Figura 37. Valores por defecto en el PMED v1.3 para la caracterización del tránsito.

Distribución por clase de vehículo

Por un lado, la distribución por clase de vehículos puede obtenerse de dos formas: Nivel 1, a partir del estudio de tráfico de la Av. El Minero; Nivel 3, cargando la distribución por defecto del software, el cual está en función de la mejor combinación de tráfico del proyecto para un grupo de Clasificación de Tráfico de Camiones (TTC, por sus siglas en inglés) según se detalla en la Tabla 32. Para el presente diseño, se toman los datos obtenidos del conteo de tránsito por la Municipalidad Distrital Simón Bolívar y se determina la distribución de camiones a partir de la clasificación de vehículos pesados según la Administración Federal de Carreteras (FHWA, por sus siglas en inglés), las cuales se muestran en la Tabla 32 y Figura 38.

Tabla 32. Distribución porcentual de tránsito de camiones según la clasificación de vehículos de la FHWA.














Vehicle Class Distribution and Growth				Load Default Distribution
Vehicle Class	Distribution (%)	Growth Rate (%)	Growth Function	
Class 4	0	1.2	Linear	
Class 5	66.7	1.2	Linear	
Class 6	30	1.2	Linear	
Class 7	3.3	1.2	Linear	
Class 8	0	1.2	Linear	
Class 9	0	1.2	Linear	
Class 10	0	1.2	Linear	
Class 11	0	1.2	Linear	
Class 12	0	1.2	Linear	
Class 13	0	1.2	Linear	
Total	100			

Figura 38. Interfaz de PMED sobre la distribución por clase de vehículo con una razón de crecimiento de

1.2.

Ajuste horario y mensual

El factor de ajuste mensual es un dato de entrada de nivel 3 y se considera como valor 1, asumiendo que no hay variaciones estacionales en el volumen de camiones (Figura 39). Este factor se calcula dividiendo el tráfico mensual de camiones de una clase dada entre el tráfico total de camiones de dicha clase durante todo el año. Los valores de ajuste horario son predeterminados por el PMED.

Monthly Adjustment											Hourly Adjustment	
Month	Class 4	Class 5	Class 6	Class 7	Class 8	Class 9	Class 10	Class 11	Class 12	Class 13	Time of Day	Percentage
January	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	12:00 am	2.3
February	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1:00 am	2.3
March	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2:00 am	2.3
April	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3:00 am	2.3
May	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	4:00 am	2.3
June	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	5:00 am	2.3
July	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	6:00 am	5
August	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	7:00 am	5
Septem...	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	8:00 am	5
October	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	9:00 am	5
Novem...	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	10:00 am	5.9
Decem...	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	11:00 am	5.9
											12:00 pm	5.9
											1:00 pm	5.9
											2:00 pm	5.9
											3:00 pm	5.9
											4:00 pm	4.6
											5:00 pm	4.6
											6:00 pm	4.6
											7:00 pm	4.6
											8:00 pm	3.1
											9:00 pm	3.1
											10:00 pm	3.1
											11:00 pm	2.1

Figura 39. Ajuste mensual en el software PMED v1.3.

Ejes por camión

La tabla de ejes por camión del PMED permite determinar el número promedio de ejes para cada clase de camión y tipo de eje (simple, tándem, trídem y cuádruple). Los valores mostrados en la siguiente figura son los que se encuentran por defecto en el software.

Axles Per Truck				
Vehicle Class	Single	Tandem	Tridem	Quad
Class 4	1.62	0.39	0	0
Class 5	2	0	0	0
Class 6	1.02	0.99	0	0
Class 7	1	0.26	0.83	0
Class 8	2.38	0.67	0	0
Class 9	1.13	1.93	0	0
Class 10	1.19	1.09	0.89	0
Class 11	4.29	0.26	0.06	0
Class 12	3.52	1.14	0.06	0
Class 13	2.15	2.13	0.35	0

Figura 40. Número promedio de ejes por cada tipo de camión y eje en PMED v1.3

Distribución normalizada de carga por eje

La distribución normalizada de carga del eje representa el porcentaje del total de aplicaciones del eje dentro de cada intervalo de carga para un tipo específico (simple, tándem, trídem y cuádruple) y una clase de vehículo (Clase 4 a 13), los cuales se detallan en la siguiente Figura 41.

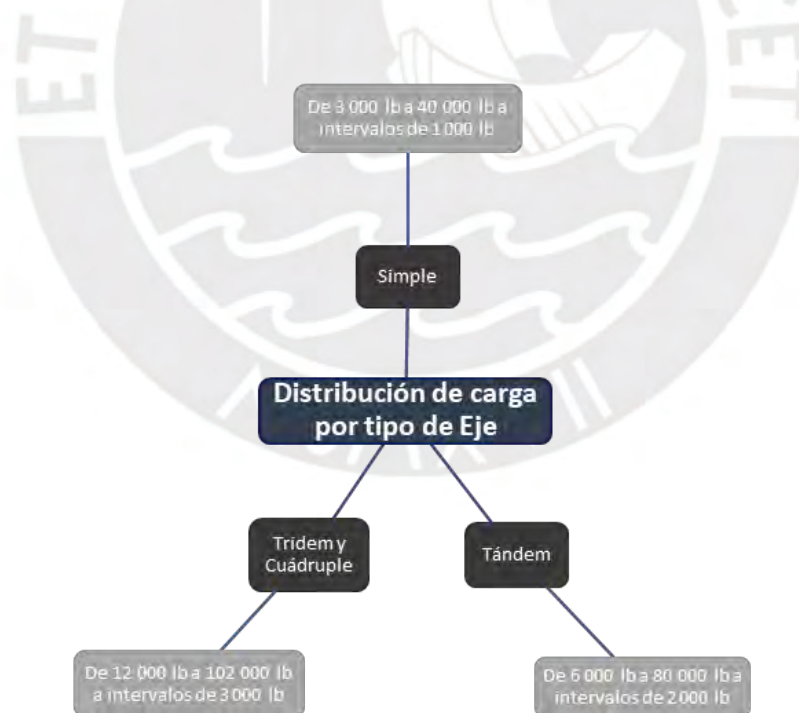


Figura 41. Distribución de carga por eje en el software. Fuente: elaboración propia.

Dado que no se cuenta con información de estaciones de pesaje (WIM) para el lugar en estudio, se utiliza las distribuciones de carga que se encuentran por defecto en el software PMED 2013 (v1.3) para los camiones con ejes simple, tándem, trídem y cuádruple.

CERRO DE PASCO 2026 V1:Single																		
Month	Class	Total	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000	11000	12000	13000	14000	15000	16000	17000	18000
January	4	100	1.8	0.96	2.91	3.99	6.8	11.47	11.3	10.97	9.88	8.54	7.33	5.55	4.23	3.11	2.54	1.98
January	5	100	10.05	13.21	16.42	10.61	9.22	8.27	7.12	5.85	4.53	3.46	2.56	1.92	1.54	1.19	0.9	0.68
January	6	100	2.47	1.78	3.45	3.95	6.7	8.45	11.85	13.57	12.13	9.48	6.83	5.05	3.74	2.66	1.92	1.43
January	7	100	2.14	0.55	2.42	2.7	3.21	5.81	5.26	7.39	6.85	7.42	8.99	8.15	7.77	6.84	5.67	4.63
January	8	100	11.65	5.37	7.84	6.99	7.99	9.63	9.93	8.51	6.47	5.19	3.99	3.38	2.73	2.19	1.83	1.53
January	9	100	1.74	1.37	2.84	3.53	4.93	8.43	13.67	17.68	16.71	11.57	6.09	3.52	1.91	1.55	1.1	0.88
January	10	100	3.64	1.24	2.36	3.38	5.18	8.35	13.85	17.35	16.21	10.27	6.52	3.94	2.33	1.57	1.07	0.71
January	11	100	3.55	2.91	5.19	5.27	6.32	6.98	8.08	9.68	8.55	7.29	7.16	5.65	4.77	4.35	3.56	3.02
January	12	100	6.68	2.29	4.87	5.86	5.97	8.86	9.58	9.94	8.59	7.11	5.87	6.61	4.55	3.63	2.56	2
January	13	100	8.88	2.67	3.81	5.23	6.03	8.1	8.35	10.69	10.69	11.11	7.32	3.78	3.1	2.58	1.52	1.32
February	4	100	1.8	0.96	2.91	3.99	6.8	11.47	11.31	10.97	9.88	8.54	7.32	5.55	4.23	3.11	2.54	1.98
February	5	100	10.03	13.21	16.41	10.61	9.24	8.27	7.12	5.85	4.54	3.46	2.56	1.92	1.54	1.19	0.9	0.68
February	6	100	2.47	1.78	3.45	3.95	6.7	8.45	11.87	13.57	12.13	9.47	6.82	5.05	3.74	2.66	1.92	1.43
February	7	100	2.14	0.55	2.42	2.7	3.21	5.81	5.26	7.38	6.85	7.41	8.99	8.16	7.78	6.84	5.67	4.63
February	8	100	11.65	5.36	7.83	6.99	7.99	9.64	9.93	8.51	6.47	5.19	3.99	3.39	2.73	2.19	1.83	1.53
February	9	100	1.74	1.37	2.84	3.53	4.93	8.43	13.68	17.68	16.71	11.56	6.09	3.52	1.91	1.55	1.1	0.88
February	10	100	3.64	1.24	2.36	3.38	5.18	8.34	13.85	17.35	16.21	10.28	6.52	3.94	2.33	1.57	1.07	0.71
February	11	100	3.55	2.91	5.19	5.27	6.33	6.98	8.08	9.68	8.55	7.28	7.16	5.65	4.77	4.35	3.56	3.02
February	12	100	6.68	2.29	4.88	5.87	5.98	8.86	9.58	9.95	8.61	7.09	5.86	6.58	4.55	3.63	2.56	2
February	13	100	8.88	2.67	3.81	5.23	6.04	8.1	8.35	10.69	10.69	11.11	7.31	3.78	3.1	2.58	1.52	1.32
March	4	100	1.8	0.96	2.91	3.99	6.81	11.45	11.31	10.97	9.88	8.54	7.33	5.55	4.23	3.11	2.54	1.98
March	5	100	10.04	13.21	16.41	10.59	9.23	8.28	7.13	5.86	4.53	3.46	2.56	1.92	1.54	1.19	0.9	0.68
March	6	100	2.47	1.78	3.45	3.95	6.7	8.44	11.87	13.57	12.14	9.47	6.82	5.05	3.74	2.66	1.92	1.43
March	7	100	2.14	0.55	2.42	2.7	3.21	5.81	5.26	7.38	6.85	7.43	8.99	8.15	7.77	6.84	5.67	4.63

Figura 42. Distribución de carga por defecto para vehículos con eje simple del PMED v1.3.

CERRO DE PASCO 202....Tandem																		
Month	Class	Total	6000	8000	10000	12000	14000	16000	18000	20000	22000	24000	26000	28000	30000	32000	34000	360
January	4	100	5.88	1.44	1.94	2.73	3.63	4.96	7.95	11.58	14.2	13.15	10.73	7.47	5.08	3.12	1.87	1.3
January	5	100	7.06	35.44	13.24	6.32	4.33	5.08	5.05	4.39	2.31	2.28	1.53	1.96	1.89	2.19	1.74	1.78
January	6	100	5.28	8.43	10.83	8.99	7.72	7.5	6.76	6.06	5.71	5.17	4.52	3.9	3.21	3.91	2.12	1.74
January	7	100	13.76	6.72	6.5	3.46	7.07	4.83	4.97	4.58	4.26	3.85	3.44	6.03	3.68	2.98	2.89	2.54
January	8	100	18.93	8.07	11.17	11.87	10.53	8.26	6.78	5.33	4.13	3.12	2.34	1.82	1.58	1.2	1.05	0.94
January	9	100	2.78	3.92	6.52	7.62	7.75	7.01	5.83	5.6	5.17	5.05	5.28	5.53	6.13	6.28	5.67	4.46
January	10	100	2.45	2.19	3.65	5.4	6.9	7.49	6.99	6.62	6.26	5.95	6.16	6.54	6.24	5.92	4.99	3.63
January	11	100	7.93	3.15	5.21	8.23	8.88	8.45	7.08	5.49	5.14	5.99	5.73	4.37	6.58	4.61	4.48	2.91
January	12	100	5.23	1.75	3.35	5.89	8.73	8.38	9.77	10.84	10.78	7.24	6.14	4.93	3.93	3.09	2.74	1.73
January	13	100	6.42	3.85	5.59	5.67	5.74	5.54	4.9	4.5	6.45	4.77	4.34	5.63	7.24	4.69	4.51	3.93
February	4	100	5.88	1.44	1.94	2.73	3.63	4.96	7.95	11.58	14.2	13.15	10.73	7.47	5.08	3.12	1.87	1.3
February	5	100	7.06	35.44	13.24	6.32	4.33	5.08	5.05	4.39	2.31	2.28	1.53	1.96	1.89	2.19	1.74	1.78
February	6	100	5.28	8.43	10.83	8.99	7.72	7.5	6.76	6.06	5.71	5.17	4.52	3.9	3.21	3.91	2.12	1.74
February	7	100	13.76	6.72	6.5	3.46	7.07	4.83	4.97	4.58	4.26	3.85	3.44	6.03	3.68	2.98	2.89	2.54
February	8	100	18.93	8.07	11.17	11.87	10.53	8.26	6.78	5.33	4.13	3.12	2.34	1.82	1.58	1.2	1.05	0.94
February	9	100	2.78	3.92	6.52	7.62	7.75	7.01	5.83	5.6	5.17	5.05	5.28	5.53	6.13	6.28	5.67	4.46
February	10	100	2.45	2.19	3.65	5.4	6.9	7.49	6.99	6.62	6.26	5.95	6.16	6.54	6.24	5.92	4.99	3.63
February	11	100	7.93	3.15	5.21	8.23	8.88	8.45	7.08	5.49	5.14	5.99	5.73	4.37	6.58	4.61	4.48	2.91
February	12	100	5.23	1.75	3.35	5.89	8.73	8.38	9.77	10.84	10.78	7.24	6.14	4.93	3.93	3.09	2.74	1.73
February	13	100	6.42	3.85	5.59	5.67	5.74	5.54	4.9	4.5	6.45	4.77	4.34	5.63	7.24	4.69	4.51	3.93
March	4	100	5.88	1.44	1.94	2.73	3.63	4.96	7.95	11.58	14.2	13.15	10.73	7.47	5.08	3.12	1.87	1.3
March	5	100	7.06	35.44	13.24	6.32	4.33	5.08	5.05	4.39	2.31	2.28	1.53	1.96	1.89	2.19	1.74	1.78
March	6	100	5.28	8.43	10.83	8.99	7.72	7.5	6.76	6.06	5.71	5.17	4.52	3.9	3.21	3.91	2.12	1.74
March	7	100	13.76	6.72	6.5	3.46	7.07	4.83	4.97	4.58	4.26	3.85	3.44	6.03	3.68	2.98	2.89	2.54

Figura 43. Distribución de carga por defecto para vehículos con eje tándem del PMED v1.3.

CERRO DE PASCO 2026 V1:Tridem																		
Month	Class	Total	12000	15000	18000	21000	24000	27000	30000	33000	36000	39000	42000	45000	48000	51000	54000	€
January	4	100	66.67	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26.66	6.67	0	0	0	0
January	5	100	48.28	1.08	0.43	0.15	0.73	3.13	3.83	0.7	15.59	0.7	3.48	2.93	3.33	1.78	4.48	0
January	6	100	29.51	9.2	7.6	10.35	4.73	3.55	6.27	4.18	2.11	2.22	1.79	1.7	1.19	3.12	0.96	0
January	7	100	5.89	2.18	3.32	2.98	3.27	4.26	4.48	5.11	7.01	6.77	7.21	7.18	6.63	5.84	6.2	6
January	8	100	20.89	2.33	3.34	4.26	3.71	4.32	5.24	4.89	3.91	5	3.99	4.53	4.96	4.98	5.98	5
January	9	100	59.19	13.03	7.89	6.51	2.78	1.87	2.51	1.02	0.66	0.55	0.59	0.84	0.36	0.46	0.27	0
January	10	100	16.21	9.51	7.3	5.83	5.82	5.03	4.99	5.79	6.71	7.41	6.41	4.93	4.54	2.82	1.79	1
January	11	100	23.31	20.89	15.88	12	5.8	2.61	2.08	2.06	2.94	1.1	2.98	1.95	1.87	0.72	1.27	0
January	12	100	13.28	6.38	6.74	6	4.37	4.53	8.01	5.61	6.25	8.04	6.7	6.08	3.48	5.81	2.22	0
January	13	100	10.86	4.4	4.75	4.04	3.02	4.46	4.99	3.82	6.51	5.49	6.53	5.19	6.32	5.2	5.47	4
February	4	100	66.67	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26.66	6.67	0	0	0	0
February	5	100	48.28	1.08	0.43	0.15	0.73	3.13	3.83	0.7	15.59	0.7	3.48	2.93	3.33	1.78	4.48	0
February	6	100	29.51	9.2	7.6	10.35	4.73	3.55	6.27	4.18	2.11	2.22	1.79	1.7	1.19	3.12	0.96	0
February	7	100	5.89	2.18	3.32	2.98	3.27	4.26	4.48	5.11	7.01	6.77	7.21	7.18	6.63	5.84	6.2	6
February	8	100	20.89	2.33	3.34	4.26	3.71	4.32	5.24	4.89	3.91	5	3.99	4.53	4.96	4.98	5.98	5
February	9	100	59.19	13.03	7.89	6.51	2.78	1.87	2.51	1.02	0.66	0.55	0.59	0.84	0.36	0.46	0.27	0
February	10	100	16.21	9.51	7.3	5.83	5.82	5.03	4.99	5.79	6.71	7.41	6.41	4.93	4.54	2.82	1.79	1
February	11	100	23.31	20.89	15.88	12	5.8	2.61	2.08	2.06	2.94	1.1	2.98	1.95	1.87	0.72	1.27	0
February	12	100	13.28	6.38	6.74	6	4.37	4.53	8.01	5.61	6.25	8.04	6.7	6.08	3.48	5.81	2.22	0
February	13	100	10.86	4.4	4.75	4.04	3.02	4.46	4.99	3.82	6.51	5.49	6.53	5.19	6.32	5.2	5.47	4
March	4	100	66.67	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26.66	6.67	0	0	0	0
March	5	100	48.28	1.08	0.43	0.15	0.73	3.13	3.83	0.7	15.59	0.7	3.48	2.93	3.33	1.78	4.48	0
March	6	100	29.51	9.2	7.6	10.35	4.73	3.55	6.27	4.18	2.11	2.22	1.79	1.7	1.19	3.12	0.96	0
March	7	100	5.89	2.18	3.32	2.98	3.27	4.26	4.48	5.11	7.01	6.77	7.21	7.18	6.63	5.84	6.2	6

Figura 44. Distribución de carga por defecto para vehículos con eje tridem del PMED v1.3.

CERRO DE PASCO 2026 V1:Quad																		
Month	Class	Total	12000	15000	18000	21000	24000	27000	30000	33000	36000	39000	42000	45000	48000	51000	54000	€
January	4	100	66.66	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26.67	6.67	0	0	0	0
January	5	100	48.31	1.07	0.43	0.15	0.73	3.12	3.83	0.7	15.61	0.7	3.47	2.93	3.33	1.78	4.47	0
January	6	100	29.5	9.2	7.6	10.36	4.73	3.55	6.27	4.18	2.11	2.22	1.79	1.7	1.19	3.12	0.96	0
January	7	100	5.89	2.18	3.32	2.98	3.27	4.26	4.48	5.11	7.01	6.77	7.21	7.18	6.63	5.84	6.2	6
January	8	100	20.89	2.33	3.34	4.26	3.71	4.32	5.24	4.89	3.91	5	3.99	4.53	4.96	4.98	5.98	5
January	9	100	59.19	13.03	7.89	6.51	2.78	1.87	2.51	1.02	0.66	0.55	0.59	0.84	0.36	0.46	0.27	0
January	10	100	16.21	9.51	7.29	5.83	5.82	5.04	4.99	5.79	6.71	7.41	6.41	4.93	4.54	2.82	1.79	1
January	11	100	23.31	20.89	15.88	12	5.8	2.61	2.08	2.06	2.94	1.1	2.98	1.95	1.87	0.72	1.27	0
January	12	100	13.28	6.38	6.74	6	4.37	4.53	8.01	5.61	6.25	8.04	6.7	6.08	3.48	5.81	2.22	0
January	13	100	10.87	4.4	4.75	4.04	3.02	4.46	4.99	3.82	6.51	5.49	6.52	5.19	6.32	5.2	5.47	4
February	4	100	66.66	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26.67	6.67	0	0	0	0
February	5	100	48.31	1.07	0.43	0.15	0.73	3.12	3.83	0.7	15.61	0.7	3.47	2.93	3.33	1.78	4.47	0
February	6	100	29.5	9.2	7.6	10.36	4.73	3.55	6.27	4.18	2.11	2.22	1.79	1.7	1.19	3.12	0.96	0
February	7	100	5.89	2.18	3.32	2.98	3.27	4.26	4.48	5.11	7.01	6.77	7.21	7.18	6.63	5.84	6.2	6
February	8	100	20.89	2.33	3.34	4.26	3.71	4.32	5.24	4.89	3.91	5	3.99	4.53	4.96	4.98	5.98	5
February	9	100	59.19	13.03	7.89	6.51	2.78	1.87	2.51	1.02	0.66	0.55	0.59	0.84	0.36	0.46	0.27	0
February	10	100	16.21	9.51	7.29	5.83	5.82	5.04	4.99	5.79	6.71	7.41	6.41	4.93	4.54	2.82	1.79	1
February	11	100	23.31	20.89	15.88	12	5.8	2.61	2.08	2.06	2.94	1.1	2.98	1.95	1.87	0.72	1.27	0
February	12	100	13.28	6.38	6.74	6	4.37	4.53	8.01	5.61	6.25	8.04	6.7	6.08	3.48	5.81	2.22	0
February	13	100	10.87	4.4	4.75	4.04	3.02	4.46	4.99	3.82	6.51	5.49	6.52	5.19	6.32	5.2	5.47	4
March	4	100	66.66	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26.67	6.67	0	0	0	0
March	5	100	48.31	1.07	0.43	0.15	0.73	3.12	3.83	0.7	15.61	0.7	3.47	2.93	3.33	1.78	4.47	0
March	6	100	29.5	9.2	7.6	10.36	4.73	3.55	6.27	4.18	2.11	2.22	1.79	1.7	1.19	3.12	0.96	0
March	7	100	5.89	2.18	3.32	2.98	3.27	4.26	4.48	5.11	7.01	6.77	7.21	7.18	6.63	5.84	6.2	6

Figura 45. Distribución de carga por defecto para vehículos con eje cuádruple del PMED v1.3.

4.2.4. Caracterización del clima

Los datos climáticos requeridos son específicos para cada proyecto según su ubicación. Para el diseño actual, se importa al software del MEPDG el archivo virtual “CERRO DE PASCO.icm” obtenido en el Capítulo 3. Cabe señalar que el PMED simula la variación de las condiciones climáticas en las diferentes capas del pavimento, principalmente la temperatura y la humedad, durante su vida útil mediante el Modelo Climático Integrado Mejorado (EICM, *Enhanced Integrated Climatic Model*) que incorpora. La interfaz del software relacionado con el clima se presenta a continuación.

The screenshot displays the software interface for climate data. On the left, the 'Climate Station' and 'Identifiers' sections are visible. The 'Climate Station' section includes: Longitude (decimal degrees) -76.2566, Latitude (decimals degrees) -10.66748, Elevation (ft) 14370.08, Depth of water table (ft) Annual(6.07), and Climate station CERRO DE PASCO, PE (11111). The 'Identifiers' section includes: Display name/identifier, Description of object, Approver, Date approved 9/01/2026 20:31, Author, Date created 9/01/2026 20:31, County, State, District, Direction of travel, From station (miles), To station (miles), Highway, Revision Number 0, User defined field 1, User defined field 2, User defined field 3, and Item Locked? False.

The main window shows 'Summary Hourly climate data' for the period from Enero /2020 to Diciembre /2021. The table below represents the data shown in the screenshot:

Date/Hour	Temperature (deg F)	Wind Speed (mph)	Sunshine (%)	Precipitation (in.)	Humidity (%)	Water Table (#)
1/01/2020 00:00...	43.7	2.91	4	0	79	6.07
1/01/2020 01:00...	42.08	2.01	5	0	81	6.07
1/01/2020 02:00...	40.28	0.89	5	0	83	6.07
1/01/2020 03:00...	39.74	0.89	6	0	84	6.07
1/01/2020 04:00...	39.38	0	7	0	85	6.07
1/01/2020 05:00...	39.38	0.89	10	0	84	6.07
1/01/2020 06:00...	40.1	0.89	13	0	86	6.07
1/01/2020 07:00...	39.02	0.89	17	0	89	6.07
1/01/2020 08:00...	38.84	0.89	22	0	88	6.07
1/01/2020 09:00...	38.48	2.01	25	0	88	6.07
1/01/2020 10:00...	38.66	2.01	27	0	86	6.07
1/01/2020 11:00...	37.76	2.01	27	0	89	6.07
1/01/2020 12:00...	37.94	0.89	25	0	89	6.07
1/01/2020 13:00...	38.12	0	22	0	87	6.07
1/01/2020 14:00...	40.28	0.89	18	0	80	6.07
1/01/2020 15:00...	43.16	2.01	15	0	76	6.07
1/01/2020 16:00...	45.14	2.01	11	0	70	6.07
1/01/2020 17:00...	48.56	4.03	8	0	70	6.07
1/01/2020 18:00...	48.02	2.91	6	0	69	6.07
1/01/2020 19:00...	48.56	4.03	4	0.01	75	6.07
1/01/2020 20:00...	45.32	2.01	3	0.03	74	6.07

Figura 46. Interfaz de caracterización del clima con información horaria.

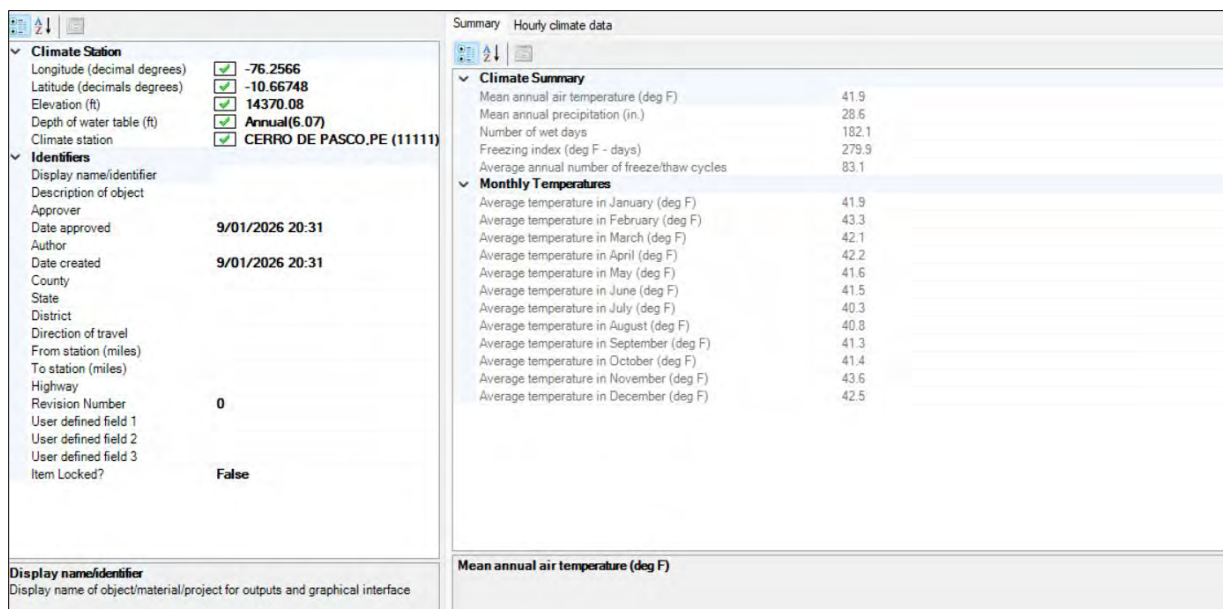


Figura 47. Resumen de condiciones climáticas de Cerro de Pasco.

