



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

LanammeUCR

Laboratorio Nacional de
Materiales y Modelos Estructurales

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

Informe: EIC-Lanamme-INF-1468-2024
Código VI: 321-C0-203

INFORME FINAL

DESARROLLO DE MODELOS PROBABILÍSTICOS DE FISURAMIENTO POR FATIGA PARA EL DESEMPEÑO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS

Preparado por:

Unidad de Investigación en Infraestructura del Transporte
Programa de Infraestructura del Transporte

Documento generado con base en el Art. 6, inciso b) de la Ley 8114 y lo señalado en el
Capít.7, Art. 68 Reglamento al Art. 6 de la precitada ley, publicado mediante decreto
DE-37016-MOPT.

San José, Costa Rica
Setiembre, 2024



| | | |
|---|---|---|
| 1. Informe: EIC-Lanamme-INF-1468-2024 | | 2. Copia No. 1 |
| 3. Título y subtítulo: Desarrollo de modelos probabilísticos de fisuramiento por fatiga para el desempeño de pavimentos rígidos | | 4. Fecha del Informe 20 de septiembre de 2024 |
| 5. Organización y dirección: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica. Tel: (506) 2511-2500 | | |
| 6. Notas complementarias | | |
| 7. Resumen <i>Los modelos de fisuramiento por fatiga son específicos para cada material, así como del protocolo de ensayo con el que se determinaron. Es por esto que el desempeño de los pavimentos rígidos en Costa Rica no ha sido el óptimo, ya que se utilizan modelos que no están adaptados a las condiciones y materiales presentes en el país. Esta investigación plantea el desarrollo de modelos de fisuramiento por fatiga específicos para materiales de uso típico en Costa Rica.</i> <i>En este informe se abarcan los resultados obtenidos para los cinco diseños de mezcla realizados, incluyendo la caracterización física de los materiales, validación de los diseños de mezcla, ensayos estáticos y dinámicos (fisuramiento por fatiga y módulo); además se proponen modelos de predicción de vida al fisuramiento por fatiga, tanto para las mezclas individuales como para el conjunto de datos. Los resultados obtenidos, representan un primer acercamiento para la generación de un modelo general que pueda ser incluido en la guía de diseño mecánico-empírica de Costa Rica.</i> | | |
| 8. Palabras clave Fisuramiento por fatiga, pavimentos de concreto hidráulico | 9. Nivel de seguridad: Ninguno | 10. Núm. de páginas 88 |
| 11. Elaborado: Ing. Tania Ávila Equivel, M.Sc. Unidad de Investigación en Infraestructura de Transporte | 12. Revisado por: Ing. Wendy Sequeira Rojas, M.Sc. Coordinador Unidad de Auditoría Técnica | Ing. Luis Carlos Messeguer Quesada, M.B.A. Coordinador Laboratorios de Área de Construcción |
| 13. Revisado y Aprobado por: Ing. Fabián Elizondo Arrieta, M.B.A. Coordinador Unidad de Investigación en Infraestructura de Transporte | | Ing. Ana Luisa Elizondo Salas, M.Sc. Coordinadora General PITRA |