4.2.5. Caracterización de los materiales

Para realizar el diseño de pavimentos rígidos, se requiere las propiedades de los materiales que forman la estructura del pavimento. Para el prototipo de diseño se considera los datos de jerarquía de nivel 3 que son recomendados por la Guía de Diseño AASHTO 2015. Además, el pre dimensionamiento del espesor de la capa de pavimento es a partir del resultado obtenido con el AASHTO 93 y luego se iteró hasta optimizar el espesor de diseño. Esta optimización cumple con los niveles de confiabilidad y criterio de diseño recomendados en el MEPDG 2015. Las variables de la caracterización del material son las propiedades de la subrasante, base, losa de concreto y el diseño de juntas.

Propiedades del diseño de juntas JPCP

Para el diseño del pavimento se contempla el uso de barras de transferencia entre las losas mediante pasadores (*dowels*), tal como se estableció también en el diseño con el método AASTHO 1993. Como se ha señalado previamente, las características geométricas y constructivas del

pavimento de concreto simple con juntas (Jointed Plain Concrete Pavement – JPCP) influyen en su desempeño a largo plazo. En ese sentido, el PMED v1.3 considera, entre los principales parámetros de diseño, la absorción de onda corta de la superficie el pavimento, el espaciamiento de juntas, el diámetro y el espaciamiento de los dowels, ensanchamiento de la losa (berma), el tipo de hombro (PPC atado o no atado), el tipo de base y su nivel de erosionabilidad (base estabilizada químicamente, estabilizada con asfalto o no estabilizada). Asimismo, dentro de las prácticas de la construcción, se incorporan datos como el método de curado de PPC, la diferencia efectiva de temperatura asociada a la curvatura o alabeo permanente de la losa, el número de meses hasta la pérdida de fricción entre la base y la losa de concreto, así como la condición inicial de suavidad del pavimento.

Por un lado, la AASHTO 2015 recomienda que, en ausencia de información medida, el valor de la absorción de onda corta de la superficie de un pavimento de concreto portland (*Portland Cement Concrete, PPC*) se adopte como 0.85 (Tabla 5). Este parámetro representa la fracción de radiación solar que es absorbida por la superficie de la carpeta de rodadura y constituye un dato relevante para la modelación térmica del material dentro del enfoque M-E. El espaciamiento entre juntas de 2.7 m (8.86 ft) se obtuvo del plano de diseño de juntas JPCP del Expediente Técnico elaborado por la Municipalidad Distrital de Simón Bolívar (2022). Los valores del diámetro y espaciamiento de los dowels predeterminados por el software AASHTOWare Pavement ME Design son 1.25 in y 12 in respectivamente. No obstante, para el presente diseño se adoptan pasadores de 1 in debido a que, en la práctica constructiva peruana, no es habitual el uso de varillas de mayor diámetro para esta aplicación.

<ul style="list-style-type: none"> ▼ JPCP Design PCC surface shortwave absorptivity ▼ PCC joint spacing (ft) Is joint spacing random ? Joint spacing (ft) Spacing of Joint 1 Spacing of Joint 2 Spacing of Joint 3 Spacing of Joint 4 Sealant type ▼ Doweled joints Is joint doweled ? Dowel diameter (in.) Dowel spacing (in.) 	<ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="checkbox"/> 0.85 8.85827 False <input checked="" type="checkbox"/> 8.85827 <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> Preformed Spacing(12), Diameter(1) True <input checked="" type="checkbox"/> 1 <input checked="" type="checkbox"/> 12
---	---

Figura 48. Parámetros de entrada del JPCP sobre la superficie de absorción, espaciamiento entre juntas y propiedades de los dowels.

Por otro lado, no se está considerando un ensanchamiento de la losa, pues el ancho de la Av. El Minero es reducido, por lo tanto, el ancho de la losa de pavimento es el mismo que el ancho del carril, 12 ft (3.66) según lo descrito en la caracterización del tránsito. Los hombros atados (*tied shoulders*), hacen referencia a bermas de concretos atados estructuralmente a la losa del carril mediante barras de amarre (tie bars) y miden la relación entre la deflexión del lado sin carga y el lado cargado de la junta. En el presente diseño, no se consideran hombros atados porque no se cuenta con un ensanche de losa. El índice de erosionabilidad representa la resistencia de la capa base frente a procesos de erosión y se expresa en una escala de 1 a 5, que permite calificar el potencial de degradación del material. Dado que la base considerada es granular, se adopta un índice de erosionabilidad de 3, conforme a las recomendaciones de la AASHTO 2015.

<ul style="list-style-type: none"> ▼ Widened slab Is slab widened ? Slab width (ft) ▼ Tied shoulders Tied shoulders Load transfer efficiency (%) Erodibility index 	<ul style="list-style-type: none"> Widened(12) True <input checked="" type="checkbox"/> 12 Not tied False <input type="checkbox"/> Erosion resistant (3)
---	---

Figura 49. Parámetros de entrada del JPCP en PMED v1.3.

Finalmente, la fricción de contacto entre la losa de PPC y la base se caracteriza mediante dos parámetros: el número de meses hasta la pérdida de fricción entre ambas capas y la diferencia

efectiva de temperatura asociada a la curvatura o deformación permanente de la losa. Para estos parámetros, el MEPDG 2015 recomienda valores de 240 meses y -10°F respectivamente. Cabe señalar que, ante la insuficiencia de información específica, el número de meses hasta la pérdida de fricción de la losa de concreto y de la base puede adoptarse como la cantidad de meses del periodo de diseño.

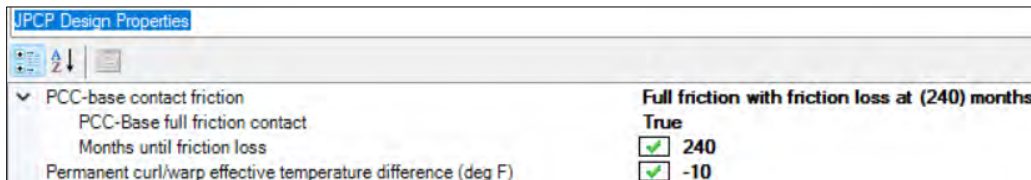


Figura 50. Parámetros de fricción entre la base y la losa de concreto.

A continuación, se presenta toda la información de entrada sobre el diseño de JPCP descrito anteriormente:

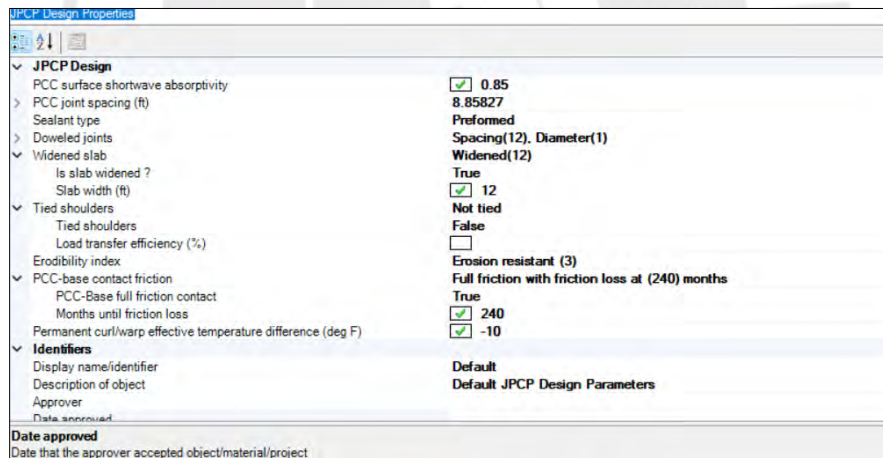


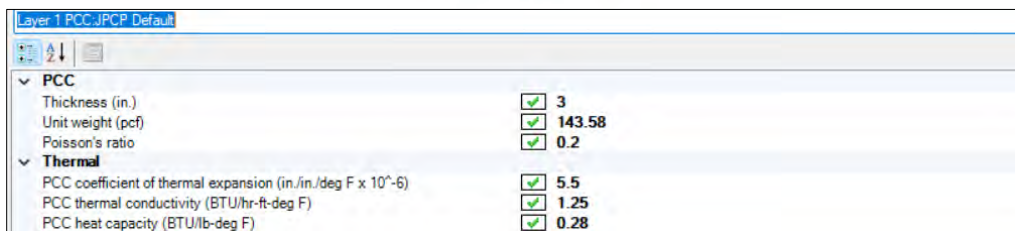
Figura 51. Consolidación de parámetros de diseño del JPCP.

Caracterización de la capa PPC

Las propiedades del PPC, tales como la resistencia temprana y a largo plazo, el módulo elástico, la retracción, la expansión térmica y durabilidad, entre otras, dependen directamente de la proporción y calidad de los materiales que conforman la mezcla. En ese contexto, el software

PMED requiere, como datos de entrada fundamentales del PPC, la resistencia a la flexión, el módulo elástico, el coeficiente de expansión térmica, la contracción última y las propiedades de los materiales constituyentes de la mezcla de concreto. Estos parámetros permiten modelar la respuesta del pavimento frente a las cargas aplicadas, estimar su comportamiento mecánico a largo plazo y evaluar la influencia del clima en los procesos de expansión y contracción del PPC.

Para la caracterización de la losa de concreto, se toma como referencia el diseño realizado mediante la metodología AASHTO 1993, en el cual se estableció la resistencia del concreto de 280 kg/cm² y se obtuvo un espesor de losa de 4.71". Este valor se adoptó como espesor inicial en el software PMED, el cual fue posteriormente optimizado mediante un proceso iterativo hasta alcanzar un espesor final de 3". Dado que el concreto de diseño presenta una resistencia de 280 kg/cm², se considera un peso específico promedio de 2,300 kg/m³ (143.58 lb/ft³), conforme a la Norma Técnica E.020 Cargas del Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE). Asimismo, de acuerdo con las recomendaciones de la Tabla 5, para pavimentos de tipo JPCP, se emplean los siguientes parámetros: coeficiente de Poisson igual a 0.2, coeficiente de expansión térmica de 5.5×10^{-6} in/in/°F, conductividad térmica de 1.25 BTU/hr-ft-°F, y capacidad calorífica de 0.28 BTU/lb-°F. Cabe precisar que el coeficiente de expansión térmica, la conductividad térmica y la capacidad calorífica dependen del tipo de agregado utilizado en la fabricación del concreto.



Layer 1 PCC, JPCP Default	
<input checked="" type="checkbox"/> PCC	
Thickness (in.)	<input checked="" type="checkbox"/> 3
Unit weight (pcf)	<input checked="" type="checkbox"/> 143.58
Poisson's ratio	<input checked="" type="checkbox"/> 0.2
<input checked="" type="checkbox"/> Thermal	
PCC coefficient of thermal expansion (in./in./deg F x 10 ⁻⁶)	<input checked="" type="checkbox"/> 5.5
PCC thermal conductivity (BTU/hr-ft-deg F)	<input checked="" type="checkbox"/> 1.25
PCC heat capacity (BTU/lb-deg F)	<input checked="" type="checkbox"/> 0.28

Figura 52. Datos de entrada para la capa de concreto

Asimismo, el tipo de cemento definido para el presente diseño corresponde al Tipo I, para el cual el contenido promedio de material cementicio suele variar entre 360 y 420 kg/m³, considerando una relación agua–cemento de 0.50, en este estudio se adopta el valor promedio de 390 kg/m³ (657 lb/yd³). Asimismo, los agregados más utilizados en la elaboración de concreto provienen comúnmente de formaciones ígneas como el granito o basalto, debido a su elevada resistencia mecánica y durabilidad (Portland Cement Association, s.f), por ello, se seleccionó al granito como agregado para el diseño. La temperatura de tensión cero del concreto Portland (PCC), expresada en °F, y la contracción última, son estimadas automáticamente por el software *AASHTOWare Pavement ME Design* mediante ecuaciones de predicción. En ausencia de información específica sobre la contracción reversible (%) y el tiempo requerido para alcanzar el 50% de la contracción última (días), AASHTO 2015 recomienda adoptar los valores predeterminados de 50% y 35 días, respectivamente. Finalmente, se considera el curado mediante compuestos químicos; asimismo, los módulos de elasticidad y ruptura del PPC se adoptan en 614.02 psi y 3 570 019.85 psi, respectivamente, de acuerdo con los valores utilizados en el diseño realizado mediante la metodología AASHTO 1993.

<ul style="list-style-type: none"> ▼ Mix Cement type Cementitious material content (lb/yd³) Water to cement ratio Aggregate type > PCC zero-stress temperature (deg F) > Ultimate shrinkage (microstrain) Reversible shrinkage (%) Time to develop 50% of ultimate shrinkage (days) Curing method ▼ Strength PCC strength and modulus 	<ul style="list-style-type: none"> Type I (1) <input checked="" type="checkbox"/> 657 <input checked="" type="checkbox"/> 0.5 Granite (3) <input type="checkbox"/> Calculated <input type="checkbox"/> 898.3 (calculated) <input checked="" type="checkbox"/> 50 <input checked="" type="checkbox"/> 35 Curing Compound <input checked="" type="checkbox"/> Level:3 Rupture(614) Modulus(3570020)
--	--

Figura 53. Datos de caracterización del concreto.

A continuación, se presenta la Figura 54, la cual sintetiza y resume los principales parámetros y consideraciones descritos anteriormente.

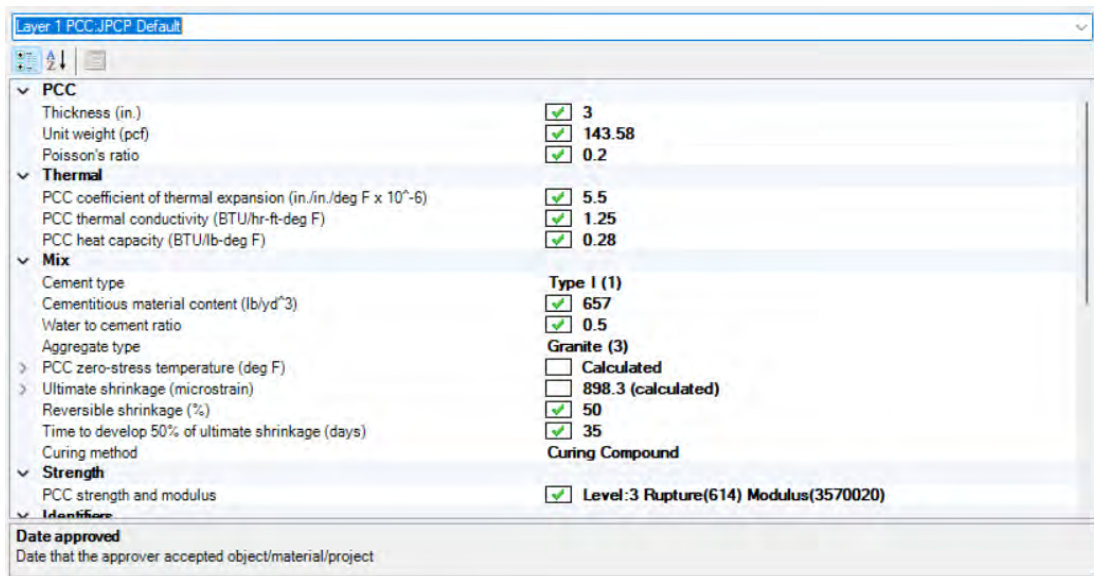


Figura 54. Parámetros de diseño consolidados para la caracterización de la capa de PPC.

Caracterización de la base y subrasante

Los datos correspondientes a la base granular y a la subrasante del pavimento se obtienen a partir del informe técnico del expediente del proyecto desarrollado en Cerro de Pasco, complementándose con valores recomendados por la Guía de Diseño AASHTO 2015. En la Tabla 33, se presenta el tipo de suelo adoptado para la base y subrasante, determinado a partir del Estudio de Mecánica de Suelos y de los resultados de los ensayos realizados en la cantera Sacrafamilia. El espesor de la base se mantiene igual al considerado en el diseño efectuado según el método AASHTO 1993, es decir, 20 cm (7.874 in). Asimismo, el coeficiente de Poisson y el coeficiente de presión lateral de tierras se adoptan según los valores por defecto de *AASHTOWare Pavement ME Design*. Cabe señalar que las propiedades de los suelos A-1-a seleccionados para la base y subrasante, respectivamente, forman parte de la base de datos del software.

Tabla 33. Tipo de suelo para la caracterización de la base y la subrasante del pavimento.

Dato de entrada	Base	Subrasante
Espesor (in)	7.874	Semi infirrito
Tipo de suelo	A-1-a	A-1-a

*Nota. Clasificación del suelo por Municipalidad Distrital de Simón Bolívar, 2022.

A continuación, se presenta la interfaz del software PMED v1.3 con los datos de entrada correspondientes a la base y a la subrasante del pavimento – Figura 55 y Figura 56 respectivamente – donde se consolida toda la información descrita previamente. Asimismo, en la Figura 57 se muestra la estructura de capas del pavimento considerada para el diseño.

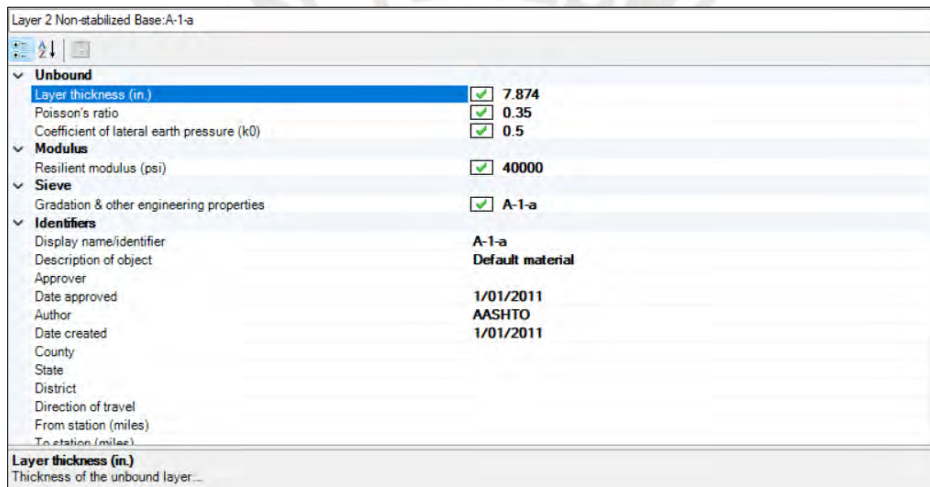


Figura 55. Propiedades de la base del pavimento A-1-a

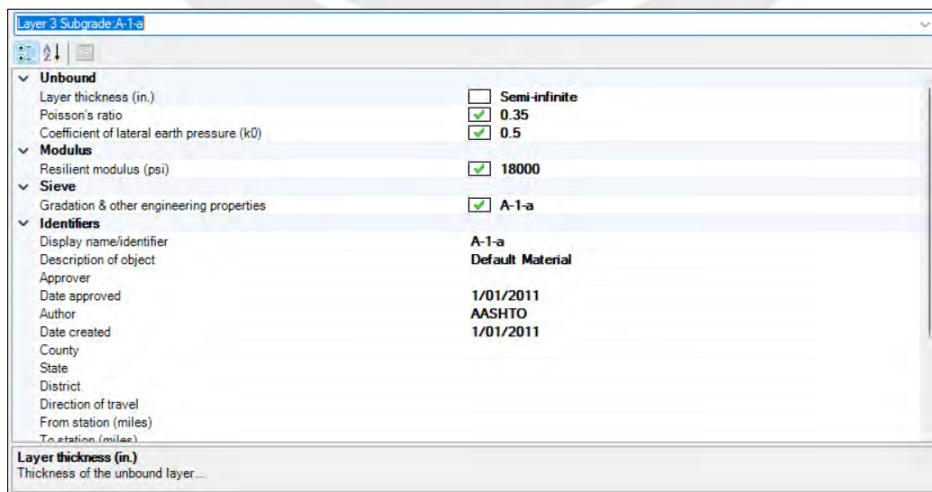


Figura 56. Propiedades de la subrasante del pavimento A-1-a.



Figura 57. Estructura de los materiales de las capas del pavimento diseñado.

4.2.6. Diseño base con clima de Cerro de Pasco

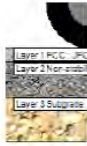
Con base en la información de entrada descrita previamente, se ejecutó el programa *AASHTOWare Pavement ME Design* con los parámetros definidos para el diseño. Como resultado, se obtuvieron los indicadores de desempeño estructural y funcional del pavimento a lo largo del periodo de diseño. Los resultados completos generados por el programa se presentan en los Anexos A y B; no obstante, a continuación, se exponen los principales resultados.

Por un lado, se muestra el resultado del diseño de pavimento rígido JPCP empleando el MEPDG 2015 (Figura 59), el cual se obtuvo a partir del dimensionamiento optimizado del espesor de la losa de 3 in (Figura 58).

Design Inputs

Design Life: 20 years Existing construction: - Climate Data -10.66748, -76.2566
 Design Type: Jointed Plain Concrete Pavement (JPCP) Pavement construction: June, 2028 Sources (Lat/Lon)
 Traffic opening: September, 2028

Design Structure



Layer type	Material Type	Thickness (in.)	Joint Design:	
PCC	JPCP Default	3.0	Joint spacing (ft)	8.9
NonStabilized	A-1-a	7.9	Dowel diameter (in.)	1.00
Subgrade	A-1-a	Semi-infinite	Slab width (ft)	12.0 (w)

Traffic

Age (year)	Heavy Trucks (cumulative)
2028 (initial)	22
2038 (10 years)	43,278
2048 (20 years)	91,484

Figura 58. Datos de entrada en el PMED v1.3.

Design Outputs

Distress Prediction Summary

Distress Type	Distress @ Specified Reliability		Reliability (%)		Criterion Satisfied?
	Target	Predicted	Target	Achieved	
Terminal IRI (in./mile)	200.00	138.36	99.00	100.00	Pass
Mean joint faulting (in.)	0.20	0.04	99.00	100.00	Pass
JPCP transverse cracking (percent slabs)	15.00	6.96	99.00	100.00	Pass

Distress Charts

Figura 59. Resultado del criterio de desempeño y de confiabilidad para un espesor de losa de 3 in.

Por otro lado, se mencionó anteriormente que, según lo descrito en la Norma CE.010 Pavimentos Urbanos, el espesor de la losa de concreto en pavimentos rígidos para vías colectoras urbanas es de 15 cm como mínimo. Por lo tanto, se ejecutó el programa nuevamente solo cambiando el espesor de la carpeta de rodadura (5.906 in) según la Figura 60 y se obtuvo los resultados según se muestran en la Figura 61.

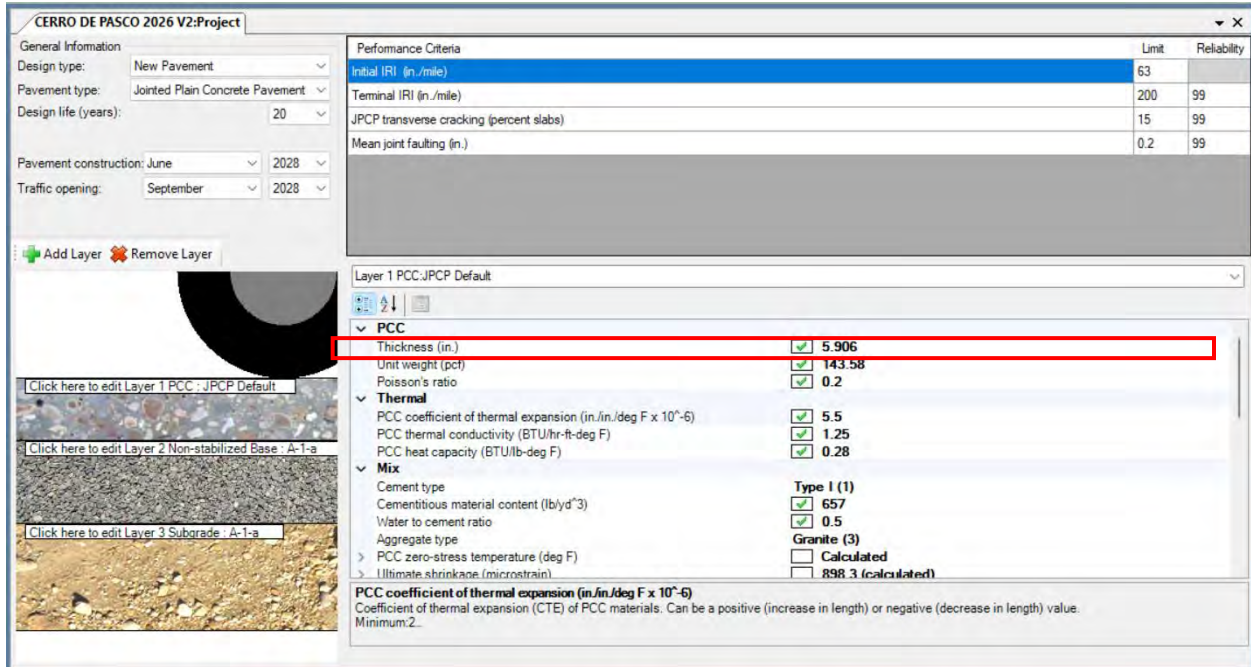


Figura 60. Modificación en espesor de losa de concreto, según Norma CE.010 Pavimentos Urbanos.

Design Inputs

Design Life: 20 years Existing construction: - Climate Data: -10.66748, -76.2566
 Design Type: Jointed Plain Concrete Pavement (JPCP) Pavement construction: June, 2028 Sources (Lat/Lon)
 Traffic opening: September, 2028

Design Structure

Layer type	Material Type	Thickness (in.):	Joint Design:	
PCC	JPCP Default	5.9	Joint spacing (ft)	8.9
NonStabilized	A-1-a	7.9	Dowel diameter (in.)	1.00
Subgrade	A-1-a	Semi-infinite	Slab width (ft)	12.0 (w)

Traffic

Age (year)	Heavy Trucks (cumulative)
2028 (initial)	22
2038 (10 years)	43,278
2048 (20 years)	91,484

Design Outputs

Distress Prediction Summary

Distress Type	Distress @ Specified Reliability		Reliability (%)		Criterion Satisfied?
	Target	Predicted	Target	Achieved	
Terminal IRI (in./mile)	200.00	127.86	99.00	100.00	Pass
Mean joint faulting (in.)	0.20	0.03	99.00	100.00	Pass
JPCP transverse cracking (percent slabs)	15.00	6.96	99.00	100.00	Pass

Figura 61. Resultados de diseño de pavimento con espesor de losa 15 cm (5.906 in)

4.3. Generación de escenarios climáticos alternativos

Con el propósito de evaluar la influencia del clima en el desempeño del pavimento a lo largo de su vida útil, se generaron dos escenarios de diseño adicionales bajo condiciones climáticas distintas, manteniendo constantes todas las demás variables del modelo definido para Cerro de Pasco y modificando únicamente el archivo climático. De los dos diseños realizados para estas dos ciudades adicionales, se seleccionó como caso base el diseño con espesor de losa optimizado mediante el MEPDG, en el que la losa presenta un espesor de 3 in.

Según la clasificación climática propuesta por el Instituto Geofísico Peruano (2025), los climas se pueden agrupar en función de la temperatura media anual en muy frío ($< 0^{\circ}\text{C}$), frío ($0^{\circ} - 10^{\circ}\text{C}$), templado ($10^{\circ} - 20^{\circ}\text{C}$), cálido ($20^{\circ} - 25^{\circ}\text{C}$), y muy cálido ($> 25^{\circ}\text{C}$). En tal sentido, para la generación de los escenarios comparativos se emplearon archivos climáticos correspondientes a ciudades con climas templados y muy cálidos, disponibles en la base de datos del software *AASHTOWare Pavement ME Design*. Las ciudades seleccionadas fueron Austin (Texas, Estados Unidos), representativa de un clima templado, y Key West (Florida, Estados Unidos), representativa de un clima muy cálido. Cabe señalar que la información climatológica asociada a estas localidades proviene de estaciones meteorológicas reales y de la integración de bases de datos de reanálisis, tales como NARR (para Norteamérica) o MERRA (para cobertura global), las cuales combinan observaciones históricas con modelos climáticos desarrollados por la NASA.

4.3.1. Diseño con clima templado (Austin)

La ciudad de Austin se localiza en Texas, Estados Unidos y presenta una elevación aproximada de 655 ft sobre el nivel del mar, con un nivel freático promedio anual de 20 ft. El archivo climático de esa ciudad registra una temperatura promedio anual de 67.7°F (19.83°C) y

una precipitación media anual de 36.3 in, características propias de un entorno con clima templado. En la Figura 62 se presenta un resumen de las principales condiciones climáticas de Austin. Cabe precisar que el periodo de información climática disponible en la base de datos del software abarca desde el 01/11/1997 hasta el 28/02/2006.

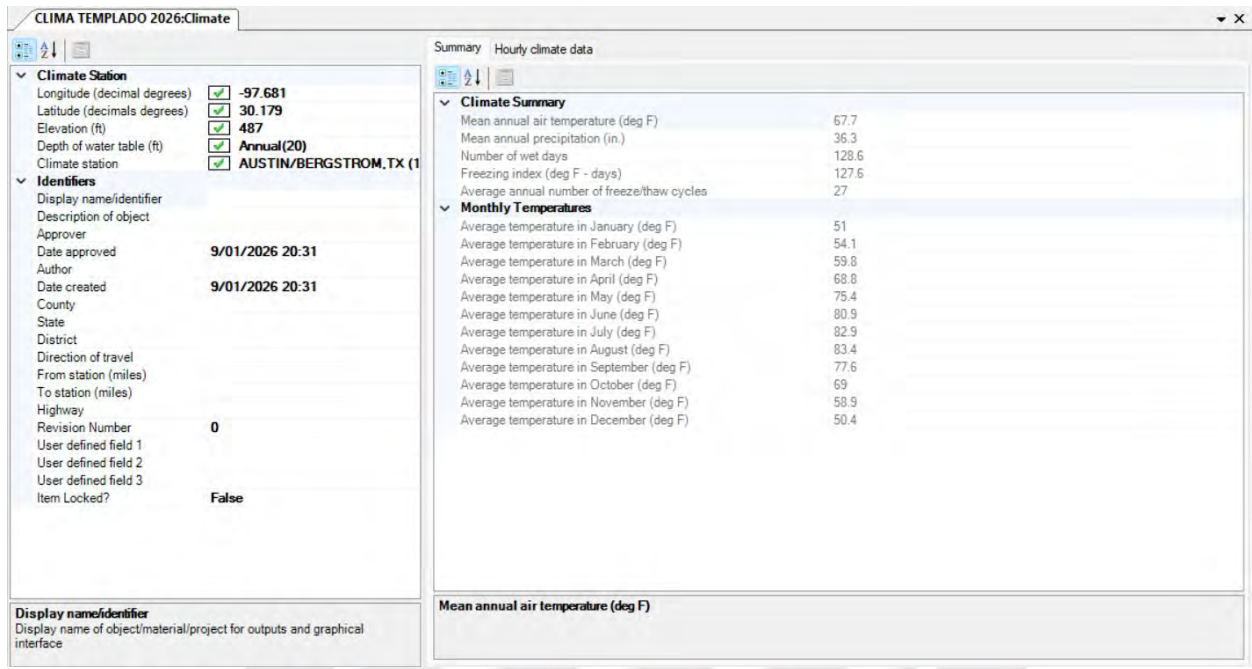


Figura 62. Resumen de condiciones climáticas de Austin – Texas, archivo AUSTIN/BERGSTROM, TX (13904).

A continuación, se presentan los resultados del análisis, en los que se registró un Índice de Rugosidad Internacional (IRI) terminal de 123.65 in/milla, un escalonamiento medio en juntas de 0.03 in y un porcentaje de fisuración transversal del pavimento tipo JPCP de 6.96%.

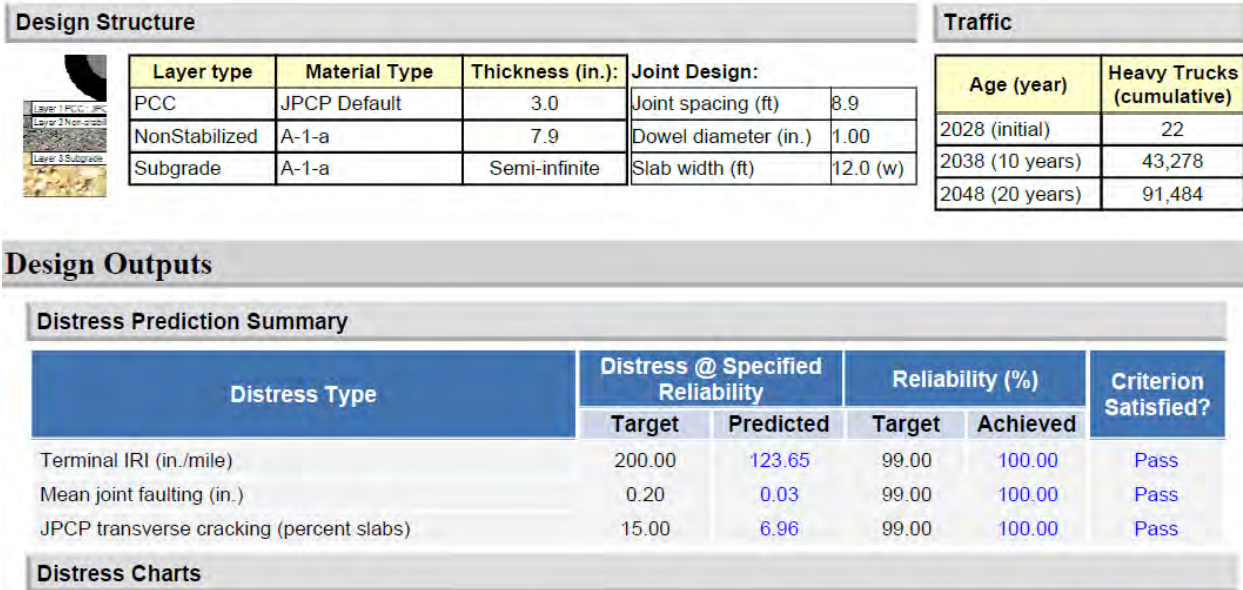


Figura 63. Resultado de diseño de pavimento para un clima templado - Austin, Texas.

4.3.2. Diseño con clima muy cálido (Key West)

La ciudad de Key West se localiza en Florida, Estados Unidos y presenta una elevación aproximada de 5 ft sobre el nivel del mar, con un nivel freático promedio anual de 2.04 ft. El archivo climático de esa ciudad registra una temperatura promedio anual de 78.1°F (25.6 °C) y una precipitación media anual de 30 in, características propias de un entorno con clima muy cálido. En la Figura 64 se presenta un resumen de las principales condiciones climáticas de Key West. Cabe precisar que el periodo de información climática disponible en la base de datos del software abarca desde el 01/01/1979 hasta el 30/06/2015.

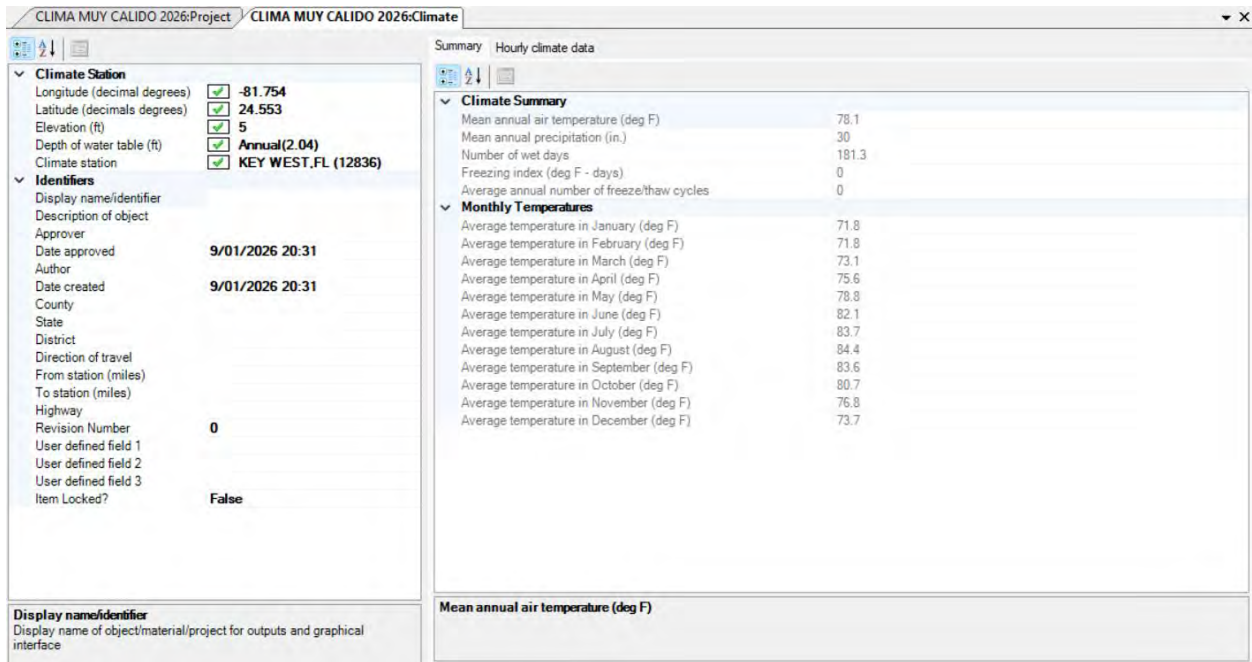


Figura 64. Resumen de condiciones climáticas de Key West –Florida, archivo KEY WEST, FL (12836).

A continuación, se presentan los resultados obtenidos del análisis, en los cuales se registró un Índice de Rugosidad Internacional (IRI) terminal de 115.77 in/milla, un escalonamiento medio en juntas de 0.03 in y un porcentaje de fisuración transversal del pavimento tipo JPCP de 6.96%.

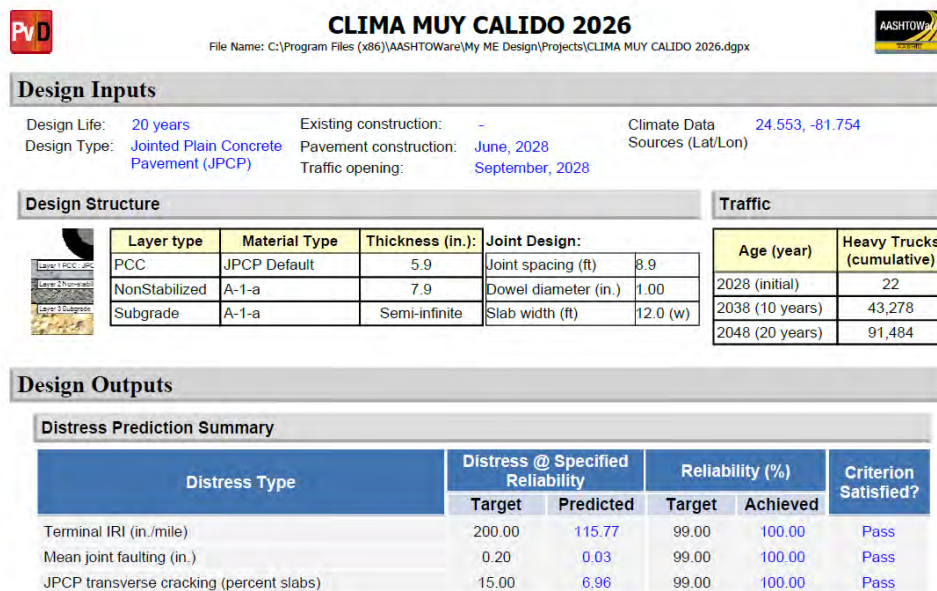


Figura 65. Resultado de diseño de pavimento para un clima muy templado – Key West, Florida.

5.INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En el presente capítulo se comparan los espesores de los diseños obtenidos mediante las metodologías AASHTO 1993 y MEPDG 2015. Asimismo, se evalúan los resultados de predicción de desempeño correspondientes a cada uno de los escenarios analizados en las ciudades de Cerro de Pasco, Austin y Key West. Finalmente, se examina la incidencia de las variables climatológicas sobre el comportamiento estructural del pavimento rígido a lo largo de su vida útil de diseño.

5.1.Comparativa del diseño mediante el AASHTO 93 y MEPDG 2015

La utilización de un conjunto equivalente de variables de diseño descrito en el Capítulo 4 permite establecer una comparación directa entre ambos enfoques, pues comparten los mismos parámetros de diseño respecto al IMDS o AADTT two way, cantidad de sentidos, carriles por sentido, periodo de diseño, tasa de crecimiento vehicular, factor direccional, módulo de elasticidad y rotura del concreto, nivel de confiabilidad, resistencia del suelo, tipo de suelo de la base y subrasante, y presencia de dowels. De los resultados obtenidos, se observa que la aplicación de la metodología mecanístico-empírica conduce a una reducción del espesor de la losa en un 36.3%, pues los espesores teóricos obtenidos con el AASHTO 93 y MEPDG 2015 fueron 4.71 y 3.00 in, respectivamente. Ello evidencia una optimización estructural respecto al método empírico tradicional. Este resultado confirma lo expuesto en los capítulos iniciales de la tesis, donde se señala que el MEPDG, al incorporar modelos mecanísticos y climáticos más representativos, permite un diseño más eficiente y ajustado al comportamiento real del pavimento.

5.2.Evaluación de criterio de desempeño del diseño con el MEPDG

Como parte de la metodología MEPDG 2015, luego del diseño se analizan y evalúan los parámetros de respuesta del pavimento para determinar si se cumple o no con los criterios de

desempeño aplicable, es decir, las fallas en las juntas por escalonamiento promedio, agrietamiento transversal de losas y la rugosidad superficial para pavimentos de tipo JPCP. En la Tabla 34, se muestra un resumen de los resultados obtenidos de la predicción del comportamiento del pavimento para las ciudades Cerro de Pasco, Austin y Key West.

Tabla 34. Predicción de comportamiento del pavimento durante el periodo de diseño para Cerro de Pasco, Austin y Key West

Tipo de deterioro	Falla				Confiabilidad		Criterio
	Valor Umbral máximo	Predicción			Objetivo	Logrado	
		Cerro de Pasco	Austin	Key West			
IRI Final (in/mi)	200	138.36	123.65	119.68	99	100	Aprobado
Escalonamiento de juntas promedio (in)	0.2	0.04	0.03	0.03	99	100	Aprobado
Agrietamiento transversal (%)	15	6.96	6.96	6.96	99	100	Aprobado

Fuente: Elaboración propia.

Se puede notar que los tres diseños – Cerro de Pasco (clima frío), Austin (clima templado) y Key West (clima muy cálido) – cumplen holgadamente con los criterios de desempeño estructural establecidos por el MEPDG, bajo el nivel de confiabilidad adoptado, pues los valores predichos no superan los umbrales de los criterios en ninguno de los tres escenarios. Por un lado, los valores predichos para el IRI final (138.36, 123.65 y 119.68 in/mi) se mantienen por debajo del valor umbral objetivo (200 in/mi) en los tres escenarios climáticos, lo que permite afirmar que el pavimento diseñado cumple con los niveles de servicio exigidos durante su vida útil. Por otro lado, el escalonamiento promedio en juntas obtenido (0.04, 0.03 y 0.03 in) es considerablemente inferior al valor umbral (0.20 in), lo que evidencia un comportamiento estructural estable de las losas y una adecuada transferencia de carga entre juntas; ello implica que no se desarrollan desniveles significativos entre las losas. Por último, la predicción del porcentaje de agrietamiento

transversal también es inferior al valor objetivo de 15%, pues en los tres casos se obtuvo un valor de 6.95%, lo que confirma que la losa no alcanza niveles críticos de fisuración por efectos térmicos o de fatiga durante el periodo de diseño.

5.3. Análisis de influencia del clima

En las siguientes líneas se analiza el impacto del clima en el comportamiento y las propiedades inherentes del pavimento rígido durante su funcionamiento, a partir de los resultados obtenidos con el software *AASHTOWare Pavement ME Design v1.3*.

En primer lugar, se evidencia la influencia directa de las condiciones climáticas sobre el IRI durante la vida útil del pavimento. En el caso de Cerro de Pasco, el indicador alcanzó el valor de 138.36 in/mi, superando a Austin con 123.65 in/mi y al de Key West con 115.77 in/mi, tal como se observa en la Figura 66. Se observa una ligera mejora del IRI cuando el pavimento está expuesto a climas templado y muy cálido respecto al clima frío. Ello se debe a que la amplitud térmica diaria, afectada por los días de radiación solar intensos y noches de congelamiento, induce a ciclos repetitivos de alabeo (*curling*) que deforman la geometría de las losas y, en consecuencia, incrementan la rugosidad final de la vía.

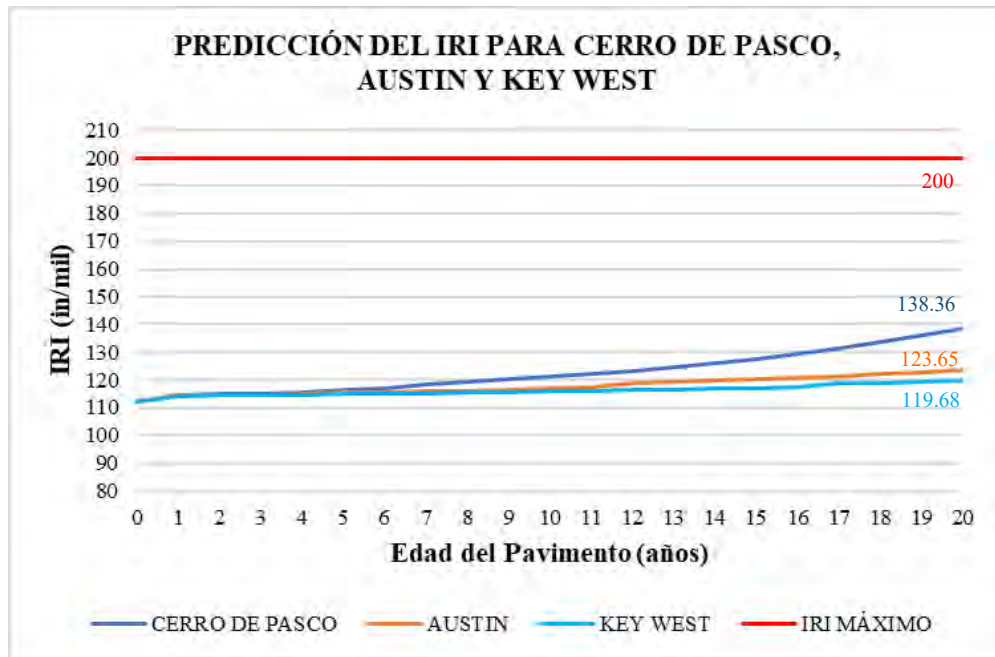


Figura 66. Predicción del IRI para el pavimento durante su vida útil para Cerro de Pasco, Austin y Key West.
Fuente: Elaboración propia.

En segundo lugar, respecto al escalonamiento promedio de juntas, los resultados muestran una variación poco significativa entre los tres escenarios analizados y, además, los valores predichos oscilan entre el 15 y 20% del valor umbral admisible, lo cual evidencia que este mecanismo de deterioro no constituye un modelo de falla crítica, tal como se muestra en la Figura 67. Esto se debe a que este indicador de desempeño está directamente relacionado con el uso o no de barras de transferencia o dowels, independientemente del clima, pues al tener pasadores, hay una transferencia de cargas entre juntas adecuada. En caso no se hubiesen colocado pasadores, las bajas temperaturas habrían inducido la contracción de las losas, provocando así una mayor apertura de las juntas transversales.

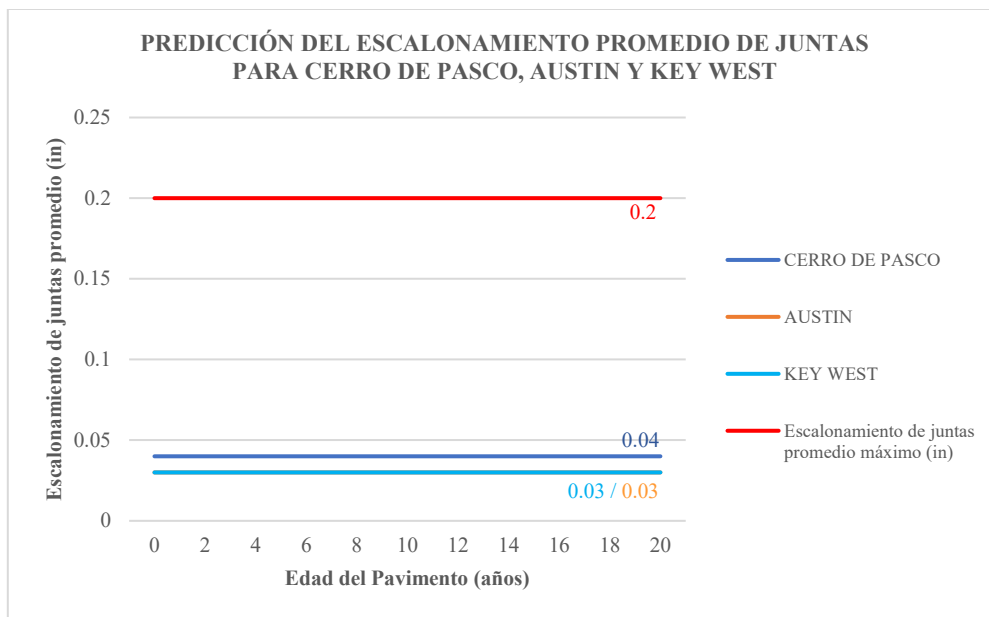


Figura 67. Predicción del escalonamiento promedio de juntas para el pavimento durante su vida útil para Cerro de Pasco, Austin y Key West. Fuente: Elaboración propia.

En tercer lugar, los resultados muestran que el porcentaje de agrietamiento transversal para las tres ciudades analizadas son prácticamente iguales, cuyo valor es de 6.96% (Anexo B, Anexo C, Anexo D), el cual se mantiene por debajo del umbral de fisuración establecido en 15%, por lo que no alcanzan valores críticos de fisuración. La invariabilidad de este indicador frente a la variación climática sugiere que el efecto térmico no alcanza un nivel crítico capaz de modificar el mecanismo de daño, por lo que el comportamiento a la fatiga del pavimento está influenciado principalmente por variables geométricas y mecánicas de la estructura. Dado que la fisuración transversal crece lentamente hasta acercarse al punto crítico, y solo cuando el daño acumulado se aproxima a la falla, el porcentaje de fisuración crece de forma acelerada, para diseños robustos, no se pueden visualizar los cambios al incrementar el tráfico. Por ejemplo, al incrementar el tráfico a 150 veces lo establecido inicialmente en los prototipos de diseño para los 3 climas en el PMED, el valor de este indicador de desempeño no presenta mayor variación se mantiene en 6.96%. En resumen, dado que el tránsito vehicular considerado es reducido y el diseño presenta un carácter robusto, el clima no ejerce una influencia determinante sobre este indicador de desempeño. Esto

último se sustenta en lo indicado por el AASHTO, donde el agrietamiento transversal es un mecanismo de fatiga acumulativa que depende principalmente de los niveles de esfuerzos por carga, números de repeticiones de carga, propiedades mecánicas del concreto, condiciones de soporte (k), presencia de dowels, gradiente de temperatura en la parte superior o inferior de la losa y espaciamiento de juntas (AASHTO, 2015). En contraste, para pavimentos flexibles, las condiciones climáticas podrían contribuir en el desempeño de este indicador cuando están sometidos a ciclos térmicos con una diferencia significativa entre las temperaturas bajas y altas (Ghos et al., 2022)

En cuarto lugar, el módulo elástico de la capa de la base (E_{base}) para las ciudades de Cerro de Pasco, Austin y Key West se encuentra en los rangos de 50.66 – 50.84 kpsi, 56.75 – 57.58 kpsi, 59.80 – 60.15 kpsi, respectivamente (ver Figura 68, Figura 69 y Figura 70). Este parámetro representa la rigidez y la capacidad de soporte de la capa base. La variación observada en cada caso es resultado directo del modelo ambiental, producto de la interacción entre el material y las condiciones climáticas del entorno simulados por el *Enhanced Integrated Climatic Model* (EICM) en el AASHTOWare Pavement ME Design, incorporando los efectos de la temperatura y la humedad sobre el comportamiento mecánico de la base.

Por un lado, en las gráficas se observan fluctuaciones que evidencian que el módulo elástico no permanece constante en el tiempo. Además, es totalmente esperado que el módulo de la base de las tres ciudades presente resultados diferentes, pues están sometidos a diferentes condiciones climáticas. Primero, en Cerro de Pasco, el módulo es menor en comparación a los otros dos climas, debido a las bajas temperaturas y posibles incrementos de humedad. Mientras tanto, en Austin, una ciudad que presenta un clima templado, el módulo presenta variaciones moderadas y una mayor estabilidad. En cambio, en Key West, los módulos de la base son mayores que para climas

fríos o templados, pues está sometido a climas cálidos, obteniendo así la base una mayor rigidez y estabilidad. Como se mencionó anteriormente, la rigidez de la base está relacionado directamente al valor del módulo de la base, y a su vez a la temperatura; por lo que mientras mayor sea el valor del módulo, mayor será la rigidez y estabilidad de la base, ello también se cumple de manera inversa, es decir, mientras el clima será más frío, la rigidez y estabilidad serán menores.