TABLA DE CONTENIDO

| | |
|---|-----------|
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | 4 |
| ÍNDICE DE TABLAS..... | 5 |
| RESUMEN EJECUTIVO | 7 |
| 1. INTRODUCCIÓN | 8 |
| 1.1. OBJETIVO GENERAL..... | 8 |
| 1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 8 |
| 1.3. ANTECEDENTES | 9 |
| 1.4. JUSTIFICACIÓN..... | 11 |
| 1.5. MARCO TEÓRICO | 11 |
| 2. RESULTADOS | 18 |
| 2.1. CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS | 18 |
| 2.2. DISEÑOS DE MEZCLA DE CONCRETO | 26 |
| 2.3. VALIDACIÓN DE DISEÑOS DE MEZCLA..... | 32 |
| 2.4. ENSAYOS MECÁNICOS | 35 |
| 3. MODELOS DE PREDICCIÓN DE VIDA AL FISURAMIENTO POR FATIGA | 44 |
| 3.1. ANÁLISIS DE LOS DATOS..... | 44 |
| 3.2. MODELOS DE PREDICCIÓN | 48 |
| 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS | 54 |
| 4.1. DISEÑOS DE MEZCLA..... | 54 |
| 4.2. ENSAYOS MECÁNICOS | 54 |
| 4.3. MODELOS DE PREDICCIÓN DE VIDA A LA FATIGA | 55 |
| 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 57 |
| 5.1. CONCLUSIONES..... | 57 |
| 5.2. RECOMENDACIONES | 57 |
| 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 58 |
| 7. APÉNDICES | 60 |
| 7.1. APÉNDICE 1: CÁLCULO DE DISEÑO DE MEZCLA SIN ADITIVO PARA 1M ³ DE CONCRETO | 60 |
| 7.2. APÉNDICE 2: CÁLCULO DE DISEÑOS DE MEZCLA CON ADITIVO (15%) PARA 1 M ³ DE CONCRETO | 66 |
| 7.3. APÉNDICE 3: GRANULOMETRÍAS DE LOS MATERIALES | 75 |
| 7.4. APÉNDICE 4: VALIDACIÓN DE LAS MEZCLAS | 81 |
| 7.5. APÉNDICE 5: NUBE DE PUNTOS PARA EL MODELO GENERAL | 86 |



Índice de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1 Montaje del ensayo implementado | 9 |
| Figura 2 Modelo de fisuramiento por fatiga | 10 |
| Figura 3 Estructura de un pavimento | 12 |
| Figura 4 Curva granulométrica arena de río | 19 |
| Figura 5 Curva granulométrica agregado 9 mm (M-0953-2020) | 19 |
| Figura 6 Curva granulométrica agregado 16 mm (M-0954-2020) | 20 |
| Figura 7 Curva granulométrica agregado 25 mm (M-0955-2020) | 20 |
| Figura 8 Curva granulométrica agregado 38 mm (M-0956-2020) | 21 |
| Figura 9 Curva granulométrica Cuarta de Abangares (M-2000-2022) | 21 |
| Figura 10 Curva granulométrica Quinta Rey de la Tierra (M-2001-2022) | 22 |
| Figura 11 Curva granulométrica Polvo de piedra Rey de la Tierra (M-2002-2022) | 22 |
| Figura 12 Curva granulométrica Polvo de piedra San Buena (M-2003-2022) | 23 |
| Figura 13 Curva granulométrica de agregado grueso de 38 mm de Agregados Guápiles | 23 |
| Figura 14 Curva granulométrica de agregado grueso de 19 mm de Agregados Guápiles | 24 |
| Figura 15 Curva granulométrica de agregado grueso de 12,5 mm de Agregados Guápiles | 24 |
| Figura 16 Curva granulométrica de agregado fino de Agregados Guápiles | 25 |
| Figura 17 Curva granulométrica de la mezcla 3 vs especificación No.4 | 27 |
| Figura 18 Curva granulométrica de la mezcla 3 vs especificación No.467 | 28 |
| Figura 19 Curva granulométrica de la mezcla 4 | 29 |
| Figura 20 Curva granulométrica de la mezcla 5 | 30 |
| Figura 21 Datos obtenidos del ensayo de fisuramiento por fatiga para el diseño de mezcla 1 | 44 |
| Figura 22 Gráficas de caja con los datos de N obtenidos para la SR de 0,6 | 44 |
| Figura 23 Datos obtenidos del ensayo de fisuramiento por fatiga para el diseño de mezcla 2 | 45 |
| Figura 24 Datos obtenidos del ensayo de fisuramiento por fatiga para el diseño de mezcla 3 | 46 |
| Figura 25 Datos obtenidos del ensayo de fisuramiento por fatiga para el diseño de mezcla 4 | 47 |
| Figura 26 Datos obtenidos del ensayo de fisuramiento por fatiga para el diseño de mezcla 5 | 48 |
| Figura 27 Modelo de predicción lineal para el diseño de mezcla 1 (16 mm) | 49 |
| Figura 28 Modelo de predicción lineal para el diseño de mezcla 2 (38 mm) | 49 |
| Figura 29 Modelo de predicción lineal para el diseño de mezcla 3 (combinada) | 50 |
| Figura 30 Modelo de predicción lineal para el diseño de mezcla 4 (Cañas - Liberia) | 50 |
| Figura 31 Modelo de predicción lineal para el diseño de mezcla 5 (Agregados Guápiles) | 51 |
| Figura 32 Gráfica de predicción, N medido versus N predicho, para el modelo combinado de los 5 diseños de mezcla | 52 |
| Figura 33 Gráfica de predicción, N medido versus N predicho, para el modelo general .. | 53 |