Por otro lado, en el caso de Cerro de Pasco, el comportamiento del módulo elástico de la base se observa en la Figura 68, que tiene un comportamiento cíclico de “onda cuadrada” definido, lo cual refleja la marcada estacionalidad de la zona. Las mesetas horizontales superiores corresponden a la temporada seca, periodos en el que el material granular mantiene su máxima estabilidad y rigidez; en contraste, las caídas verticales bruscas representan eventos de temporada de lluvia o deshielo. Ello indica que, la base granular es más susceptible a perder capacidad de soporte de saturación estacional, aunque el material logra recuperar su rigidez cíclicamente.

Por su parte, en el escenario de Austin, Figura 69, el comportamiento del módulo elástico de la base presenta una tendencia irregular, esta variabilidad es un reflejo directo de la inestabilidad climática, donde la ausencia de una estación seca definida y la ocurrencia de precipitaciones intermitentes someten a la capa granular a un ciclo continuo de humedecimiento y secado. La intermitencia de las precipitaciones ocasiona una alteración continua en la humedad óptima de la base, generando oscilaciones en su módulo de rigidez, lo cual evita que la capa granular mantenga una respuesta estructural constante.

Por último, en el caso de Key West, Figura 70, se muestra un comportamiento más estable en comparación de los otros dos casos, describiendo un patrón gráfico uniforme y repetitivo. Esta regularidad responde a las condiciones estables de un clima muy cálido; la constancia térmica y

las altas tasas de evaporación de la zona favorecen el equilibrio hídrico del suelo, garantizando así una capacidad de soporte robusta y predecible toda la vida útil de diseño.

En resumen, en climas húmedos o fríos, aumenta la humedad de la base por lo que se reduce la rigidez, no obstante, en climas templados o cálidos, aumenta la pérdida de humedad, por lo que se incrementa la rigidez aparente. Asimismo, las oscilaciones estacionales de cada ciudad reflejan ciclos anuales de humectación – secado y enfriamiento - calentamiento, donde cada forma de la curva representa la “historia ambiental” de la capa base. Es precisamente esta capacidad la que diferencia al enfoque mecanístico empírico del método AASHTO 93, pues explica por qué el clima puede influir en indicadores como el IRI aun cuando la geometría y el tránsito permanecen constantes.

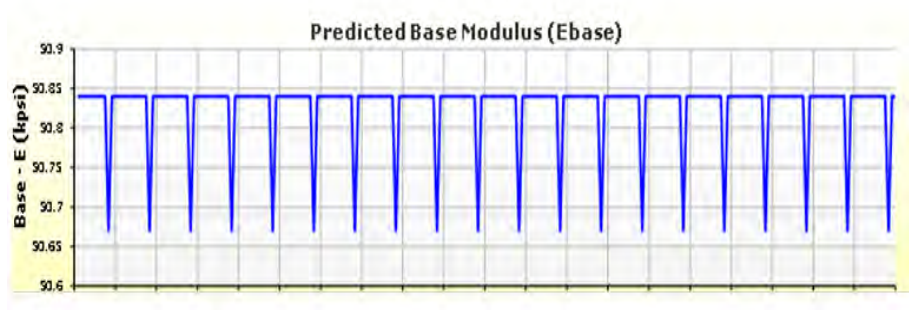


Figura 68. Predicción de módulo de reacción de la base del pavimento – Cerro de Pasco, Perú.

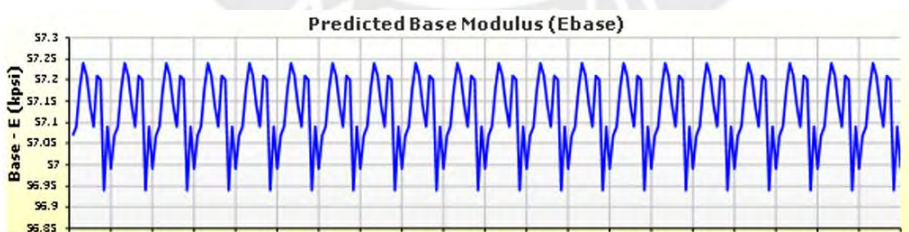


Figura 69. Predicción de módulo de reacción de la base del pavimento – Austin, Texas.

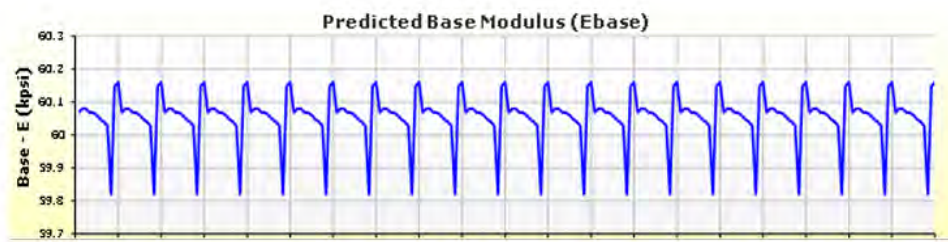


Figura 70. Predicción de módulo de reacción de la base del pavimento – Key West, Estados Unidos.

En quinto lugar, se analizó el comportamiento del módulo de reacción dinámico (k) de la subrasante, el cual representa la rigidez del suelo natural. En la Figura 71, se observa que este parámetro presenta un comportamiento prácticamente constante a lo largo de la vida útil del proyecto para los tres escenarios climáticos, lo que indica que, para el tipo de suelo natural y las condiciones modeladas, la subrasante no experimenta variaciones significativas asociadas a cambios estacionales, precipitación o periodos de sequía. Para el caso de Cerro de Pasco se obtuvo un valor de k al final igual a 19.22 psi mientras que, para Austin y Key West, se registraron valores de 21.59 psi y 22.06 psi, respectivamente. Esta jerarquización responde al contenido de humedad de equilibrio estimado por el EICM en el PMED, evidenciándose que, en climas con mayor evaporación, el suelo tiene a mantenerse en condiciones más secas (menor saturación). Bajo estas circunstancias, el suelo natural desarrolla una fricción interna, y en consecuencia, una rigidez ligeramente superior.

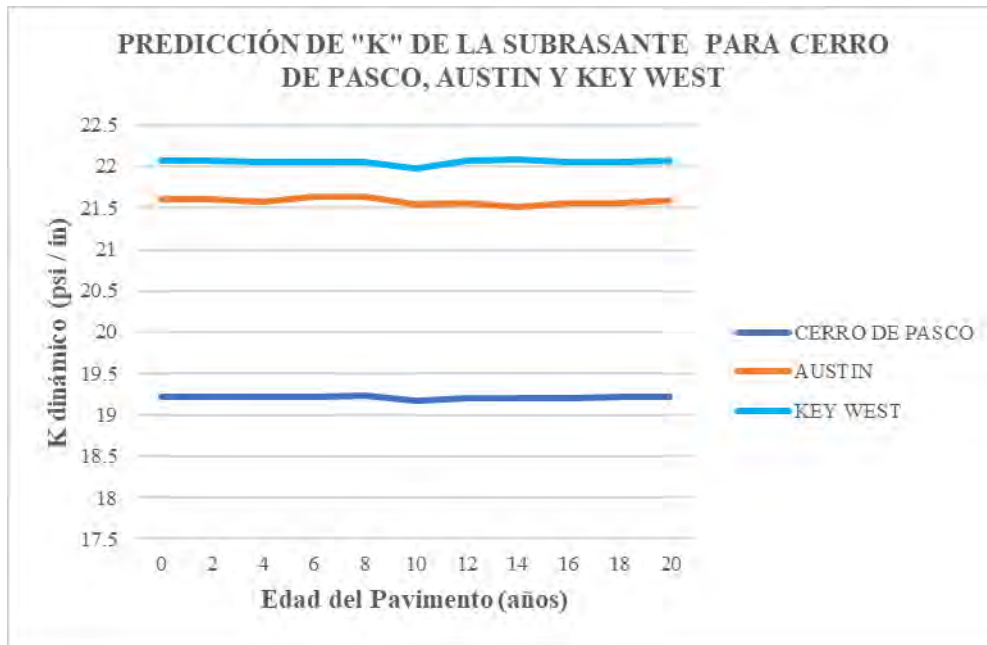


Figura 71. Predicción de módulo de reacción de la subrasante del pavimento – Cerro de Pasco, Austin y Key West. Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, el daño acumulado en el concreto por fatiga ratifica la integridad estructural del diseño bajo los tres escenarios climáticos analizados. Como se observa en las gráficas, los valores de daño son prácticamente nulos en todos los casos, lo que implica que el pavimento no desarrollará fallas por fatiga ni por la cara superior ni por la inferior de la losa. Esto evidencia que la estructura presenta un margen de capacidad suficiente para resistir tanto las acciones del tránsito como los efectos térmicos inducidos por el clima, bajo las condiciones de diseño adoptadas. No obstante, se aprecia una ligera variación en el caso de Cerro de Pasco (Figura 72) en comparación a Austin y Key West, la cual está asociada al entorno del clima frío y, aun así, dicha variación no alcanza niveles significativos de deterioro. En ese contexto, los resultados confirman que, para el diseño específico del presente proyecto, el clima no controla el mecanismo de daño acumulativo en la estructura del pavimento rígido, puesto las diferencias térmicas entre un clima frío, templado y muy cálido no generan incrementos apreciables de daño cuando el diseño es estructuralmente robusto y el tránsito es moderado.

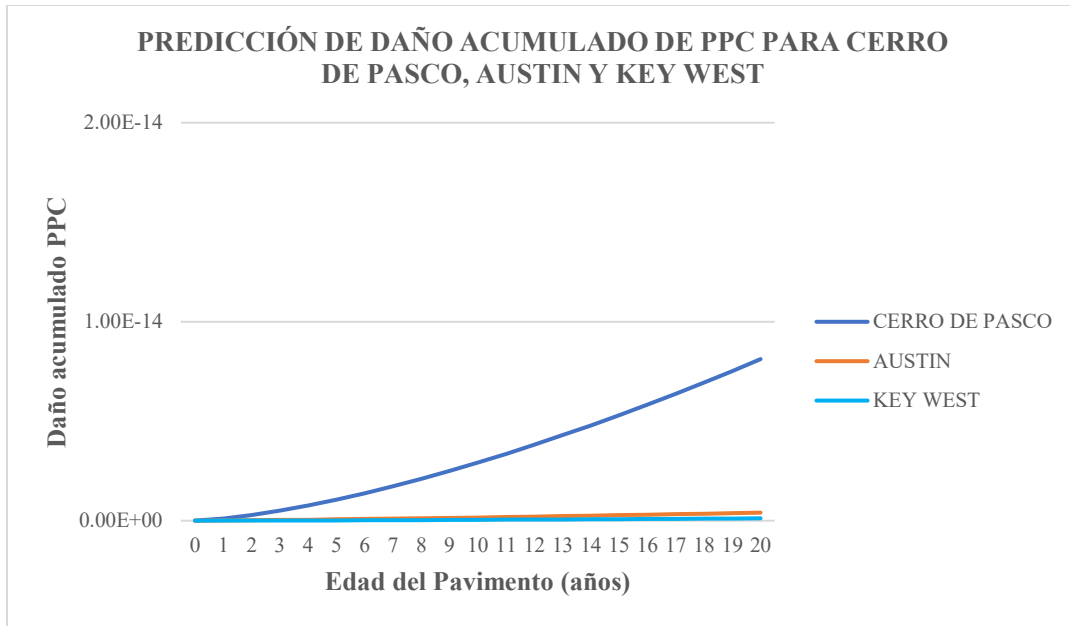


Figura 72. Predicción del daño acumulativo del PPC – Cerro de Pasco, Austin y Key West.



6.CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1.Conclusiones

- Se implementó un modelo climático de la ciudad de Cerro Pasco en el software *AASHTOWare Pavement ME Design (PMED) 2013*, a partir de información climática medida directamente en estaciones meteorológicas y de bases de datos electrónicas. Con la implementación del modelo, se obtuvo el diseño del prototipo de pavimento rígido para Cerro de Pasco mediante la metodología mecanística-empírica MEPDG 2015. Asimismo, es importante mencionar que, para la caracterización del tránsito y de los materiales, se emplearon parámetros de entrada correspondientes a estudios realizados para un proyecto de pavimentación en el distrito de Simón Bolívar en Cerro de Pasco, complementados con valores recomendados por el MEPDG 2015 y con aquellos definidos por defecto en el software mencionado anteriormente.
- Se desarrolló un Modelo Climático Integrado (ICM) de la ciudad de Cerro de Pasco bajo el enfoque de la metodología del MEPDG AASHTO 2015 denominado “Cerro de Pasco.icm”, a partir de la información climatológica obtenida, principalmente, de la estación meteorológica automática ubicada en Paragsha, monitoreada por el OEFA, cuyo periodo de recolección de información corresponde entre el 01 de enero del 2020 y el 31 de diciembre del 2021. Como se describió anteriormente, el modelo EICM considera las principales variables climáticas que influyen en el comportamiento del pavimento, tales como la nubosidad, la precipitación, la temperatura, la velocidad del viento, la humedad relativa y el nivel freático. Cabe señalar que, para la estructuración del modelo, los parámetros se procesaron en distintas escalas; la precipitación, temperatura, nubosidad, velocidad del viento y nivel freático se miden en escala horaria; mientras que, la salida y

puesta del sol, así como la radiación solar se mide en frecuencia diaria. Asimismo, la humedad relativa se mide en frecuencia mensual. Finalmente, durante la recopilación de datos climáticos se identificaron limitaciones relacionadas a la falta de datos en algunos parámetros. En el caso de la precipitación, se realizó la compatibilización de registros de diferentes estaciones del mismo lugar de estudio para completar la información faltante. Asimismo, ante la ausencia de información de la nubosidad y los horarios de salida y puesta del sol, se utilizaron fuentes digitales especializadas, como Weather Spark y Sunrise and Sunset respectivamente. De igual manera, los valores de radiación solar y nivel freático fueron estimados a partir de la revisión de literatura.

- Se diseñaron prototipos de pavimentos rígidos conforme a la metodología mecanístico empírica AASHTO 2015 (MEPDG), empleando el modelo climático desarrollado para Cerro de Pasco y los archivos climáticos disponibles en AASHTOWare Pavement ME Design para Austin y Key West. La estructura corresponde a un pavimento tipo JPCP, conformado por una subbase, base y losa de concreto (280 kg/cm²), con un periodo de diseño de 20 años y materiales clasificados como A-1-a. En los tres casos, se mantuvieron constantes las condiciones de tránsito, la caracterización de los materiales y las características del proyecto; variando únicamente el clima con el fin de evaluar su influencia en el desempeño del pavimento a lo largo de su vida útil. Se adoptaron como criterio de desempeño un IRI inicial de 63 in/mill y un IRI final de 200 in/mill, un máximo de 15% de fisuración transversal y un escalonamiento promedio no mayor a 0.2 in, para una vía colectora urbana con un nivel de confiabilidad del 99%, según lo sugerido por el MEPDG. La caracterización del tránsito y de los materiales se basó en el expediente técnico del proyecto de la Av. El Minero – Jr. Huancavelica en Cerro de Pasco, complementada

con referencias del MEPDG, revisión de literatura y valores predeterminados del software, correspondiente a un nivel de jerarquía 3.

- Se analizó la influencia del clima en el comportamiento estructural y funcional de un pavimento rígido durante su vida útil, a partir de las predicciones de desempeño para tres ciudades con climas diferentes y temperaturas medias anuales, las cuales se detallan a continuación: Cerro de Pasco (clima frío – 41.78°F), Austin (clima templado – 67.7°F) y Key West (clima muy cálido – 78.1°F). Para ello, se empleó el software *AASHTOWare Pavement ME Design*, que incorpora un modelo climático integrado que simula de manera continua las condiciones ambientales que afectan al pavimento, tales como las variaciones de temperatura en sus diferentes capas, los cambios en el contenido de humedad, la presencia de precipitación, los procesos de evaporación y drenaje, así como la influencia del nivel freático. Ello permitió simular el comportamiento térmico de las estructuras y evaluar sus respuestas mecánicas bajo condiciones variables a lo largo del tiempo durante su vida útil.
- Los criterios de desempeño finales obtenidos para los diseños de los tres escenarios climáticos analizados (frío, templado y muy cálido), donde solo se varió la información climática y se mantuvo constante las características generales del proyecto, el tránsito vehicular y la caracterización de los materiales, cumplen satisfactoriamente con los criterios de desempeño iniciales establecidos por el MEPDG 2015 bajo el nivel de confiabilidad adoptado (99%), pues los valores de los indicadores de desempeño (IRI, escalonamiento promedio de juntas y agrietamiento transversal) predichos no superan los valores umbrales.

- El análisis comparativo de los indicadores de desempeño permitió determinar que la influencia del clima sobre el pavimento rígido no es uniforme, sino que afecta de manera diferenciada el desempeño funcional y la respuesta mecánica de las capas no ligadas (base y subrasante), mientras que su incidencia en el daño estructural de la losa de concreto resultó baja debido a las condiciones de diseño adoptadas.
- Se evidenció que las variaciones de las condiciones climáticas influyen en el Índice de Rugosidad Internacional (IRI) durante la vida útil del pavimento, pues la ciudad de Cerro de Pasco (clima frío) presentó un IRI final predicho de 138.36 in/mill, valor superior al obtenido en los escenarios de climas templados y muy cálidos (Austin y Key West), lo que evidencia un mayor nivel de deterioro del pavimento sometido a condiciones de clima frío. Del mismo modo, en climas templados y muy cálidos se observó que el valor del IRI es menor, lo cual está asociado a una menor amplitud térmica diaria, mientras que en climas fríos la presencia de ciclos térmicos contribuye al alabeo de las losas y a la pérdida de rigidez de la base granular, lo que se traduce en un incremento de la rugosidad final del pavimento.
- El escalonamiento promedio de juntas transversales, cuyo desempeño está ligado al uso o no de dowels en el diseño, presentó una variación poco significativa para las tres ciudades analizadas (Cerro de Pasco, Austin y Texas), cuyos valores predichos por el PMED oscilan entre el 15% y 20% del valor umbral admisible. Este comportamiento se atribuye a la presencia de dowels, que garantizan una adecuada transferencia de cargas entre las losas, minimizando así la influencia de las condiciones climáticas. En contraste, la ausencia de dowels habría favorecido una mayor apertura de las juntas transversales, especialmente a bajas temperaturas.

- El porcentaje de agrietamiento transversal obtenido para las tres ciudades analizadas presentó valores prácticamente iguales, cuyo valor promedio fue de 6.96%, manteniéndose por debajo del criterio de desempeño establecido (15%) y no alcanzan valores críticos de fisuración. La baja sensibilidad de este indicador frente a la variación climática sugiere que el comportamiento de la fatiga del pavimento se encuentra principalmente influenciado por las características geométricas y mecánicas de la estructura, es decir, por el bajo nivel de tránsito y el carácter robusto del diseño. Ello responde a lo indicado en el MEPDG 2015 sobre el agrietamiento transversal, el cual lo describe como un mecanismo de fatiga acumulativa que depende principalmente de los niveles de esfuerzos por carga, número de repeticiones de carga, propiedades mecánicas del concreto, condiciones de soporte de la base y subrasante (k), presencia de dowels y espaciamiento de juntas.
- El módulo de la base (E_{base}) se encuentra directamente influenciado por las simulaciones ambientales realizadas mediante el *Enhanced Integrated Climatic Model* (EICM) del software *AASHTOWare Pavement ME Design*. Los resultados evidencian que, en escenarios con climas muy cálidos, la base tiende a presentar valores más altos de rigidez, asociados a la reducción de la humedad; mientras que, en climas fríos, dicha rigidez disminuye debido al incremento de la humedad y a las condiciones hidrotérmicas desfavorables. Este comportamiento confirma que el clima modula de manera significativa la capacidad de soporte efectiva de las capas del pavimento, aun cuando la geometría y los materiales permanecen constantes.
- Respecto al módulo de reacción dinámico (k) de la subrasante, se observó que se mantiene prácticamente constante a lo largo de la vida útil del proyecto en los tres escenarios climáticos analizados. Sin embargo, el modelo EICM evidenció la influencia de las

condiciones climatológicas en la magnitud de la rigidez: en climas templados y muy cálidos (Austin y Key West), las altas tasas de evaporación reducen el contenido de humedad del suelo, lo que maximiza la fricción interna y eleva el módulo k . En contraste, en el clima frío de Cerro de Pasco, la menor tasa de evaporación mantiene una saturación más alta, lo que reduce el valor de k . En resumen, esta jerarquización de comportamiento responde al contenido de humedad de equilibrio calculado por el EICM dentro del PMED. En entornos climáticos con mayores tasas de evaporación, el suelo natural tiende a mantenerse en condiciones más secas o menos saturadas, lo que permite un incremento de la fricción interna y, en consecuencia, una rigidez ligeramente superior en comparación con climas caracterizadas por menores tasas de evaporación.

- Se verificó el óptimo desempeño estructural del pavimento ante las sollicitaciones de fatiga, registrándose índices de daño acumulado insignificantes en los tres escenarios climáticos. Estos resultados evidencian que, bajo un diseño estructuralmente robusto y un tránsito bajo, el factor climático deja de ser determinante en el mecanismo de falla por fatiga, ya que las diferencias térmicas entre climas fríos, templados y muy cálidos no fueron suficientes para inducir consumos de daño significativos en la losa.
- La Norma Peruana CE.010 Pavimentos Urbanos establece el uso de la metodología empírica AASHTO 93 para el diseño, la cual limita la incorporación de parámetros reales del clima, del tráfico y de la caracterización de los materiales. Esta metodología se sustenta en los resultados de la Prueba de Carretera de la AASHTO, desarrollada a finales de los años cincuenta e inicios de los años sesenta, en los que los resultados obtenidos se convierten en parámetros estáticos y preestablecidos, que no logran representar las condiciones reales a las que estará expuesta la estructura durante su vida útil y establecen

niveles conservadores de diseño. No obstante, la normativa peruana también permite emplear otras metodologías, siempre que cuenten con una justificación técnica. En tal sentido, la implementación del MEPDG en el contexto peruano representa una oportunidad para optimizar, tanto técnicamente como económicamente, el diseño de pavimentos rígidos, promoviendo soluciones más racionales y acordes con el entorno operativo.

- Se obtuvo una optimización del 36.3% en el espesor de la losa del pavimento rígido, diseñado con el método MEPDG 2015, respecto al AASHTO 93, para Cerro de Pasco, lo cual evidencia el carácter conservador del método empírico tradicional y confirma que la metodología mecánica empírica permite obtener diseños más eficientes al optimizar el espesor de la losa sin afectar los criterios de desempeño, pues analiza las condiciones reales del comportamiento del pavimento.
- Se evidenció que, en lugares donde el tránsito vehicular es reducido, el diseño del espesor de los pavimentos, empleando el AASHTO 93, está principalmente definido por los requisitos mínimos de diseño para los diferentes tipos de pavimentos establecidos en la Norma CE.010 Pavimentos Urbanos. A pesar de que el espesor obtenido del diseño con el ASHTO 1993 fue de 12 cm (4.71in), se estableció que el espesor de diseño final sea de 15 cm, siendo este el valor mínimo del espesor de la carpeta de rodadura de un pavimento para vías colectoras urbanas según la normativa peruana.
- En síntesis, se verificó que es posible aplicar la metodología mecánica-empírica MEPDG 2015 del AASHTO en la ciudad de Cerro de Pasco mediante la creación de un archivo climático, a partir de la recopilación y validación de información climática tanto de las estaciones meteorológicas del OEFA como de recursos electrónicos. Es importante mencionar que el modelo climático desarrollado en la presente tesis es exclusivamente para

Cerro de Pasco y constituye un aporte a la base de datos de información climática local disponible para el diseño mediante la metodología MEPDG, la cual podría ser utilizada en futuras investigaciones orientadas a la calibración, validación e implementación del método para el diseño de pavimentos en Cerro de Pasco. Asimismo, se evidenció el impacto de las condiciones climáticas en el diseño y la predicción del deterioro de pavimentos rígidos sometidos a diferentes condiciones climáticas (clima frío, clima templado y clima muy cálido). Finalmente, se propone difundir el uso de la metodología mecanística empírica en el Perú, lo cual conllevaría una optimización no solo en costos, sino también en el mantenimiento.

6.2.Recomendaciones

- Se recomienda ampliar la base de datos climática nacional mediante la implementación y el fortalecimiento de estaciones meteorológicas automáticas en el Perú. Durante el desarrollo de la presente investigación, se constató que en el caso de Cerro de Pasco no había estaciones automáticas operativas del SENAMHI, lo cual dificultó la obtención de la información climática horaria necesaria para su caracterización. La implementación de estas estaciones permitiría integrar de manera sistemática la información de esta entidad y generar archivos ICM representativos en las diferentes regiones del país.
- Se recomienda desarrollar estudios de calibración local de la metodología MEPDG para diferentes condiciones peruanas, incorporando información representativa del tránsito, del clima y de la caracterización de materiales. Este esfuerzo permitiría ajustar los modelos de predicción a la realidad nacional y constituir una base técnica que respalde, en el mediano plazo, la implementación y la adopción progresivas del enfoque mecanístico-empírico en el diseño de pavimentos.

- Extender el análisis a pavimentos flexibles, evaluando la influencia del clima en los materiales asfálticos, donde los efectos térmicos suelen ser más críticos. Adicionalmente, ampliar la red de sistemas de pesaje en movimiento (WIM - Weigh-in-Motion) en el país, para facilitar la obtención de información para la elaboración de los espectros de carga del tránsito vehicular según el lugar de estudio.



BIBLIOGRAFÍA

- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2008). *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide - A Manual of Practice*. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO).
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2015). *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide - A Manual of Practice*. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO).
- Carvalho, R., & Schwartz, C. (2006). Comparisons of Flexible Pavement Designs: AASHTO Empirical Versus NCHRP Project 1-37A Mechanistic-Empirical. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 167-174.
<https://doi.org/10.1177/0361198106194700116>
- Chang, C., Vidal, J., Loría, L., Bustos, M., & Delgadillo, R. (2013). *Aplicabilidad del método mecanístico-empírico de diseño de pavimentos (MEPDG) AASHTO 2008 en Latinoamérica*. Lanamme-Universidad de Costa Rica.
- Condezo, M. (2019). *Análisis de estabilidad de taludes, empleando métodos aproximados de dovelas, en depósitos de desmonte de mina Excelsior - Pasco*.
- Fahim, A., Jay, T., Dahae, K., Nathan, H., & Eric, C. (2023). Evaluation of pavement service life using AASHTO 1972 and mechanistic-empirical pavement design guides. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 12, 46-61.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2021.11.004>

- Gaspard, k., Zhang, Z., Gautreau, G., Abufarsakh, & Martinez, M. (2020). *Assessment of Environmental, Seasonal, and Regional Variations in Pavement Base and Subgrade Properties*. Louisiana Department of Transportation and Development. https://www.ltrc.lsu.edu/pdf/2020/FR_621.pdf
- Ghos, S., Ali, S. A., Zaman, M., Chen, D. H., Hobson, K. R., & Michael, B. (2022). Evaluation of transverse cracking in flexible pavements using field investigation and AASHTOWare Pavement ME Design. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 15, 561 - 576. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s42947-021-00037-x>
- Hatoum, A., Khatib, J., & Elkordi, A. (2023). Comparison of Flexible Pavement Designs: Mechanistic-Empirical (NCHRP1-37A) Versus Empirical (AASHTO 1993) Flexible Pavement Design Using Available Local Calibration Models. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 11, 810-832. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s40515-023-00305-2>
- Huang, Y. (2004). *PAVEMENT ANALYSIS AND DESIGN* (2nd ed.). Pearson Prentice Hall.
- Instituto Geofísico Peruano. (s.f.). *Criterio de clasificación climática*. <http://met.igp.gob.pe/clima/clasif.html>
- Instituto para el Desarrollo de los Pavimentos en el Perú. (2005). *La Nueva Guía para el Diseño Empírico - Mecánico de Pavimentos*. Lima, Perú.
- Johanneck, L., & Khazanovich, L. (2010). Comprehensive Evaluation of Effect of Climate in Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide Predictions. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 2170(1), 45-55. <https://doi.org/https://doi.org/10.3141/2170-0>

- Li, Q., Xiao, D., Wang, K., Hall, K., & Qiu, Y. (2011). Mechanistic-empirical pavement design guide (MEPDG): a bird's-eye view. *Journal of Modern Transportation*, 19, 114-133. <https://doi.org/10.1007/BF03325749>
- Menéndez, J. (2016). *Ingeniería de Pavimentos* (Primera ed., Vol. II). Instituto de la Construcción y Gerencia.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2014). *Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos - Sección Suelos y Pavimentos*.
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento del Perú. (2010). *CE.010 Pavimentos Urbanos DS N° 010-2010*.
- Montejo, A. (2002). *INGENIERÍA DE PAVIMENTOS PARA CARRETERAS* (2a ed.). Bogotá, Colombia: Universidad Católica de Colombia Ediciones y Publicaciones.
- Municipalidad Distrital De Simon Bolivar. (2022). *EXPEDIENTE TÉCNICO: MEJORAMIENTO Y AMPLIACIÓN DEL SERVICIO DE MOVILIDAD URBANA EN LA INTERCONEXION VIAL DE LA AV. EL MINERO JR. HUANCAVELICA CENTRO POBLADO DE PARAGSHA DEL DISTRITO SIMÓN BOLÍVAR*. <https://prod2.seace.gob.pe/seacebus-uiwd-pub/fichaSeleccion/fichaArchivoExpedienteTecnicoObra.xhtml?id=a993dd27-f85e-43ae-82bf-9b19b4e8f881>
- National Cooperative Highway Research Program. (2004). *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures (Project 1-37A)*. Transportation Research Board.

- National Cooperative Highway Research Program. (2008). *Calibration and validation of the enhanced integrated climatic model (EICM) (NCHRP Report No. 602)*. Transportation Research Board, National Academies Press.
- Packard, R. (1984). *Thickness Design for Concrete Highways and Street Pavements*. Illinois, Estados Unidos: Portland Cement Association (PCA).
- Portland Cement Association. (s.f). *Aggregates for concrete*.
<https://www.cement.org/learn/concrete-technology/concrete-design-production/aggregates-for-concrete>
- Sadasivam, S., & Morian, D. (2006). *Effects of Groundwater Table Depths on Predicted Performance of Pavements*. Transportation Research Board 85th Annual Meeting.
- SENAMHI. (2003). *Atlas de energía solar del Perú*. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI).
<https://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/343>
- Sultana, S., Yasarer, H., & Barros, R. (2022). Evaluating the Effect of Climate Change in Pavement Performance Modeling Using Artificial Neural Network Approach. *International Conference on Transportation and Development 2022* (pp. 49-60). Seattle, Washington: American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1061/9780784484357.005>
- Swarna, S. T., & Hossain, K. (2022). Climate change impact and adaptation for highway asphalt pavements: a literature review. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 49(7), 1109-1120.
<https://doi.org/10.1139/cjce-2021-0209>

Vivar, G. (1995). *DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS* (2a ed.). Lima, Perú: Colegio de Ingenieros del Perú.

World Bank Group. (2019). *Global Solar Atlas*. Energy Sector Management Assistance Program (ESMAP). <https://globalsolaratlas.info/download/peru>

World Meteorological Organization. (2018). *Guide to Instruments and Methods of Observation: Volume I – Measurement of Meteorological Variables (WMO-No. 8)*. <https://community.wmo.int/site/knowledge-hub/programmes-and-initiatives/instruments-and-methods-of-observation-programme-imop/guide-instruments-and-methods-of-observation-wmo-no-8>



ANEXOS

Anexo A: Resultados de PMED para Cerro De Pasco I – Perú



CERRO DE PASCO 2026 V1

File Name: C:\Program Files (x86)\AASHTOWare\My ME Design\Projects\CERRO DE PASCO 2026 V1.dgpx



Design Inputs

Design Life: 20 years Existing construction: - Climate Data: -10.66748, -76.2566
 Design Type: Jointed Plain Concrete Pavement (JPCP) Pavement construction: June, 2028 Sources (Lat/Lon)
 Traffic opening: September, 2028

Design Structure Traffic

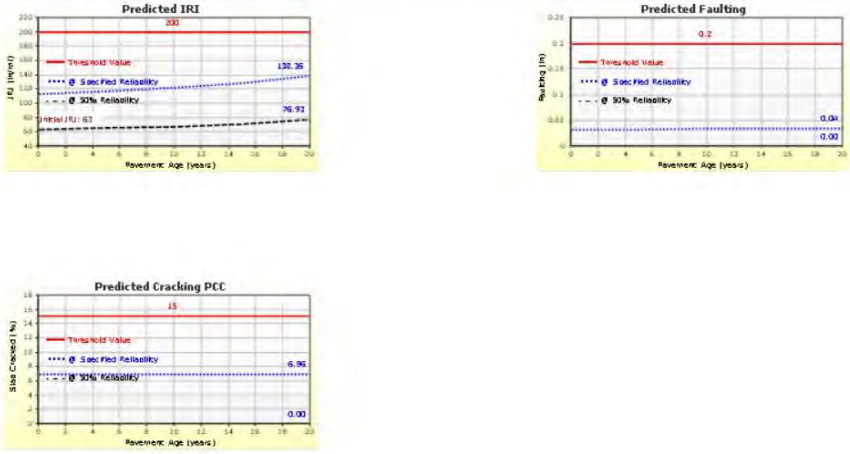
Layer type	Material Type	Thickness (in.)	Joint Design:		Age (year)	Heavy Trucks (cumulative)
PCC	JPCP Default	3.0	Joint spacing (ft)	8.9	2028 (initial)	22
NonStabilized	A-1-a	7.9	Dowel diameter (in.)	1.00	2038 (10 years)	43,278
Subgrade	A-1-a	Semi-infinite	Slab width (ft)	12.0 (w)	2048 (20 years)	91,484

Design Outputs

Distress Prediction Summary

Distress Type	Distress @ Specified Reliability		Reliability (%)		Criterion Satisfied?
	Target	Predicted	Target	Achieved	
Terminal IRI (in./mile)	200.00	138.36	99.00	100.00	Pass
Mean joint faulting (in.)	0.20	0.04	99.00	100.00	Pass
JPCP transverse cracking (percent slabs)	15.00	6.96	99.00	100.00	Pass

Distress Charts





CERRO DE PASCO 2026 V1

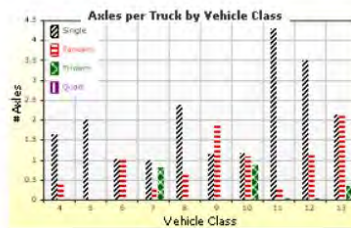
File Name: C:\Program Files (x86)\AASHTOWare\My ME Design\Projects\CERRO DE PASCO 2026 V1.dgpx



Traffic Inputs

Graphical Representation of Traffic Inputs

Initial two-way AADTT:	22	Percent of trucks in design direction (%):	51.1
Number of lanes in design direction:	2	Percent of trucks in design lane (%):	100.0
		Operational speed (mph)	60.0



Traffic Volume Monthly Adjustment Factors





CERRO DE PASCO 2026 V1

File Name: C:\Program Files (x86)\AASHTOWare\My ME Design\Projects\CERRO DE PASCO 2026 V1.dgpx



Tabular Representation of Traffic Inputs

Volume Monthly Adjustment Factors Level 3: Default MAF

Month	Vehicle Class									
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
January	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
February	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
March	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
April	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
May	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
June	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
July	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
August	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
September	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
October	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
November	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
December	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

Distributions by Vehicle Class

Vehicle Class	AADTT Distribution (%) (Level 3)	Growth Factor	
		Rate (%)	Function
Class 4	0%	1.2%	Linear
Class 5	66.7%	1.2%	Linear
Class 6	30%	1.2%	Linear
Class 7	3.3%	1.2%	Linear
Class 8	0%	1.2%	Linear
Class 9	0%	1.2%	Linear
Class 10	0%	1.2%	Linear
Class 11	0%	1.2%	Linear
Class 12	0%	1.2%	Linear
Class 13	0%	1.2%	Linear

Truck Distribution by Hour

Hour	Distribution (%)	Hour	Distribution (%)
12 AM	2.3%	12 PM	5.9%
1 AM	2.3%	1 PM	5.9%
2 AM	2.3%	2 PM	5.9%
3 AM	2.3%	3 PM	5.9%
4 AM	2.3%	4 PM	4.6%
5 AM	2.3%	5 PM	4.6%
6 AM	5%	6 PM	4.6%
7 AM	5%	7 PM	4.6%
8 AM	5%	8 PM	3.1%
9 AM	5%	9 PM	3.1%
10 AM	5.9%	10 PM	3.1%
11 AM	5.9%	11 PM	3.1%
Total		100%	

Axle Configuration

Traffic Wander		Axle Configuration	
Mean wheel location (in.)	18	Average axle width (ft)	8.5
Traffic wander standard deviation (in.)	10	Dual tire spacing (in.)	12
Design lane width (ft)	12	Tire pressure (psi)	120

Number of Axles per Truck

Vehicle Class	Single Axle	Tandem Axle	Tridem Axle	Quad Axle
Class 4	1.62	0.39	0	0
Class 5	2	0	0	0
Class 6	1.02	0.99	0	0
Class 7	1	0.26	0.83	0
Class 8	2.38	0.67	0	0
Class 9	1.13	1.93	0	0
Class 10	1.19	1.09	0.89	0
Class 11	4.29	0.26	0.06	0
Class 12	3.52	1.14	0.06	0
Class 13	2.15	2.13	0.35	0

Average Axle Spacing		Wheelbase			
Value Type	Axle Type	Short	Medium	Long	
Tandem axle spacing (in.)	51.6				
Tridem axle spacing (in.)	49.2				
Quad axle spacing (in.)	49.2				
Average spacing of axles (ft)		12	15	18	
Percent of Trucks (%)		33	33	34	



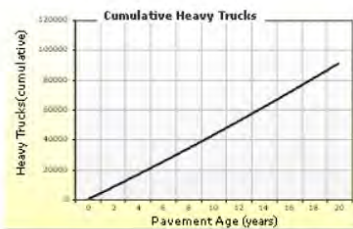
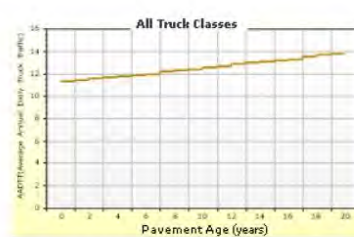
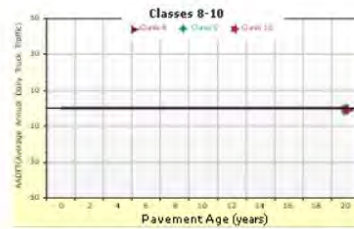
CERRO DE PASCO 2026 V1

File Name: C:\Program Files (x86)\AASHTOWare\My ME Design\Projects\CERRO DE PASCO 2026 V1.dgpx



AADTT (Average Annual Daily Truck Traffic) Growth

* Traffic Cap Enforced at calculated value of 77760, but not reached.





CERRO DE PASCO 2026 V1

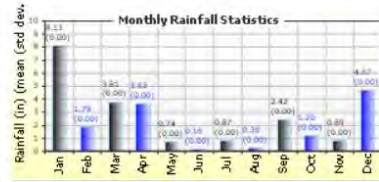
File Name: C:\Program Files (x86)\AASHTOWare\My ME Design\Projects\CERRO DE PASCO 2026 V1.dgpx



Climate Inputs

Climate Data Sources:

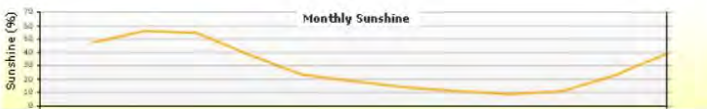
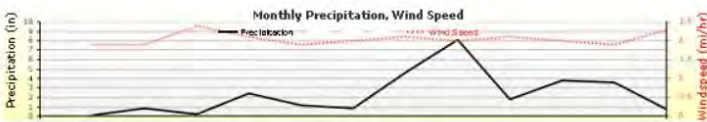
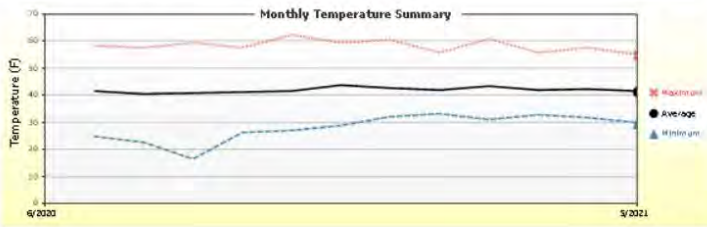
Climate Station Cities: Location (lat lon elevation(ft))
 CERRO DE PASCO, PE -10.66748 -76.25660 14370



Annual Statistics:

Mean annual air temperature (°F) 41.85
 Mean annual precipitation (in.) 28.59
 Freezing index (°F - days) 45.05
 Average annual number of freeze/thaw cycles: 82.83
 Water table depth (ft) 6.07

Monthly Climate Summary:



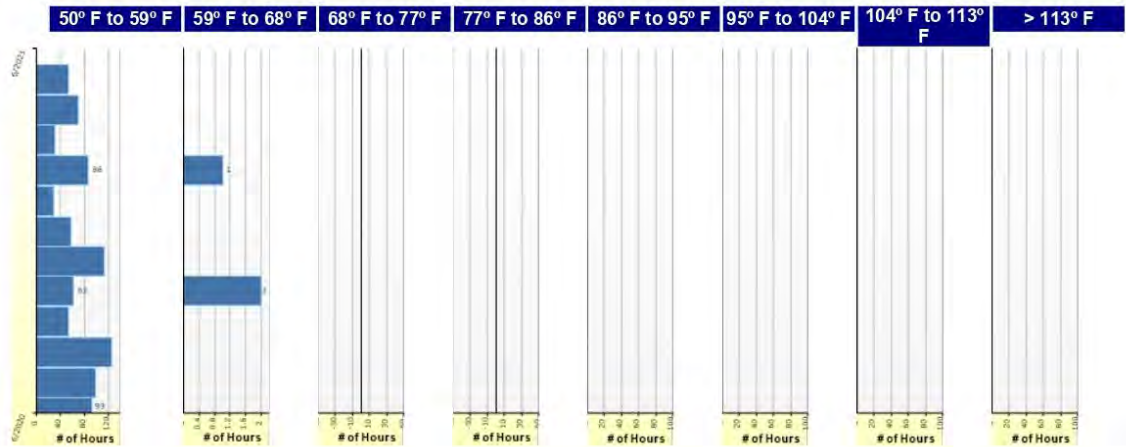
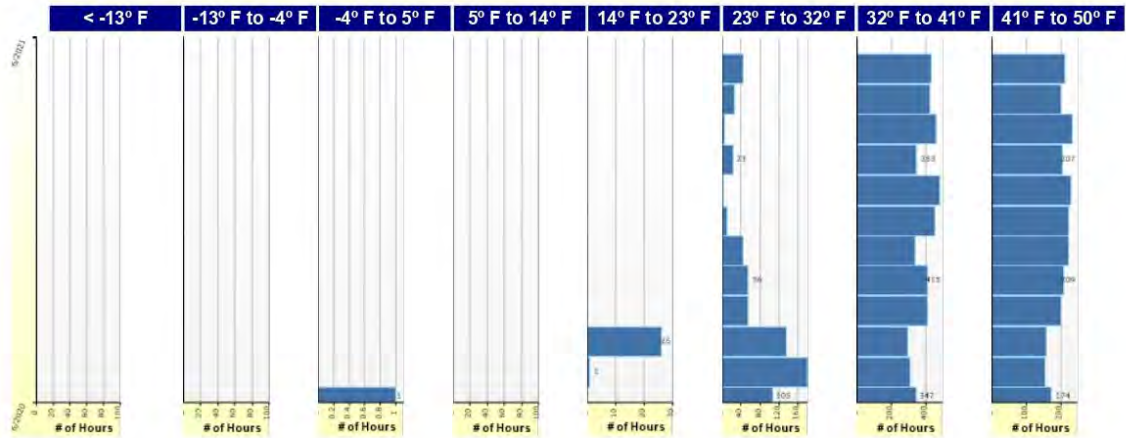


CERRO DE PASCO 2026 V1

File Name: C:\Program Files (x86)\AASHTOWare\My ME Design\Projects\CERRO DE PASCO 2026 V1.dgpx



Hourly Air Temperature Distribution by Month:



Report generated on: 11/01/2026 20:16

Created by: on: 9/01/2026 20:31

Approved by: on: 9/01/2026 20:31

Page 6 of 14



CERRO DE PASCO 2026 V1

File Name: C:\Program Files (x86)\AASHTOWare\My ME Design\Projects\CERRO DE PASCO 2026 V1.dgpx



Design Properties

JPCP Design Properties

Structure - ICM Properties	
PCC surface shortwave absorptivity	0.85

Doweled Joints	
Is joint doweled ?	True
Dowel diameter (in.)	1.00
Dowel spacing (in.)	12.00

Tied Shoulders	
Tied shoulders	False
Load transfer efficiency (%)	-

PCC joint spacing (ft)	
Is joint spacing random ?	False
Joint spacing (ft)	8.86

Widened Slab	
Is slab widened ?	True
Slab width (ft)	12.00

PCC-Base Contact Friction	
PCC-Base full friction contact	True
Months until friction loss	240.00

Sealant type	Preformed
--------------	-----------

Erodibility index	3
-------------------	---

Permanent curl/warp effective temperature difference (°F)	-10.00
---	--------

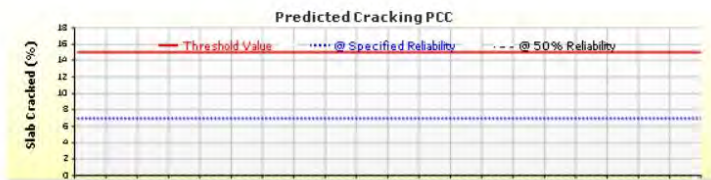
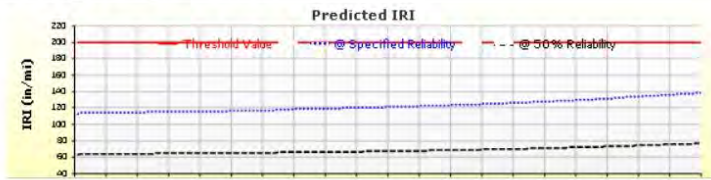


CERRO DE PASCO 2026 V1

File Name: C:\Program Files (x86)\AASHTOWare\My ME Design\Projects\CERRO DE PASCO 2026 V1.dgpx



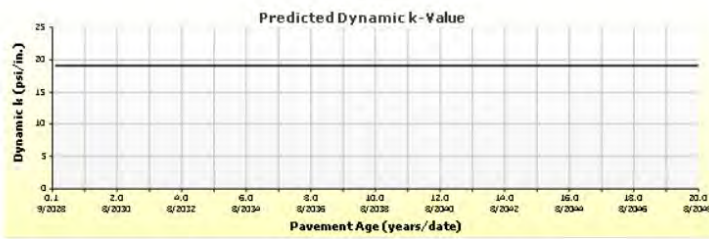
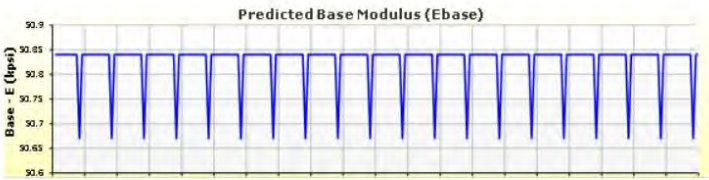
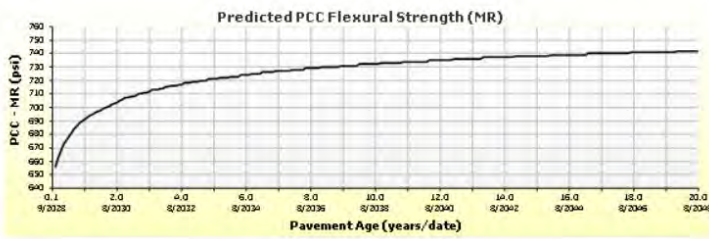
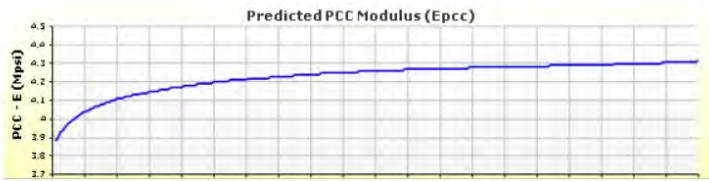
Analysis Output Charts





CERRO DE PASCO 2026 V1

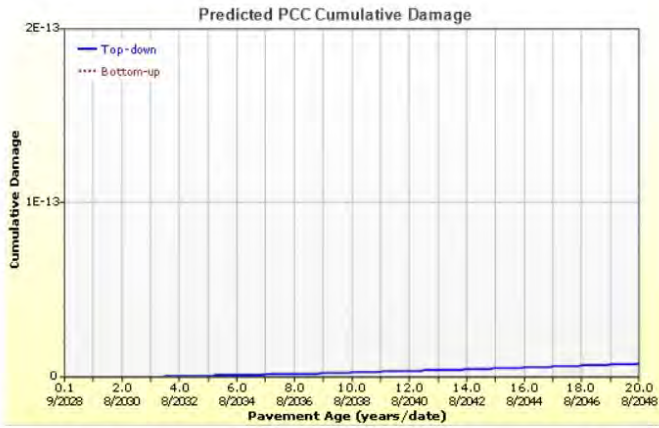
File Name: C:\Program Files (x86)\AASHTOWare\My ME Design\Projects\CERRO DE PASCO 2026 V1.dgpx





CERRO DE PASCO 2026 V1

File Name: C:\Program Files (x86)\AASHTOWare\My ME Design\Projects\CERRO DE PASCO 2026 V1.dgpx





CERRO DE PASCO 2026 V1

File Name: C:\Program Files (x86)\AASHTOWare\My ME Design\Projects\CERRO DE PASCO 2026 V1.dgpx



Layer Information

Layer 1 PCC : JPCP Default

PCC	
Thickness (in.)	3.0
Unit weight (pcf)	143.6
Poisson's ratio	0.2

Thermal	
PCC coefficient of thermal expansion (in./in.°F x 10 ⁻⁶)	5.5
PCC thermal conductivity (BTU/hr-ft-°F)	1.25
PCC heat capacity (BTU/lb-°F)	0.28

Mix		
Cement type	Type I (1)	
Cementitious material content (lb/yd ³)	657	
Water to cement ratio	0.5	
Aggregate type	Granite (3)	
PCC zero-stress temperature (°F)	Calculated Internally?	True
	User Value	-
	Calculated Value	62.8
Ultimate shrinkage (microstrain)	Calculated Internally?	True
	User Value	-
	Calculated Value	898.3
Reversible shrinkage (%)	50	
Time to develop 50% of ultimate shrinkage (days)	35	
Curing method	Curing Compound	

PCC strength and modulus (Input Level: 3)

28-Day PCC modulus of rupture (psi)	614.0
28-Day PCC elastic modulus (psi)	3570020.0

Identifiers

Field	Value
Display name/identifier	JPCP Default
Description of object	
Author	
Date Created	9/01/2026 20:33:49
Approver	
Date approved	9/01/2026 20:33:49
State	
District	
County	
Highway	
Direction of Travel	
From station (miles)	
To station (miles)	
Province	
User defined field 2	
User defined field 3	
Revision Number	0



CERRO DE PASCO 2026 V1

File Name: C:\Program Files (x86)\AASHTOWare\My ME Design\Projects\CERRO DE PASCO 2026 V1.dgpx



Layer 2 Non-stabilized Base : A-1-a

Unbound	
Layer thickness (in.)	7.9
Poisson's ratio	0.35
Coefficient of lateral earth pressure (k0)	0.5

Modulus (Input Level: 3)

Analysis Type:	Modify input values by temperature/moisture
Method:	Resilient Modulus (psi)

Resilient Modulus (psi)
40000.0

Use Correction factor for NDT modulus?	-
NDT Correction Factor:	-

Identifiers

Field	Value
Display name/identifier	A-1-a
Description of object	Default material
Author	AASHTO
Date Created	1/01/2011 00:00:00
Approver	
Date approved	1/01/2011 00:00:00
State	
District	
County	
Highway	
Direction of Travel	
From station (miles)	
To station (miles)	
Province	
User defined field 2	
User defined field 3	
Revision Number	0

Sieve

Liquid Limit	6.0
Plasticity Index	1.0
Is layer compacted?	False

	Is User Defined?	Value
Maximum dry unit weight (pcf)	False	127.2
Saturated hydraulic conductivity (ft/hr)	False	5.054e-02
Specific gravity of solids	False	2.7
Optimum gravimetric water content (%)	False	7.4

User-defined Soil Water Characteristic Curve (SWCC)

Is User Defined?	False
af	7.2555
bf	1.3328
cf	0.8242
hr	117.4000

Sieve Size	% Passing
0.001mm	
0.002mm	
0.020mm	
#200	8.7
#100	
#80	12.9
#60	
#50	
#40	20.0
#30	
#20	
#16	
#10	33.8
#8	
#4	44.7
3/8-in.	57.2
1/2-in.	63.1
3/4-in.	72.7
1-in.	78.8
1 1/2-in.	85.8
2-in.	91.6
2 1/2-in.	
3-in.	
3 1/2-in.	97.6



CERRO DE PASCO 2026 V1

File Name: C:\Program Files (x86)\AASHTOWare\My ME Design\Projects\CERRO DE PASCO 2026 V1.dgpx



Layer 3 Subgrade : A-1-a

Unbound	
Layer thickness (in.)	Semi-infinite
Poisson's ratio	0.35
Coefficient of lateral earth pressure (k0)	0.5

Modulus (Input Level: 3)

Analysis Type:	Modify input values by temperature/moisture
Method:	Resilient Modulus (psi)

Resilient Modulus (psi)
18000.0

Use Correction factor for NDT modulus?	-
NDT Correction Factor:	-

Identifiers

Field	Value
Display name/identifier	A-1-a
Description of object	Default Material
Author	AASHTO
Date Created	1/01/2011 00:00:00
Approver	
Date approved	1/01/2011 00:00:00
State	
District	
County	
Highway	
Direction of Travel	
From station (miles)	
To station (miles)	
Province	
User defined field 2	
User defined field 3	
Revision Number	0

Sieve

Liquid Limit	6.0
Plasticity Index	1.0
Is layer compacted?	False

	Is User Defined?	Value
Maximum dry unit weight (pcf)	False	127.2
Saturated hydraulic conductivity (ft/hr)	False	5.054e-02
Specific gravity of solids	False	2.7
Optimum gravimetric water content (%)	False	7.4

User-defined Soil Water Characteristic Curve (SWCC)

Is User Defined?	False
af	7.2555
bf	1.3328
cf	0.8242
hr	117.4000

Sieve Size	% Passing
0.001mm	
0.002mm	
0.020mm	
#200	8.7
#100	
#80	12.9
#60	
#50	
#40	20.0
#30	
#20	
#16	
#10	33.8
#8	
#4	44.7
3/8-in.	57.2
1/2-in.	63.1
3/4-in.	72.7
1-in.	78.8
1 1/2-in.	85.8
2-in.	91.6
2 1/2-in.	
3-in.	
3 1/2-in.	97.6



CERRO DE PASCO 2026 V1

File Name: C:\Program Files (x86)\AASHTOWare\My ME Design\Projects\CERRO DE PASCO 2026 V1.dgpx



Calibration Coefficients

PCC Faulting

$$C_{12} = C_1 + (C_2 * FR^{0.25})$$

$$C_{34} = C_3 + (C_4 * FR^{0.25})$$

$$FaultMax_0 = C_{12} * \delta_{curving} * \left[\log(1 + C_5 * 5.0^{EROD}) * \log \left(P_{200} * \frac{WetDays}{p_s} \right) \right]^{C_6}$$

$$FaultMax_i = FaultMax_0 + C_7 * \sum_{j=1}^m DE_j * \log(1 + C_5 * 5.0^{EROD})^{C_6}$$

$$\Delta Fault_i = C_{34} * (FaultMax_{i-1} - Fault_{i-1})^2 * DE_i$$

$C_8 = DowelDeterioration$

C1: 1.0184	C2: 0.91656	C3: 0.0021848	C4: 0.000883739
------------	-------------	---------------	-----------------

C5: 250	C6: 0.4	C7: 1.83312	C8: 400
---------	---------	-------------	---------

PCC Reliability Faulting Standard Deviation

$Pow(0.0097 * FAULT, 0.5178) + 0.014$

IRI-jpcp

C1 - Cracking	C1: 0.8203	C2: 0.4417
C2 - Spalling	C3: 1.4929	C4: 25.24
C3 - Faulting	Reliability Standard Deviation	
C4 - Site Factor	5.4	

PCC Cracking

$\log(N) = C1 * \left(\frac{MR}{\sigma} \right)^{C2}$ $CRK = \frac{100}{1 + C4 * FD^{C5}}$	Fatigue Coefficients		Cracking Coefficients	
	C1: 2	C2: 1.22	C4: 1	C5: -1.98
PCC Reliability Cracking Standard Deviation				
$Pow(5.3116 * CRACK, 0.3903) + 2.99$				

Anexo B: Resultados de PMED para Cerro de Pasco II – Perú



CERRO DE PASCO 2026 V2

File Name: C:\Program Files (x86)\AASHTOWare\My ME Design\Projects\CERRO DE PASCO 2026 V2.dgpx



Design Inputs

Design Life: 20 years Existing construction: - Climate Data -10.66748, -76.2566
 Design Type: Jointed Plain Concrete Pavement (JPCP) Pavement construction: June, 2028 Sources (Lat/Lon)
 Traffic opening: September, 2028

Design Structure



Layer type	Material Type	Thickness (in.)	Joint Design:	
PCC	JPCP Default	5.9	Joint spacing (ft)	8.9
NonStabilized	A-1-a	7.9	Dowel diameter (in.)	1.00
Subgrade	A-1-a	Semi-infinite	Slab width (ft)	12.0 (w)

Traffic

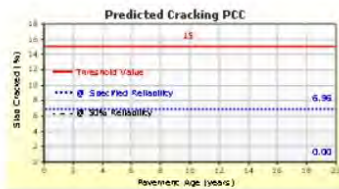
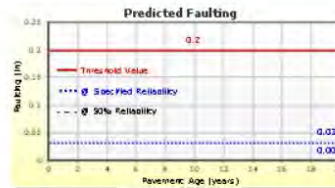
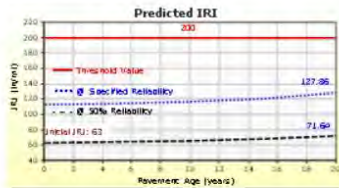
Age (year)	Heavy Trucks (cumulative)
2028 (initial)	22
2038 (10 years)	43,278
2048 (20 years)	91,484

Design Outputs

Distress Prediction Summary

Distress Type	Distress @ Specified Reliability		Reliability (%)		Criterion Satisfied?
	Target	Predicted	Target	Achieved	
Terminal IRI (in./mile)	200.00	127.86	99.00	100.00	Pass
Mean joint faulting (in.)	0.20	0.03	99.00	100.00	Pass
JPCP transverse cracking (percent slabs)	15.00	6.96	99.00	100.00	Pass

Distress Charts





CERRO DE PASCO 2026 V2

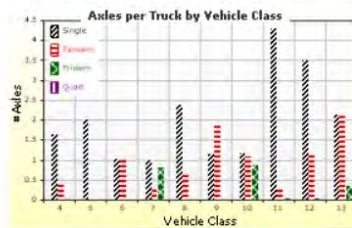
File Name: C:\Program Files (x86)\AASHTOWare\My ME Design\Projects\CERRO DE PASCO 2026 V2.dgpx



Traffic Inputs

Graphical Representation of Traffic Inputs

Initial two-way AADTT:	22	Percent of trucks in design direction (%):	51.1
Number of lanes in design direction:	2	Percent of trucks in design lane (%):	100.0
		Operational speed (mph)	60.0



Traffic Volume Monthly Adjustment Factors





CERRO DE PASCO 2026 V2

File Name: C:\Program Files (x86)\AASHTOWare\My ME Design\Projects\CERRO DE PASCO 2026 V2.dgpx



Tabular Representation of Traffic Inputs

Volume Monthly Adjustment Factors Level 3: Default MAF

Month	Vehicle Class									
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
January	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
February	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
March	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
April	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
May	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
June	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
July	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
August	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
September	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
October	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
November	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
December	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

Distributions by Vehicle Class

Vehicle Class	AADTT Distribution (%) (Level 3)	Growth Factor	
		Rate (%)	Function
Class 4	0%	1.2%	Linear
Class 5	66.7%	1.2%	Linear
Class 6	30%	1.2%	Linear
Class 7	3.3%	1.2%	Linear
Class 8	0%	1.2%	Linear
Class 9	0%	1.2%	Linear
Class 10	0%	1.2%	Linear
Class 11	0%	1.2%	Linear
Class 12	0%	1.2%	Linear
Class 13	0%	1.2%	Linear

Truck Distribution by Hour

Hour	Distribution (%)	Hour	Distribution (%)
12 AM	2.3%	12 PM	5.9%
1 AM	2.3%	1 PM	5.9%
2 AM	2.3%	2 PM	5.9%
3 AM	2.3%	3 PM	5.9%
4 AM	2.3%	4 PM	4.6%
5 AM	2.3%	5 PM	4.6%
6 AM	5%	6 PM	4.6%
7 AM	5%	7 PM	4.6%
8 AM	5%	8 PM	3.1%
9 AM	5%	9 PM	3.1%
10 AM	5.9%	10 PM	3.1%
11 AM	5.9%	11 PM	3.1%
Total		100%	

Axle Configuration

Traffic Wander		Axle Configuration	
Mean wheel location (in.)	18	Average axle width (ft)	8.5
Traffic wander standard deviation (in.)	10	Dual tire spacing (in.)	12
Design lane width (ft)	12	Tire pressure (psi)	120

Number of Axles per Truck

Vehicle Class	Single Axle	Tandem Axle	Tridem Axle	Quad Axle
Class 4	1.62	0.39	0	0
Class 5	2	0	0	0
Class 6	1.02	0.99	0	0
Class 7	1	0.26	0.83	0
Class 8	2.38	0.67	0	0
Class 9	1.13	1.93	0	0
Class 10	1.19	1.09	0.89	0
Class 11	4.29	0.26	0.06	0
Class 12	3.52	1.14	0.06	0
Class 13	2.15	2.13	0.35	0

Average Axle Spacing		Wheelbase			
Value Type	Axle Type	Short	Medium	Long	
Tandem axle spacing (in.)	51.6				
Tridem axle spacing (in.)	49.2				
Quad axle spacing (in.)	49.2				
Average spacing of axles (ft)		12	15	18	
Percent of Trucks (%)		33	33	34	



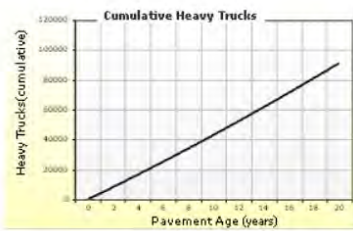
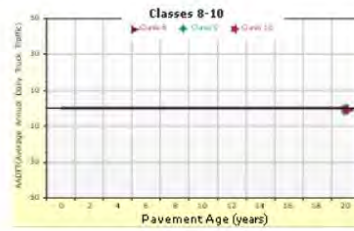
CERRO DE PASCO 2026 V2

File Name: C:\Program Files (x86)\AASHTOWare\My ME Design\Projects\CERRO DE PASCO 2026 V2.dgpx



AADTT (Average Annual Daily Truck Traffic) Growth

* Traffic Cap Enforced at calculated value of 77760, but not reached.





CERRO DE PASCO 2026 V2

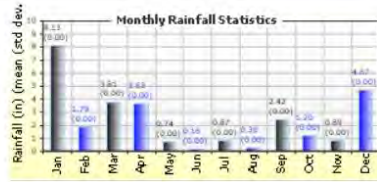
File Name: C:\Program Files (x86)\AASHTOWare\My ME Design\Projects\CERRO DE PASCO 2026 V2.dgpx



Climate Inputs

Climate Data Sources:

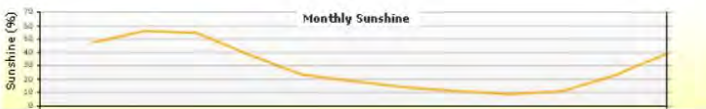
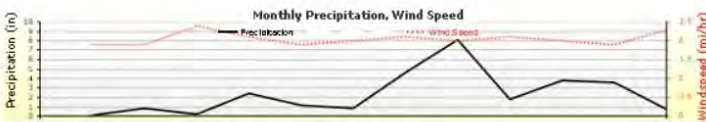
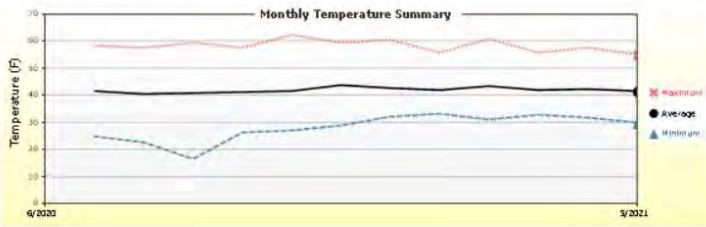
Climate Station Cities: Location (lat lon elevation(ft))
 CERRO DE PASCO, PE -10.66748 -76.25660 14370



Annual Statistics:

Mean annual air temperature (°F) 41.85
 Mean annual precipitation (in.) 28.59
 Freezing index (°F - days) 45.05
 Average annual number of freeze/thaw cycles: 82.83
 Water table depth (ft) 6.07

Monthly Climate Summary:



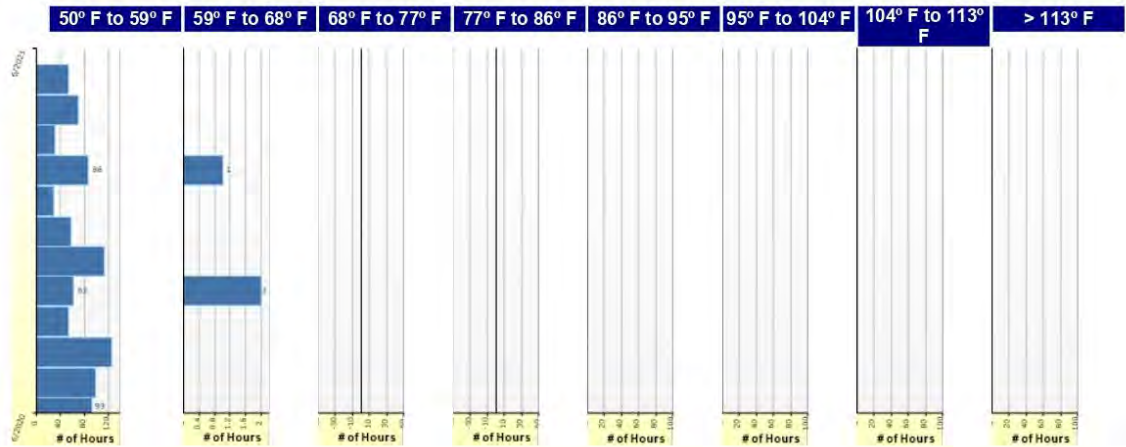
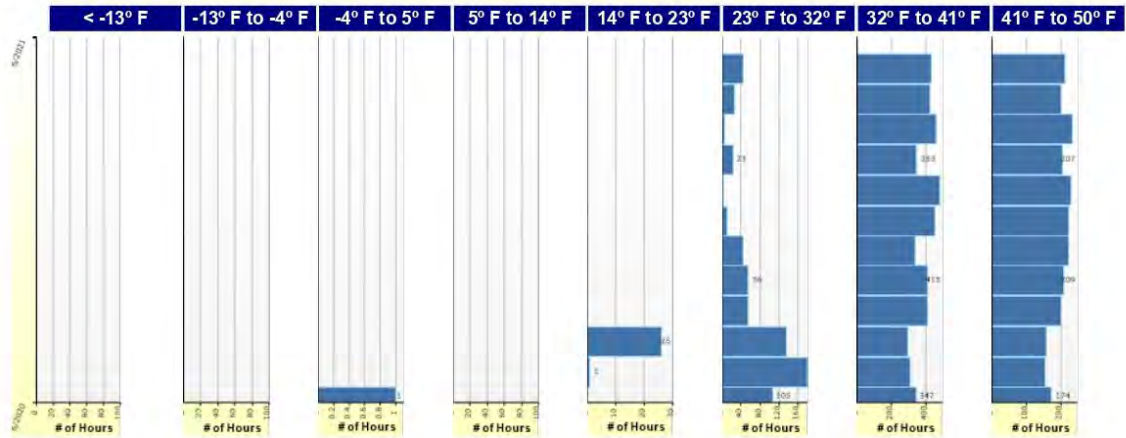


CERRO DE PASCO 2026 V2

File Name: C:\Program Files (x86)\AASHTOWare\My ME Design\Projects\CERRO DE PASCO 2026 V2.dgpx



Hourly Air Temperature Distribution by Month:



Report generated on:
14/01/2026 19:37

Created by:
on: 9/01/2026 20:31

Approved by:
on: 9/01/2026 20:31

Page 6 of 14



CERRO DE PASCO 2026 V2

File Name: C:\Program Files (x86)\AASHTOWare\My ME Design\Projects\CERRO DE PASCO 2026 V2.dgpx



Design Properties

JPCP Design Properties

Structure - ICM Properties	
PCC surface shortwave absorptivity	0.85

Doweled Joints	
Is joint doweled ?	True
Dowel diameter (in.)	1.00
Dowel spacing (in.)	12.00

Tied Shoulders	
Tied shoulders	False
Load transfer efficiency (%)	-

PCC joint spacing (ft)	
Is joint spacing random ?	False
Joint spacing (ft)	8.86

Widened Slab	
Is slab widened ?	True
Slab width (ft)	12.00

PCC-Base Contact Friction	
PCC-Base full friction contact	True
Months until friction loss	240.00

Sealant type	Preformed
--------------	-----------

Erodibility index	3
-------------------	---

Permanent curl/warp effective temperature difference (°F)	-10.00
---	--------

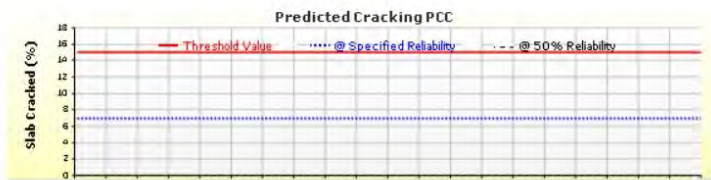
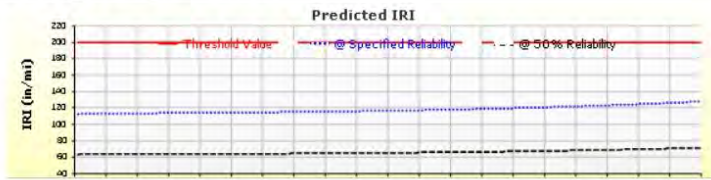


CERRO DE PASCO 2026 V2

File Name: C:\Program Files (x86)\AASHTOWare\My ME Design\Projects\CERRO DE PASCO 2026 V2.dgpx



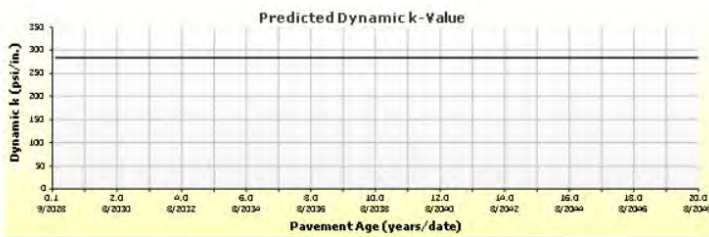
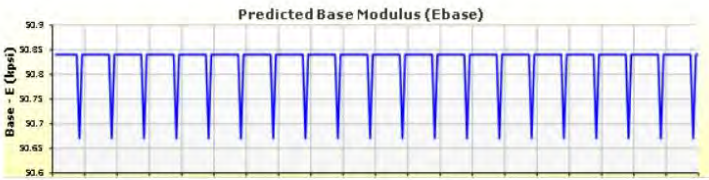
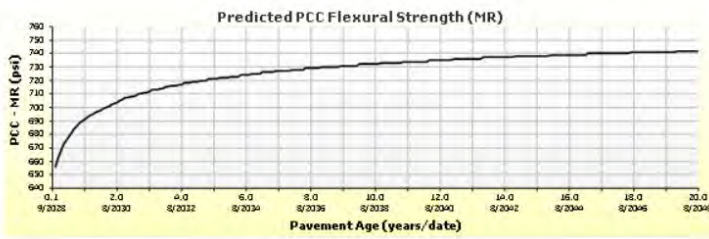
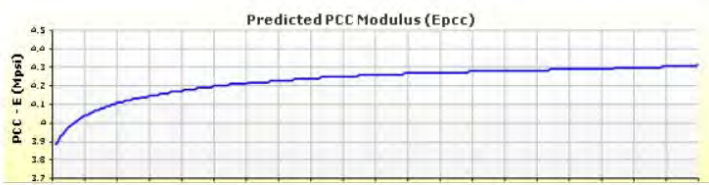
Analysis Output Charts





CERRO DE PASCO 2026 V2

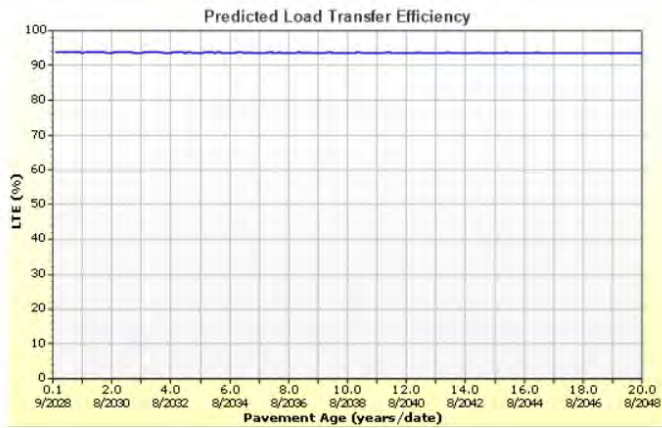
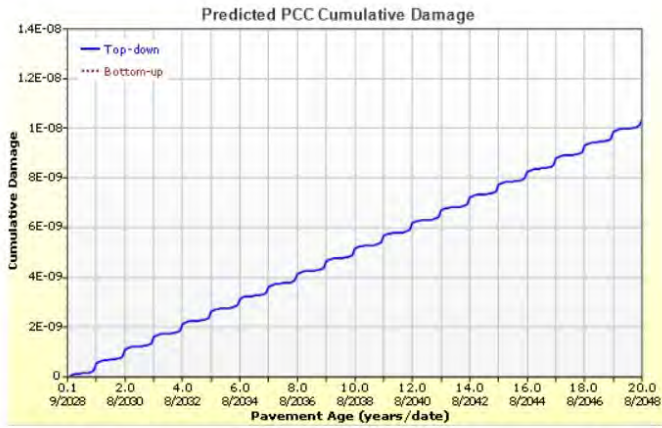
File Name: C:\Program Files (x86)\AASHTOWare\My ME Design\Projects\CERRO DE PASCO 2026 V2.dgpx





CERRO DE PASCO 2026 V2

File Name: C:\Program Files (x86)\AASHTOWare\My ME Design\Projects\CERRO DE PASCO 2026 V2.dgpx





CERRO DE PASCO 2026 V2

File Name: C:\Program Files (x86)\AASHTOWare\My ME Design\Projects\CERRO DE PASCO 2026 V2.dgpx



Layer Information

Layer 1 PCC : JPCP Default

PCC	
Thickness (in.)	5.9
Unit weight (pcf)	143.6
Poisson's ratio	0.2

Thermal	
PCC coefficient of thermal expansion (in./in.°F x 10 ⁻⁶)	5.5
PCC thermal conductivity (BTU/hr-ft-°F)	1.25
PCC heat capacity (BTU/lb-°F)	0.28

Mix		
Cement type	Type I (1)	
Cementitious material content (lb/yd ³)	657	
Water to cement ratio	0.5	
Aggregate type	Granite (3)	
PCC zero-stress temperature (°F)	Calculated Internally?	True
	User Value	-
	Calculated Value	62.8
Ultimate shrinkage (microstrain)	Calculated Internally?	True
	User Value	-
	Calculated Value	898.3
Reversible shrinkage (%)	50	
Time to develop 50% of ultimate shrinkage (days)	35	
Curing method	Curing Compound	

PCC strength and modulus (Input Level: 3)

28-Day PCC modulus of rupture (psi)	614.0
28-Day PCC elastic modulus (psi)	3570020.0

Identifiers

Field	Value
Display name/identifier	JPCP Default
Description of object	
Author	
Date Created	9/01/2026 20:33:49
Approver	
Date approved	9/01/2026 20:33:49
State	
District	
County	
Highway	
Direction of Travel	
From station (miles)	
To station (miles)	
Province	
User defined field 2	
User defined field 3	
Revision Number	0



CERRO DE PASCO 2026 V2

File Name: C:\Program Files (x86)\AASHTOWare\My ME Design\Projects\CERRO DE PASCO 2026 V2.dgpx



Layer 2 Non-stabilized Base : A-1-a

Unbound	
Layer thickness (in.)	7.9
Poisson's ratio	0.35
Coefficient of lateral earth pressure (k0)	0.5

Modulus (Input Level: 3)

Analysis Type:	Modify input values by temperature/moisture
Method:	Resilient Modulus (psi)

Resilient Modulus (psi)
40000.0

Use Correction factor for NDT modulus?	-
NDT Correction Factor:	-

Identifiers

Field	Value
Display name/identifier	A-1-a
Description of object	Default material
Author	AASHTO
Date Created	1/01/2011 00:00:00
Approver	
Date approved	1/01/2011 00:00:00
State	
District	
County	
Highway	
Direction of Travel	
From station (miles)	
To station (miles)	
Province	
User defined field 2	
User defined field 3	
Revision Number	0

Sieve

Liquid Limit	6.0
Plasticity Index	1.0
Is layer compacted?	False

	Is User Defined?	Value
Maximum dry unit weight (pcf)	False	127.2
Saturated hydraulic conductivity (ft/hr)	False	5.054e-02
Specific gravity of solids	False	2.7
Optimum gravimetric water content (%)	False	7.4

User-defined Soil Water Characteristic Curve (SWCC)

Is User Defined?	False
af	7.2555
bf	1.3328
cf	0.8242
hr	117.4000

Sieve Size	% Passing
0.001mm	
0.002mm	
0.020mm	
#200	8.7
#100	
#80	12.9
#60	
#50	
#40	20.0
#30	
#20	
#16	
#10	33.8
#8	
#4	44.7
3/8-in.	57.2
1/2-in.	63.1
3/4-in.	72.7
1-in.	78.8
1 1/2-in.	85.8
2-in.	91.6
2 1/2-in.	
3-in.	
3 1/2-in.	97.6



CERRO DE PASCO 2026 V2

File Name: C:\Program Files (x86)\AASHTOWare\My ME Design\Projects\CERRO DE PASCO 2026 V2.dgpx



Layer 3 Subgrade : A-1-a

Unbound	
Layer thickness (in.)	Semi-infinite
Poisson's ratio	0.35
Coefficient of lateral earth pressure (k0)	0.5

Modulus (Input Level: 3)

Analysis Type:	Modify input values by temperature/moisture
Method:	Resilient Modulus (psi)

Resilient Modulus (psi)
18000.0

Use Correction factor for NDT modulus?	-
NDT Correction Factor:	-

Identifiers

Field	Value
Display name/identifier	A-1-a
Description of object	Default Material
Author	AASHTO
Date Created	1/01/2011 00:00:00
Approver	
Date approved	1/01/2011 00:00:00
State	
District	
County	
Highway	
Direction of Travel	
From station (miles)	
To station (miles)	
Province	
User defined field 2	
User defined field 3	
Revision Number	0

Sieve

Liquid Limit	6.0
Plasticity Index	1.0
Is layer compacted?	False

	Is User Defined?	Value
Maximum dry unit weight (pcf)	False	127.2
Saturated hydraulic conductivity (ft/hr)	False	5.054e-02
Specific gravity of solids	False	2.7
Optimum gravimetric water content (%)	False	7.4

User-defined Soil Water Characteristic Curve (SWCC)

Is User Defined?	False
af	7.2555
bf	1.3328
cf	0.8242
hr	117.4000

Sieve Size	% Passing
0.001mm	
0.002mm	
0.020mm	
#200	8.7
#100	
#80	12.9
#60	
#50	
#40	20.0
#30	
#20	
#16	
#10	33.8
#8	
#4	44.7
3/8-in.	57.2
1/2-in.	63.1
3/4-in.	72.7
1-in.	78.8
1 1/2-in.	85.8
2-in.	91.6
2 1/2-in.	
3-in.	
3 1/2-in.	97.6



CERRO DE PASCO 2026 V2

File Name: C:\Program Files (x86)\AASHTOWare\My ME Design\Projects\CERRO DE PASCO 2026 V2.dgpx



Calibration Coefficients

PCC Faulting			
$C_{12} = C_1 + (C_2 * FR^{0.25})$ $C_{34} = C_3 + (C_4 * FR^{0.25})$ $FaultMax_0 = C_{12} * \delta_{curving} * \left[\log(1 + C_5 * 5.0^{EROD}) * \log \left(P_{200} * \frac{WetDays}{p_s} \right) \right]^{C_6}$ $FaultMax_i = FaultMax_0 + C_7 * \sum_{j=1}^m DE_j * \log(1 + C_8 * 5.0^{EROD})^{C_6}$ $\Delta Fault_i = C_{34} * (FaultMax_{i-1} - Fault_{i-1})^2 * DE_i$ $C_8 = DowelDeterioration$			
C1: 1.0184	C2: 0.91656	C3: 0.0021848	C4: 0.000883739
C5: 250	C6: 0.4	C7: 1.83312	C8: 400
PCC Reliability Faulting Standard Deviation			
Pow(0.0097*FAULT,0.5178)+0.014			

IRI-jpcp		
C1 - Cracking	C1: 0.8203	C2: 0.4417
C2 - Spalling	C3: 1.4929	C4: 25.24
C3 - Faulting	Reliability Standard Deviation	
C4 - Site Factor	5.4	

PCC Cracking				
$\log(N) = C1 * \left(\frac{MR}{\sigma} \right)^{C2}$ $CRK = \frac{100}{1 + C4 * FD^{C5}}$	Fatigue Coefficients		Cracking Coefficients	
	C1: 2	C2: 1.22	C4: 1	C5: -1.98
PCC Reliability Cracking Standard Deviation				
Pow(5.3116*CRACK,0.3903) + 2.99				

Anexo C: Resultados de PMED para Austin – Texas – USA



CLIMA TEMPLADO 2026

File Name: C:\Program Files (x86)\AASHTOWare\My ME Design\Projects\CLIMA TEMPLADO 2026.dgpx



Design Inputs

Design Life: 20 years Existing construction: - Climate Data Sources (Lat/Lon): 30.179, -97.681
 Design Type: Jointed Plain Concrete Pavement (JPCP) Pavement construction: June, 2028 Traffic opening: September, 2028

Design Structure



Layer type	Material Type	Thickness (in.)	Joint Design:	
PCC	JPCP Default	3.0	Joint spacing (ft)	8.9
NonStabilized	A-1-a	7.9	Dowel diameter (in.)	1.00
Subgrade	A-1-a	Semi-infinite	Slab width (ft)	12.0 (w)

Traffic

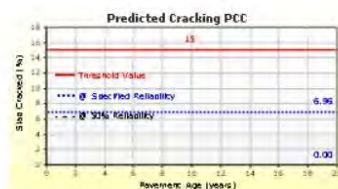
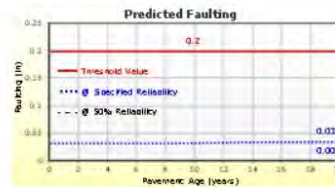
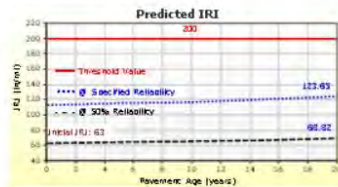
Age (year)	Heavy Trucks (cumulative)
2028 (initial)	22
2038 (10 years)	43,278
2048 (20 years)	91,484

Design Outputs

Distress Prediction Summary

Distress Type	Distress @ Specified Reliability		Reliability (%)		Criterion Satisfied?
	Target	Predicted	Target	Achieved	
Terminal IRI (in./mile)	200.00	123.65	99.00	100.00	Pass
Mean joint faulting (in.)	0.20	0.03	99.00	100.00	Pass
JPCP transverse cracking (percent slabs)	15.00	6.96	99.00	100.00	Pass

Distress Charts





CLIMA TEMPLADO 2026

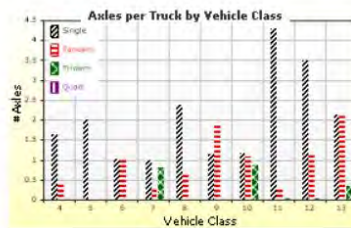
File Name: C:\Program Files (x86)\AASHTOWare\My ME Design\Projects\CLIMA TEMPLADO 2026.dgpx



Traffic Inputs

Graphical Representation of Traffic Inputs

Initial two-way AADTT:	22	Percent of trucks in design direction (%):	51.1
Number of lanes in design direction:	2	Percent of trucks in design lane (%):	100.0
		Operational speed (mph)	37.3



Traffic Volume Monthly Adjustment Factors





CLIMA TEMPLADO 2026

File Name: C:\Program Files (x86)\AASHTOWare\My ME Design\Projects\CLIMA TEMPLADO 2026.dgpx



Tabular Representation of Traffic Inputs

Volume Monthly Adjustment Factors Level 3: Default MAF

Month	Vehicle Class									
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
January	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
February	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
March	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
April	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
May	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
June	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
July	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
August	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
September	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
October	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
November	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
December	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

Distributions by Vehicle Class

Vehicle Class	AADTT Distribution (%) (Level 3)	Growth Factor	
		Rate (%)	Function
Class 4	0%	1.2%	Linear
Class 5	66.7%	1.2%	Linear
Class 6	30%	1.2%	Linear
Class 7	3.3%	1.2%	Linear
Class 8	0%	1.2%	Linear
Class 9	0%	1.2%	Linear
Class 10	0%	1.2%	Linear
Class 11	0%	1.2%	Linear
Class 12	0%	1.2%	Linear
Class 13	0%	1.2%	Linear

Truck Distribution by Hour

Hour	Distribution (%)	Hour	Distribution (%)
12 AM	2.3%	12 PM	5.9%
1 AM	2.3%	1 PM	5.9%
2 AM	2.3%	2 PM	5.9%
3 AM	2.3%	3 PM	5.9%
4 AM	2.3%	4 PM	4.6%
5 AM	2.3%	5 PM	4.6%
6 AM	5%	6 PM	4.6%
7 AM	5%	7 PM	4.6%
8 AM	5%	8 PM	3.1%
9 AM	5%	9 PM	3.1%
10 AM	5.9%	10 PM	3.1%
11 AM	5.9%	11 PM	3.1%
		Total	100%

Axle Configuration

Traffic Wander		Axle Configuration	
Mean wheel location (in.)	18	Average axle width (ft)	8.5
Traffic wander standard deviation (in.)	10	Dual tire spacing (in.)	12
Design lane width (ft)	12	Tire pressure (psi)	120

Number of Axles per Truck

Vehicle Class	Single Axle	Tandem Axle	Tridem Axle	Quad Axle
Class 4	1.62	0.39	0	0
Class 5	2	0	0	0
Class 6	1.02	0.99	0	0
Class 7	1	0.26	0.83	0
Class 8	2.38	0.67	0	0
Class 9	1.13	1.93	0	0
Class 10	1.19	1.09	0.89	0
Class 11	4.29	0.26	0.06	0
Class 12	3.52	1.14	0.06	0
Class 13	2.15	2.13	0.35	0

Average Axle Spacing		Wheelbase			
Value Type	Axle Type	Short	Medium	Long	
Tandem axle spacing (in.)	51.6				
Tridem axle spacing (in.)	49.2				
Quad axle spacing (in.)	49.2				
Average spacing of axles (ft)		12	15	18	
Percent of Trucks (%)		33	33	34	



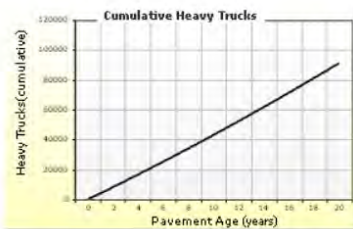
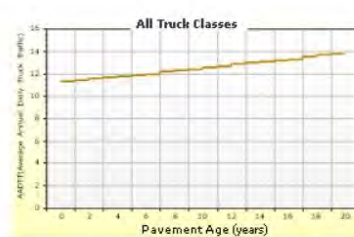
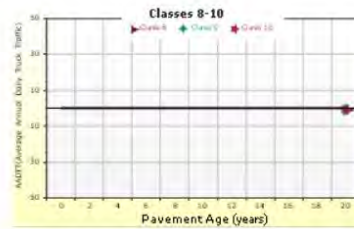
CLIMA TEMPLADO 2026

File Name: C:\Program Files (x86)\AASHTOWare\My ME Design\Projects\CLIMA TEMPLADO 2026.dgpx



AADTT (Average Annual Daily Truck Traffic) Growth

* Traffic Cap Enforced at calculated value of 77760, but not reached.





CLIMA TEMPLADO 2026

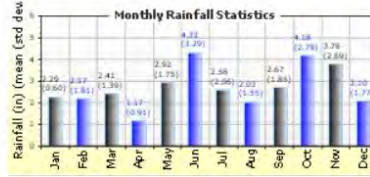


File Name: C:\Program Files (x86)\AASHTOWare\My ME Design\Projects\CLIMA TEMPLADO 2026.dgpx

Climate Inputs

Climate Data Sources:

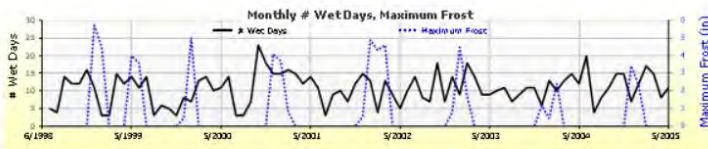
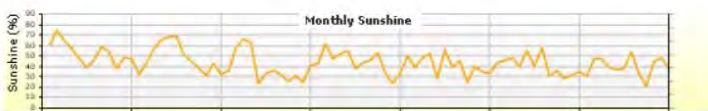
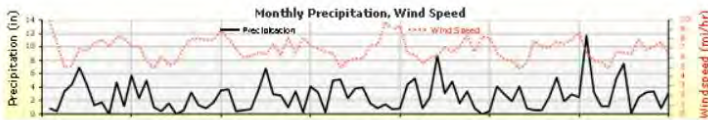
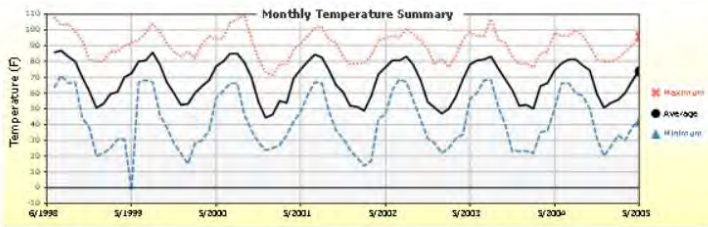
Climate Station Cities:	Location (lat lon elevation(ft))
AUSTIN/BERGSTROM,	30.17900 -97.68100 487



Annual Statistics:

Mean annual air temperature (°F)	67.75		
Mean annual precipitation (in.)	32.66		
Freezing index (°F - days)	27.25		
Average annual number of freeze/thaw cycles:	26.99	Water table depth (ft)	20.00

Monthly Climate Summary:



Report generated on: 1/02/2026 08:57

Created by: on: 9/01/2026 20:31

Approved by: on: 9/01/2026 20:31

Page 5 of 14

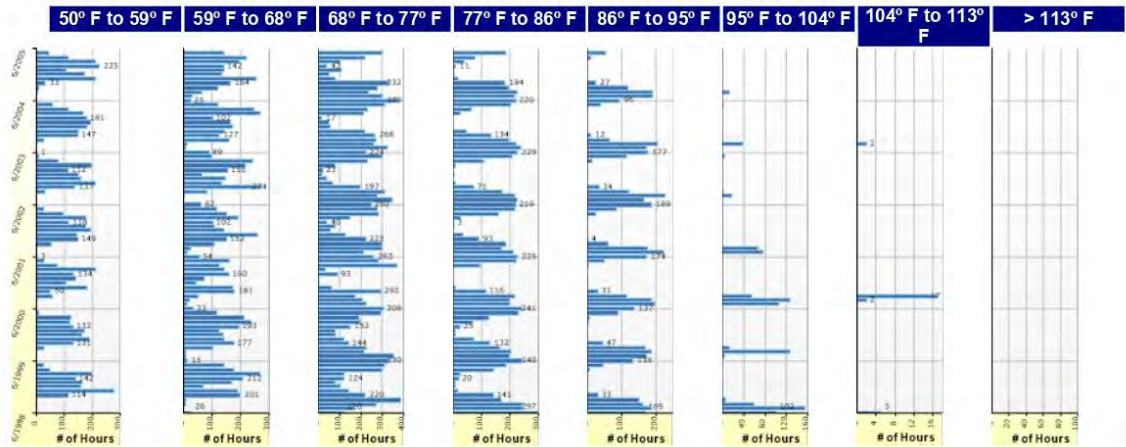
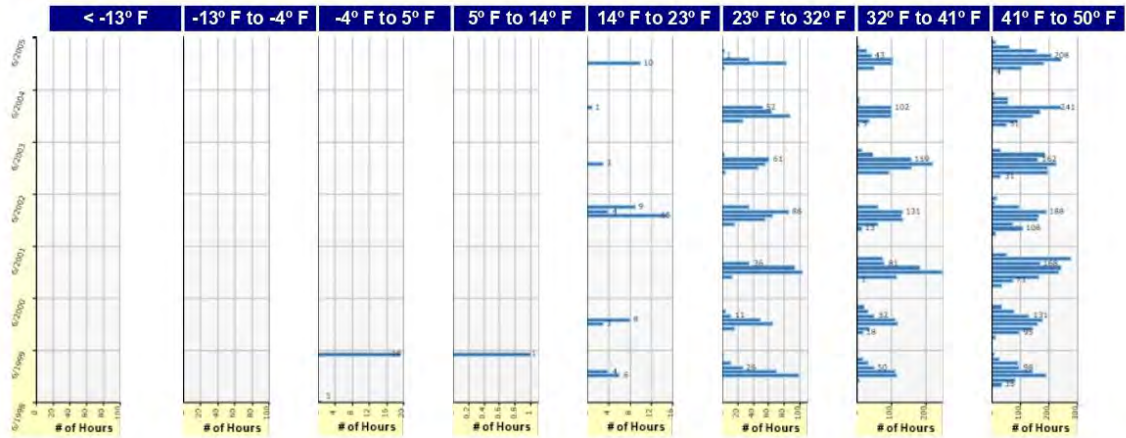


CLIMA TEMPLADO 2026

File Name: C:\Program Files (x86)\AASHTOWare\My ME Design\Projects\CLIMA TEMPLADO 2026.dgpx



Hourly Air Temperature Distribution by Month:



Report generated on: 1/02/2026 08:57

Created by: on: 9/01/2026 20:31

Approved by: on: 9/01/2026 20:31

Page 6 of 14



CLIMA TEMPLADO 2026

File Name: C:\Program Files (x86)\AASHTOWare\My ME Design\Projects\CLIMA TEMPLADO 2026.dgpx



Design Properties

JPCP Design Properties

Structure - ICM Properties	
PCC surface shortwave absorptivity	0.85

Doweled Joints	
Is joint doweled ?	True
Dowel diameter (in.)	1.00
Dowel spacing (in.)	12.00

Tied Shoulders	
Tied shoulders	False
Load transfer efficiency (%)	-

PCC joint spacing (ft)	
Is joint spacing random ?	False
Joint spacing (ft)	8.86

Widened Slab	
Is slab widened ?	True
Slab width (ft)	12.00

PCC-Base Contact Friction	
PCC-Base full friction contact	True
Months until friction loss	240.00

Sealant type	Preformed
--------------	-----------

Erodibility index	3
-------------------	---

Permanent curl/warp effective temperature difference (°F)	-10.00
---	--------

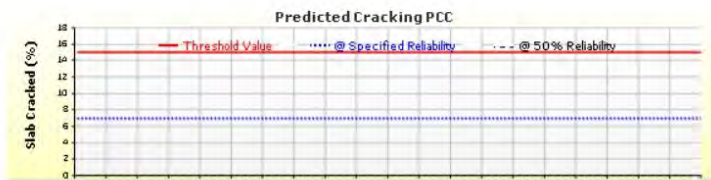
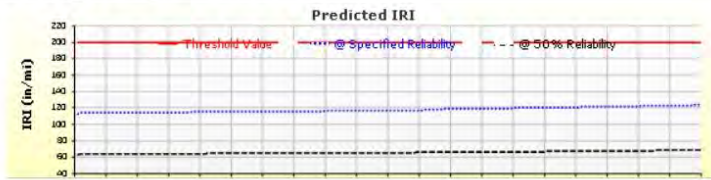


CLIMA TEMPLADO 2026

File Name: C:\Program Files (x86)\AASHTOWare\My ME Design\Projects\CLIMA TEMPLADO 2026.dgpx



Analysis Output Charts



Report generated on:
1/02/2026 08:57

Created by:
on: 9/01/2026 20:31

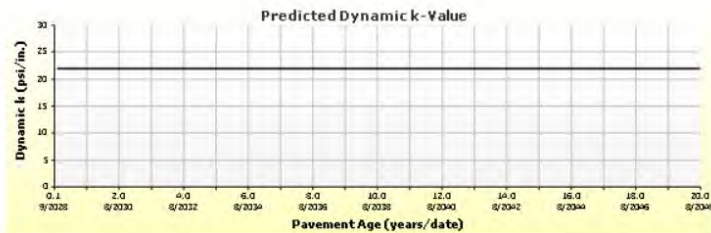
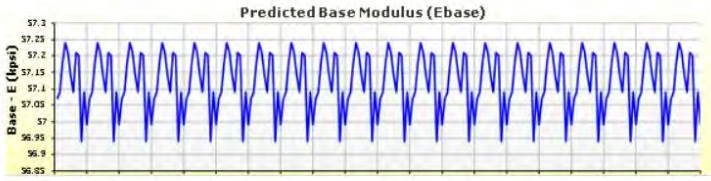
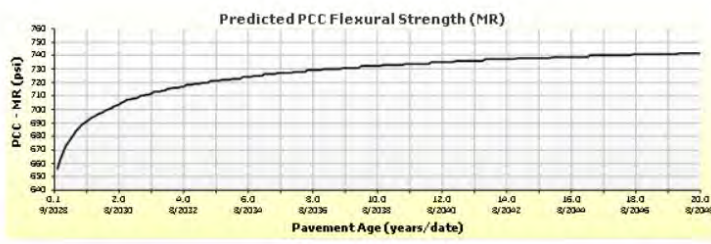
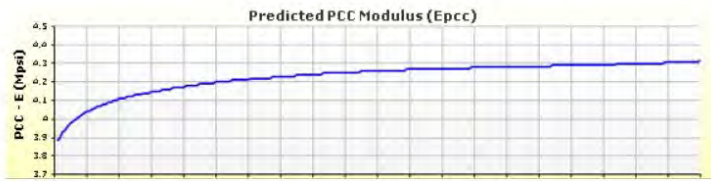
Approved by:
on: 9/01/2026 20:31

Page 8 of 14



CLIMA TEMPLADO 2026

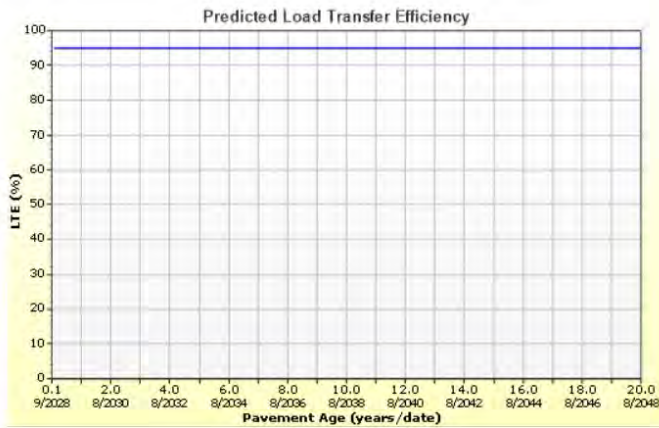
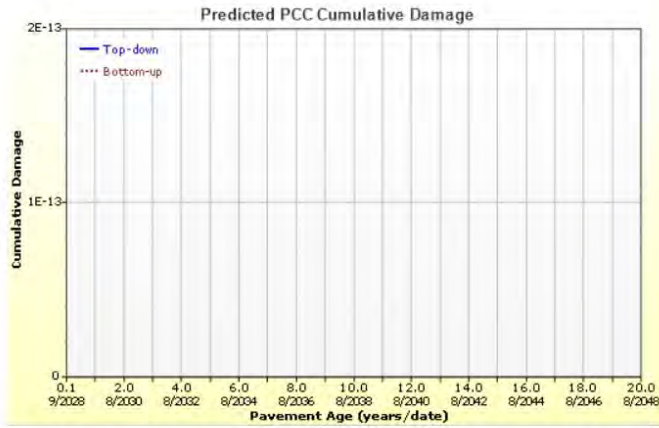
File Name: C:\Program Files (x86)\AASHTOWare\My ME Design\Projects\CLIMA TEMPLADO 2026.dgpx





CLIMA TEMPLADO 2026

File Name: C:\Program Files (x86)\AASHTOWare\My ME Design\Projects\CLIMA TEMPLADO 2026.dgpx



Report generated on:
1/02/2026 08:57

Created by:
on: 9/01/2026 20:31

Approved by:
on: 9/01/2026 20:31

Page 10 of 14



CLIMA TEMPLADO 2026

File Name: C:\Program Files (x86)\AASHTOWare\My ME Design\Projects\CLIMA TEMPLADO 2026.dgpx



Layer Information

Layer 1 PCC : JPCP Default

PCC	
Thickness (in.)	3.0
Unit weight (pcf)	143.6
Poisson's ratio	0.2

Thermal	
PCC coefficient of thermal expansion (in./in.°F x 10 ⁻⁶)	5.5
PCC thermal conductivity (BTU/hr-ft-°F)	1.25
PCC heat capacity (BTU/lb-°F)	0.28

Mix		
Cement type	Type I (1)	
Cementitious material content (lb/yd ³)	657	
Water to cement ratio	0.5	
Aggregate type	Granite (3)	
PCC zero-stress temperature (°F)	Calculated Internally?	True
	User Value	-
	Calculated Value	119.6
Ultimate shrinkage (microstrain)	Calculated Internally?	True
	User Value	-
	Calculated Value	898.3
Reversible shrinkage (%)	50	
Time to develop 50% of ultimate shrinkage (days)	35	
Curing method	Curing Compound	

PCC strength and modulus (Input Level: 3)

28-Day PCC modulus of rupture (psi)	614.0
28-Day PCC elastic modulus (psi)	3570020.0

Identifiers

Field	Value
Display name/identifier	JPCP Default
Description of object	
Author	
Date Created	9/01/2026 20:33:49
Approver	
Date approved	9/01/2026 20:33:49
State	
District	
County	
Highway	
Direction of Travel	
From station (miles)	
To station (miles)	
Province	
User defined field 2	
User defined field 3	
Revision Number	0



CLIMA TEMPLADO 2026

File Name: C:\Program Files (x86)\AASHTOWare\My ME Design\Projects\CLIMA TEMPLADO 2026.dgpx



Layer 2 Non-stabilized Base : A-1-a

Unbound	
Layer thickness (in.)	7.9
Poisson's ratio	0.35
Coefficient of lateral earth pressure (k0)	0.5

Modulus (Input Level: 3)

Analysis Type:	Modify input values by temperature/moisture
Method:	Resilient Modulus (psi)

Resilient Modulus (psi)
40000.0

Use Correction factor for NDT modulus?	-
NDT Correction Factor:	-

Identifiers

Field	Value
Display name/identifier	A-1-a
Description of object	Default material
Author	AASHTO
Date Created	1/01/2011 00:00:00
Approver	
Date approved	1/01/2011 00:00:00
State	
District	
County	
Highway	
Direction of Travel	
From station (miles)	
To station (miles)	
Province	
User defined field 2	
User defined field 3	
Revision Number	0

Sieve

Liquid Limit	6.0
Plasticity Index	1.0
Is layer compacted?	False

	Is User Defined?	Value
Maximum dry unit weight (pcf)	False	127.2
Saturated hydraulic conductivity (ft/hr)	False	5.054e-02
Specific gravity of solids	False	2.7
Optimum gravimetric water content (%)	False	7.4

User-defined Soil Water Characteristic Curve (SWCC)

Is User Defined?	False
af	7.2555
bf	1.3328
cf	0.8242
hr	117.4000

Sieve Size	% Passing
0.001mm	
0.002mm	
0.020mm	
#200	8.7
#100	
#80	12.9
#60	
#50	
#40	20.0
#30	
#20	
#16	
#10	33.8
#8	
#4	44.7
3/8-in.	57.2
1/2-in.	63.1
3/4-in.	72.7
1-in.	78.8
1 1/2-in.	85.8
2-in.	91.6
2 1/2-in.	
3-in.	
3 1/2-in.	97.6



CLIMA TEMPLADO 2026

File Name: C:\Program Files (x86)\AASHTOWare\My ME Design\Projects\CLIMA TEMPLADO 2026.dgpx



Layer 3 Subgrade : A-1-a

Unbound	
Layer thickness (in.)	Semi-infinite
Poisson's ratio	0.35
Coefficient of lateral earth pressure (k0)	0.5

Modulus (Input Level: 3)

Analysis Type:	Modify input values by temperature/moisture
Method:	Resilient Modulus (psi)

Resilient Modulus (psi)	
18000.0	

Use Correction factor for NDT modulus?	-
NDT Correction Factor:	-

Identifiers

Field	Value
Display name/identifier	A-1-a
Description of object	Default Material
Author	AASHTO
Date Created	1/01/2011 00:00:00
Approver	
Date approved	1/01/2011 00:00:00
State	
District	
County	
Highway	
Direction of Travel	
From station (miles)	
To station (miles)	
Province	
User defined field 2	
User defined field 3	
Revision Number	0

Sieve

Liquid Limit	6.0
Plasticity Index	1.0
Is layer compacted?	False

	Is User Defined?	Value
Maximum dry unit weight (pcf)	False	127.2
Saturated hydraulic conductivity (ft/hr)	False	5.054e-02
Specific gravity of solids	False	2.7
Optimum gravimetric water content (%)	False	7.4

User-defined Soil Water Characteristic Curve (SWCC)

Is User Defined?	False
af	7.2555
bf	1.3328
cf	0.8242
hr	117.4000

Sieve Size	% Passing
0.001mm	
0.002mm	
0.020mm	
#200	8.7
#100	
#80	12.9
#60	
#50	
#40	20.0
#30	
#20	
#16	
#10	33.8
#8	
#4	44.7
3/8-in.	57.2
1/2-in.	63.1
3/4-in.	72.7
1-in.	78.8
1 1/2-in.	85.8
2-in.	91.6
2 1/2-in.	
3-in.	
3 1/2-in.	97.6



CLIMA TEMPLADO 2026

File Name: C:\Program Files (x86)\AASHTOWare\My ME Design\Projects\CLIMA TEMPLADO 2026.dgpx



Calibration Coefficients

PCC Faulting			
$C_{12} = C_1 + (C_2 * FR^{0.25})$ $C_{34} = C_3 + (C_4 * FR^{0.25})$ $FaultMax_0 = C_{12} * \delta_{curving} * \left[\log(1 + C_5 * 5.0^{EROD}) * \log\left(P_{200} * \frac{WetDays}{p_s}\right) \right]^{C_6}$ $FaultMax_i = FaultMax_0 + C_7 * \sum_{j=1}^m DE_j * \log(1 + C_5 * 5.0^{EROD})^{C_6}$ $\Delta Fault_i = C_{34} * (FaultMax_{i-1} - Fault_{i-1})^2 * DE_i$ $C_8 = DowelDeterioration$			
C1: 1.0184	C2: 0.91656	C3: 0.0021848	C4: 0.000883739
C5: 250	C6: 0.4	C7: 1.83312	C8: 400
PCC Reliability Faulting Standard Deviation			
Pow(0.0097*FAULT,0.5178)+0.014			

IRI-jpcp		
C1 - Cracking	C1: 0.8203	C2: 0.4417
C2 - Spalling	C3: 1.4929	C4: 25.24
C3 - Faulting	Reliability Standard Deviation	
C4 - Site Factor	5.4	

PCC Cracking				
$\log(N) = C1 * \left(\frac{MR}{\sigma}\right)^{C2}$ $CRK = \frac{100}{1 + C4 * FD^{C5}}$	Fatigue Coefficients		Cracking Coefficients	
	C1: 2	C2: 1.22	C4: 1	C5: -1.98
PCC Reliability Cracking Standard Deviation				
Pow(5.3116*CRACK,0.3903) + 2.99				

Anexo D: Resultados de PMED para Key West – Florida – USA



CLIMA MUY CALIDO 2026

File Name: C:\Program Files (x86)\AASHTOWare\My ME Design\Projects\CLIMA MUY CALIDO 2026.dgpx



Design Inputs

Design Life: 20 years Existing construction: - Climate Data 24.553, -81.754
 Design Type: Jointed Plain Concrete Pavement (JPCP) Pavement construction: June, 2028 Sources (Lat/Lon)
 Traffic opening: September, 2028

Design Structure



Layer type	Material Type	Thickness (in.):	Joint Design:	
PCC	JPCP Default	3.0	Joint spacing (ft)	8.9
NonStabilized	A-1-a	7.9	Dowel diameter (in.)	1.00
Subgrade	A-1-a	Semi-infinite	Slab width (ft)	12.0 (w)

Traffic

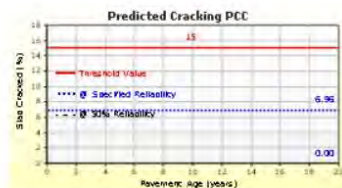
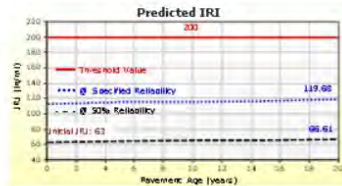
Age (year)	Heavy Trucks (cumulative)
2028 (initial)	22
2038 (10 years)	43,278
2048 (20 years)	91,484

Design Outputs

Distress Prediction Summary

Distress Type	Distress @ Specified Reliability		Reliability (%)		Criterion Satisfied?
	Target	Predicted	Target	Achieved	
Terminal IRI (in./mile)	200.00	119.68	99.00	100.00	Pass
Mean joint faulting (in.)	0.20	0.03	99.00	100.00	Pass
JPCP transverse cracking (percent slabs)	15.00	6.96	99.00	100.00	Pass

Distress Charts





CLIMA MUY CALIDO 2026

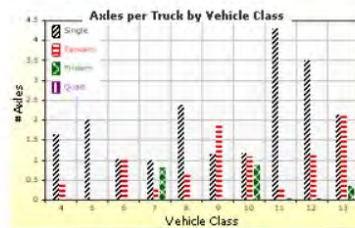
File Name: C:\Program Files (x86)\AASHTOWare\My ME Design\Projects\CLIMA MUY CALIDO 2026.dgpx



Traffic Inputs

Graphical Representation of Traffic Inputs

Initial two-way AADTT:	22	Percent of trucks in design direction (%):	51.1
Number of lanes in design direction:	2	Percent of trucks in design lane (%):	100.0
		Operational speed (mph):	60.0



Traffic Volume Monthly Adjustment Factors





CLIMA MUY CALIDO 2026

File Name: C:\Program Files (x86)\AASHTOWare\My ME Design\Projects\CLIMA MUY CALIDO 2026.dgpx



Tabular Representation of Traffic Inputs

Volume Monthly Adjustment Factors Level 3: Default MAF

Month	Vehicle Class									
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
January	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
February	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
March	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
April	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
May	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
June	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
July	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
August	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
September	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
October	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
November	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
December	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

Distributions by Vehicle Class

Vehicle Class	AADTT Distribution (%) (Level 3)	Growth Factor	
		Rate (%)	Function
Class 4	0%	1.2%	Linear
Class 5	66.7%	1.2%	Linear
Class 6	30%	1.2%	Linear
Class 7	3.3%	1.2%	Linear
Class 8	0%	1.2%	Linear
Class 9	0%	1.2%	Linear
Class 10	0%	1.2%	Linear
Class 11	0%	1.2%	Linear
Class 12	0%	1.2%	Linear
Class 13	0%	1.2%	Linear

Truck Distribution by Hour

Hour	Distribution (%)	Hour	Distribution (%)
12 AM	2.3%	12 PM	5.9%
1 AM	2.3%	1 PM	5.9%
2 AM	2.3%	2 PM	5.9%
3 AM	2.3%	3 PM	5.9%
4 AM	2.3%	4 PM	4.6%
5 AM	2.3%	5 PM	4.6%
6 AM	5%	6 PM	4.6%
7 AM	5%	7 PM	4.6%
8 AM	5%	8 PM	3.1%
9 AM	5%	9 PM	3.1%
10 AM	5.9%	10 PM	3.1%
11 AM	5.9%	11 PM	3.1%
		Total	100%

Axle Configuration

Traffic Wander		Axle Configuration	
Mean wheel location (in.)	18	Average axle width (ft)	8.5
Traffic wander standard deviation (in.)	10	Dual tire spacing (in.)	12
Design lane width (ft)	12	Tire pressure (psi)	120

Number of Axles per Truck

Vehicle Class	Single Axle	Tandem Axle	Tridem Axle	Quad Axle
Class 4	1.62	0.39	0	0
Class 5	2	0	0	0
Class 6	1.02	0.99	0	0
Class 7	1	0.26	0.83	0
Class 8	2.38	0.67	0	0
Class 9	1.13	1.93	0	0
Class 10	1.19	1.09	0.89	0
Class 11	4.29	0.26	0.06	0
Class 12	3.52	1.14	0.06	0
Class 13	2.15	2.13	0.35	0

Average Axle Spacing		Wheelbase			
Value Type	Axle Type	Short	Medium	Long	
Tandem axle spacing (in.)	51.6				
Tridem axle spacing (in.)	49.2				
Quad axle spacing (in.)	49.2				
Average spacing of axles (ft)		12	15	18	
Percent of Trucks (%)		33	33	34	



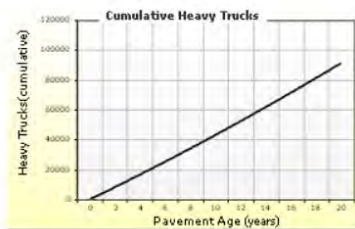
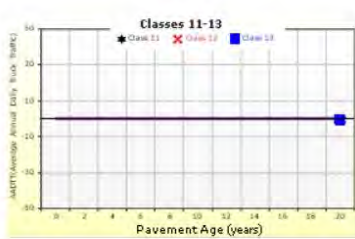
CLIMA MUY CALIDO 2026

File Name: C:\Program Files (x86)\AASHTOWare\My ME Design\Projects\CLIMA MUY CALIDO 2026.dgpx



AADTT (Average Annual Daily Truck Traffic) Growth

* Traffic Cap Enforced at calculated value of 77760, but not reached.





CLIMA MUY CALIDO 2026

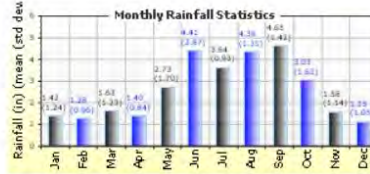
File Name: C:\Program Files (x86)\AASHTOWare\My ME Design\Projects\CLIMA MUY CALIDO 2026.dgpx



Climate Inputs

Climate Data Sources:

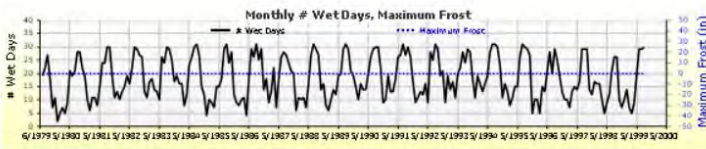
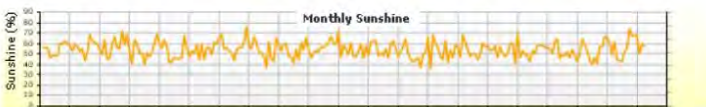
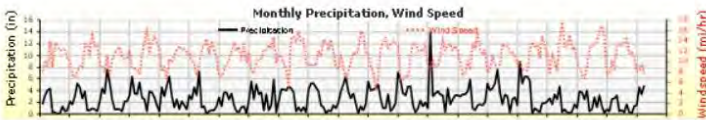
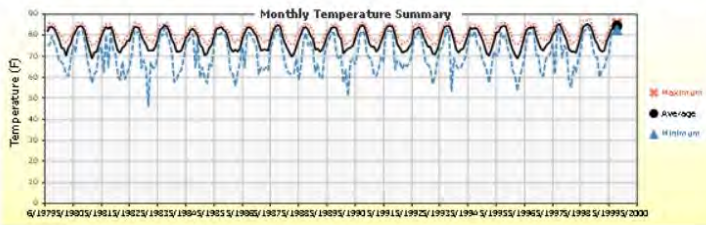
Climate Station Cities: Location (lat lon elevation(ft))
KEY WEST, FL 24.55300 -81.75400 5



Annual Statistics:

Mean annual air temperature (°F)	78.16		
Mean annual precipitation (in.)	31.56		
Freezing index (°F - days)	0.00		
Average annual number of freeze/thaw cycles:	0.00	Water table depth (ft)	2.04

Monthly Climate Summary:



Report generated on: 15/01/2026 00:51

Created by: on: 9/01/2026 20:31

Approved by: on: 9/01/2026 20:31

Page 5 of 14

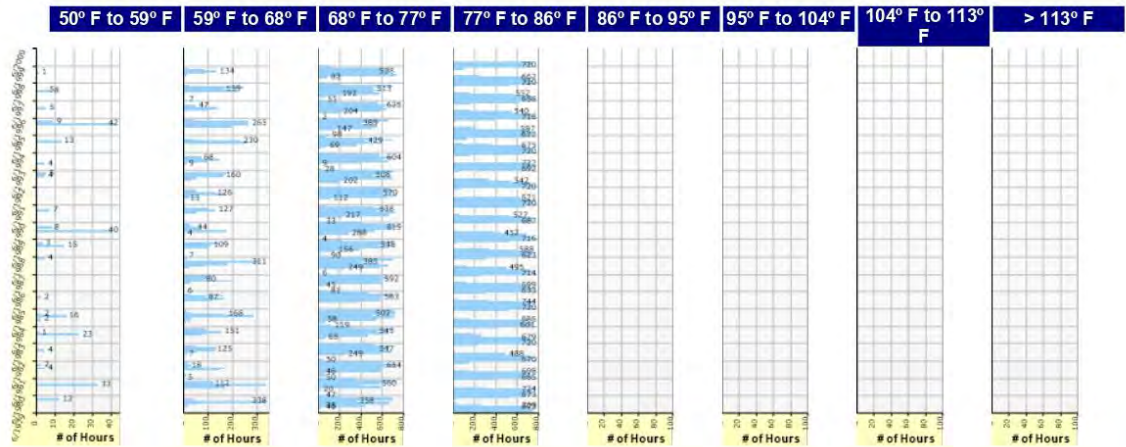
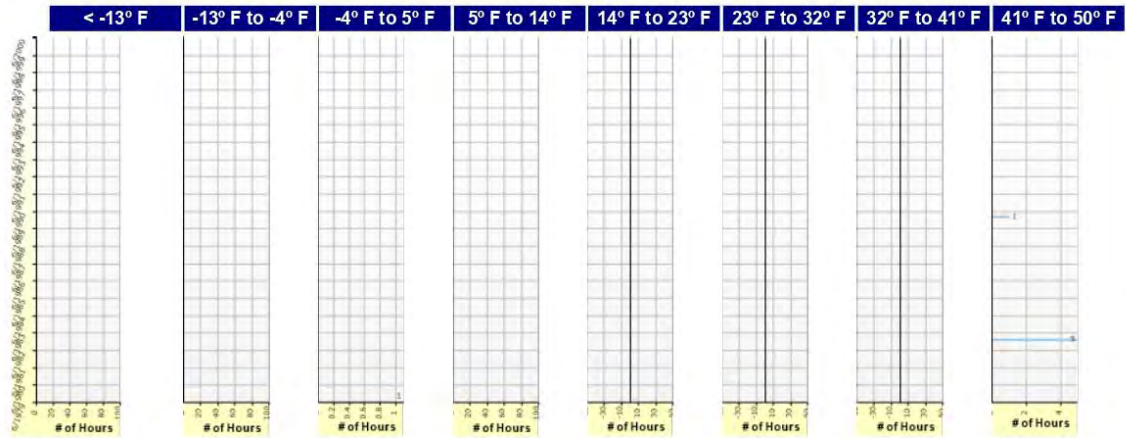


CLIMA MUY CALIDO 2026

File Name: C:\Program Files (x86)\AASHTOWare\My ME Design\Projects\CLIMA MUY CALIDO 2026.dgpx



Hourly Air Temperature Distribution by Month:



Report generated on: 15/01/2026 00:51

Created by: on: 9/01/2026 20:31

Approved by: on: 9/01/2026 20:31

Page 6 of 14



CLIMA MUY CALIDO 2026

File Name: C:\Program Files (x86)\AASHTOWare\My ME Design\Projects\CLIMA MUY CALIDO 2026.dgpx



Design Properties

JPCP Design Properties

Structure - ICM Properties	
PCC surface shortwave absorptivity	0.85

Doweled Joints	
Is joint doweled ?	True
Dowel diameter (in.)	1.00
Dowel spacing (in.)	12.00

Tied Shoulders	
Tied shoulders	False
Load transfer efficiency (%)	-

PCC joint spacing (ft)	
Is joint spacing random ?	False
Joint spacing (ft)	8.86

Widened Slab	
Is slab widened ?	True
Slab width (ft)	12.00

PCC-Base Contact Friction	
PCC-Base full friction contact	True
Months until friction loss	240.00

Sealant type	Preformed
--------------	-----------

Erodibility index	3
-------------------	---

Permanent curl/warp effective temperature difference (°F)	-10.00
---	--------

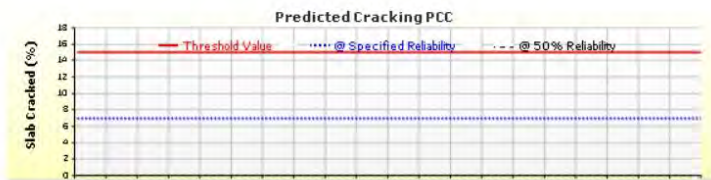
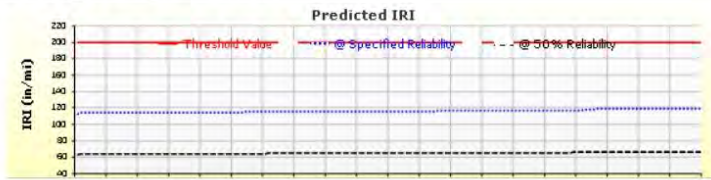


CLIMA MUY CALIDO 2026

File Name: C:\Program Files (x86)\AASHTOWare\My ME Design\Projects\CLIMA MUY CALIDO 2026.dgpx



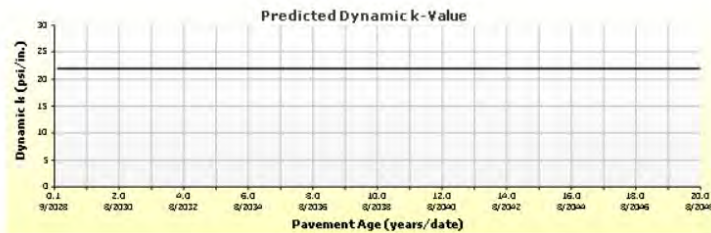
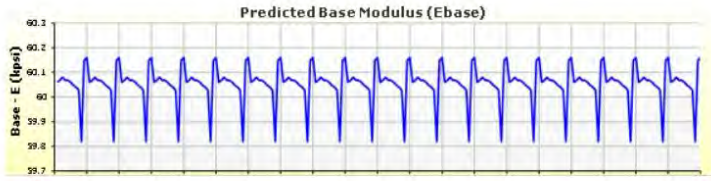
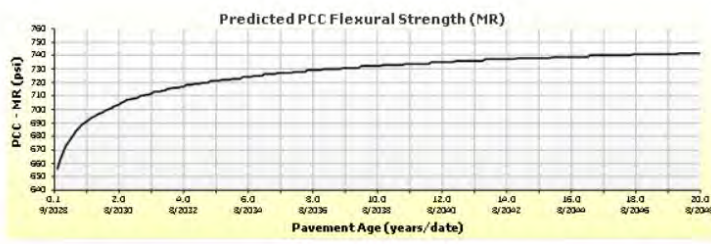
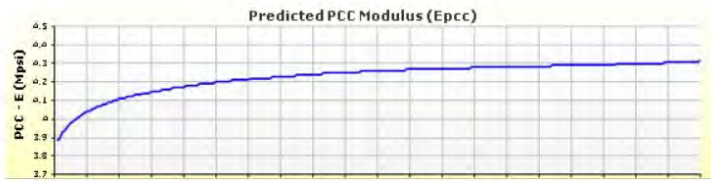
Analysis Output Charts





CLIMA MUY CALIDO 2026

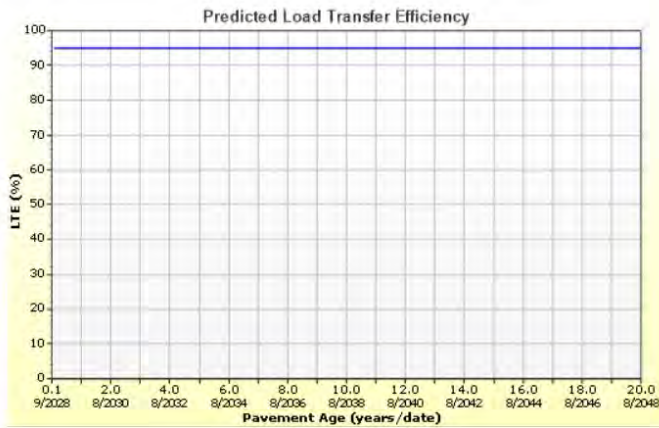
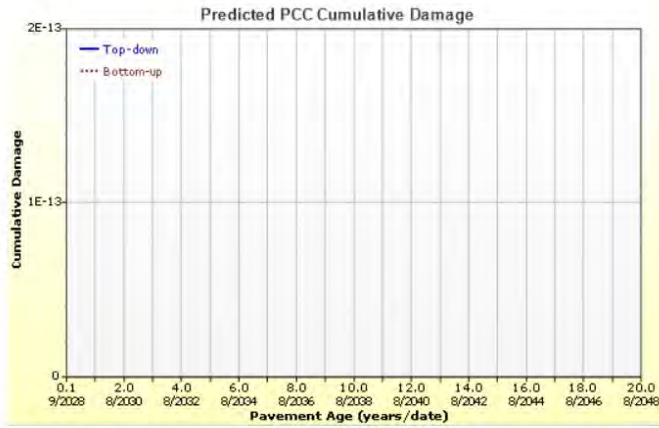
File Name: C:\Program Files (x86)\AASHTOWare\My ME Design\Projects\CLIMA MUY CALIDO 2026.dgpx





CLIMA MUY CALIDO 2026

File Name: C:\Program Files (x86)\AASHTOWare\My ME Design\Projects\CLIMA MUY CALIDO 2026.dgpx





CLIMA MUY CALIDO 2026

File Name: C:\Program Files (x86)\AASHTOWare\My ME Design\Projects\CLIMA MUY CALIDO 2026.dgpx



Layer Information

Layer 1 PCC : JPCP Default

PCC	
Thickness (in.)	3.0
Unit weight (pcf)	143.6
Poisson's ratio	0.2

Thermal	
PCC coefficient of thermal expansion (in./in.°F x 10 ⁻⁶)	5.5
PCC thermal conductivity (BTU/hr-ft-°F)	1.25
PCC heat capacity (BTU/lb-°F)	0.28

Mix		
Cement type	Type I (1)	
Cementitious material content (lb/yd ³)	657	
Water to cement ratio	0.5	
Aggregate type	Granite (3)	
PCC zero-stress temperature (°F)	Calculated Internally?	True
	User Value	-
	Calculated Value	121.2
Ultimate shrinkage (microstrain)	Calculated Internally?	True
	User Value	-
	Calculated Value	898.3
Reversible shrinkage (%)	50	
Time to develop 50% of ultimate shrinkage (days)	35	
Curing method	Curing Compound	

PCC strength and modulus (Input Level: 3)

28-Day PCC modulus of rupture (psi)	614.0
28-Day PCC elastic modulus (psi)	3570020.0

Identifiers

Field	Value
Display name/identifier	JPCP Default
Description of object	
Author	
Date Created	9/01/2026 20:33:49
Approver	
Date approved	9/01/2026 20:33:49
State	
District	
County	
Highway	
Direction of Travel	
From station (miles)	
To station (miles)	
Province	
User defined field 2	
User defined field 3	
Revision Number	0



CLIMA MUY CALIDO 2026

File Name: C:\Program Files (x86)\AASHTOWare\My ME Design\Projects\CLIMA MUY CALIDO 2026.dgpx



Layer 2 Non-stabilized Base : A-1-a

Unbound	
Layer thickness (in.)	7.9
Poisson's ratio	0.35
Coefficient of lateral earth pressure (k0)	0.5

Modulus (Input Level: 3)

Analysis Type:	Modify input values by temperature/moisture
Method:	Resilient Modulus (psi)

Resilient Modulus (psi)
40000.0

Use Correction factor for NDT modulus?	-
NDT Correction Factor:	-

Identifiers

Field	Value
Display name/identifier	A-1-a
Description of object	Default material
Author	AASHTO
Date Created	1/01/2011 00:00:00
Approver	
Date approved	1/01/2011 00:00:00
State	
District	
County	
Highway	
Direction of Travel	
From station (miles)	
To station (miles)	
Province	
User defined field 2	
User defined field 3	
Revision Number	0

Sieve

Liquid Limit	6.0
Plasticity Index	1.0
Is layer compacted?	False

	Is User Defined?	Value
Maximum dry unit weight (pcf)	False	127.2
Saturated hydraulic conductivity (ft/hr)	False	5.054e-02
Specific gravity of solids	False	2.7
Optimum gravimetric water content (%)	False	7.4

User-defined Soil Water Characteristic Curve (SWCC)

Is User Defined?	False
af	7.2555
bf	1.3328
cf	0.8242
hr	117.4000

Sieve Size	% Passing
0.001mm	
0.002mm	
0.020mm	
#200	8.7
#100	
#80	12.9
#60	
#50	
#40	20.0
#30	
#20	
#16	
#10	33.8
#8	
#4	44.7
3/8-in.	57.2
1/2-in.	63.1
3/4-in.	72.7
1-in.	78.8
1 1/2-in.	85.8
2-in.	91.6
2 1/2-in.	
3-in.	
3 1/2-in.	97.6



CLIMA MUY CALIDO 2026

File Name: C:\Program Files (x86)\AASHTOWare\My ME Design\Projects\CLIMA MUY CALIDO 2026.dgpx



Layer 3 Subgrade : A-1-a

Unbound	
Layer thickness (in.)	Semi-infinite
Poisson's ratio	0.35
Coefficient of lateral earth pressure (k0)	0.5

Modulus (Input Level: 3)

Analysis Type:	Modify input values by temperature/moisture
Method:	Resilient Modulus (psi)

Resilient Modulus (psi)	
18000.0	

Use Correction factor for NDT modulus?	-
NDT Correction Factor:	-

Identifiers

Field	Value
Display name/identifier	A-1-a
Description of object	Default Material
Author	AASHTO
Date Created	1/01/2011 00:00:00
Approver	
Date approved	1/01/2011 00:00:00
State	
District	
County	
Highway	
Direction of Travel	
From station (miles)	
To station (miles)	
Province	
User defined field 2	
User defined field 3	
Revision Number	0

Sieve

Liquid Limit	6.0
Plasticity Index	1.0
Is layer compacted?	False

	Is User Defined?	Value
Maximum dry unit weight (pcf)	False	127.2
Saturated hydraulic conductivity (ft/hr)	False	5.054e-02
Specific gravity of solids	False	2.7
Optimum gravimetric water content (%)	False	7.4

User-defined Soil Water Characteristic Curve (SWCC)

Is User Defined?	False
af	7.2555
bf	1.3328
cf	0.8242
hr	117.4000

Sieve Size	% Passing
0.001mm	
0.002mm	
0.020mm	
#200	8.7
#100	
#80	12.9
#60	
#50	
#40	20.0
#30	
#20	
#16	
#10	33.8
#8	
#4	44.7
3/8-in.	57.2
1/2-in.	63.1
3/4-in.	72.7
1-in.	78.8
1 1/2-in.	85.8
2-in.	91.6
2 1/2-in.	
3-in.	
3 1/2-in.	97.6



CLIMA MUY CALIDO 2026

File Name: C:\Program Files (x86)\AASHTOWare\My ME Design\Projects\CLIMA MUY CALIDO 2026.dgpx



Calibration Coefficients

PCC Faulting			
$C_{12} = C_1 + (C_2 * FR^{0.25})$ $C_{34} = C_3 + (C_4 * FR^{0.25})$ $FaultMax_0 = C_{12} * \delta_{curving} * \left[\log(1 + C_5 * 5.0^{EROD}) * \log \left(P_{200} * \frac{WetDays}{p_s} \right) \right]^{C_6}$ $FaultMax_i = FaultMax_0 + C_7 * \sum_{j=1}^m DE_j * \log(1 + C_8 * 5.0^{EROD})^{C_6}$ $\Delta Fault_i = C_{34} * (FaultMax_{i-1} - Fault_{i-1})^2 * DE_i$ $C_8 = DowelDeterioration$			
C1: 1.0184	C2: 0.91656	C3: 0.0021848	C4: 0.000883739
C5: 250	C6: 0.4	C7: 1.83312	C8: 400
PCC Reliability Faulting Standard Deviation			
Pow(0.0097*FAULT,0.5178)+0.014			

IRI-jpcp		
C1 - Cracking	C1: 0.8203	C2: 0.4417
C2 - Spalling	C3: 1.4929	C4: 25.24
C3 - Faulting	Reliability Standard Deviation	
C4 - Site Factor	5.4	

PCC Cracking				
$\log(N) = C1 * \left(\frac{MR}{\sigma} \right)^{C2}$ $CRK = \frac{100}{1 + C4 * FD^{C5}}$	Fatigue Coefficients		Cracking Coefficients	
	C1: 2	C2: 1.22	C4: 1	C5: -1.98
PCC Reliability Cracking Standard Deviation				
Pow(5.3116*CRACK,0.3903) + 2.99				