Índice de tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1 Requisitos del Concreto Hidráulico para Pavimentos..... | 13 |
| Tabla 2 Especificaciones para arena de río | 14 |
| Tabla 3 Especificaciones para arena manufacturada | 15 |
| Tabla 4 Especificaciones de granulometría para los agregados gruesos..... | 16 |
| Tabla 5 Especificaciones para el agregado grueso | 16 |
| Tabla 6 Resultados del ensayo para la determinación de la densidad masiva (peso unitario) y vacíos en agregados gruesos | 25 |
| Tabla 7 Gravedad específica y absorción de los agregados..... | 26 |
| Tabla 8 Módulo de finura de la combinación de la mezcla 3..... | 27 |
| Tabla 9 Módulo de finura de la combinación de la mezcla 4..... | 28 |
| Tabla 10 Módulo de finura de la combinación de la mezcla 5..... | 29 |
| Tabla 11 Datos iniciales para establecer los tres primeros diseños de mezcla | 30 |
| Tabla 12 Tres primeros diseños de mezcla con aditivo | 31 |
| Tabla 13 Datos iniciales para el diseño de mezcla 4 | 31 |
| Tabla 14 Diseño de mezcla con agregados de Cañas - Limonal | 31 |
| Tabla 15 Datos iniciales para el diseño de mezcla 5 | 31 |
| Tabla 16 Diseños de mezcla con agregados de Cañas - Limonal..... | 32 |
| Tabla 17 Condiciones principales de las distintas mezclas..... | 33 |
| Tabla 18 Resistencia a la compresión y a la flexión para la mezcla 1..... | 33 |
| Tabla 19 Resistencia a la compresión y a la flexión para la mezcla 2..... | 33 |
| Tabla 20 Resistencia a la compresión y a la flexión para la mezcla 3..... | 34 |
| Tabla 21 Resistencia a la compresión y a la flexión para la mezcla 4..... | 34 |
| Tabla 22 Resistencia a la compresión y a la flexión para la mezcla 5..... | 34 |
| Tabla 23 Comparación de las propiedades de las mezclas con la norma CR-2020..... | 35 |
| Tabla 24 Módulo de elasticidad estático del concreto en compresión a los 28 días, diseño de mezcla 1 | 35 |
| Tabla 25 Módulo de elasticidad estático del concreto en compresión a los 28 días, diseño de mezcla 2 | 36 |
| Tabla 26 Módulo de elasticidad estático del concreto en compresión a los 28 días, diseño de mezcla 3 | 36 |
| Tabla 27 Módulo de elasticidad estático del concreto en compresión a los 28 días, diseño de mezcla 4 | 36 |
| Tabla 28 Módulo de elasticidad estático del concreto en compresión a los 28 días, diseño de mezcla 5 | 36 |
| Tabla 29 Resistencia de vigas a flexión en condición seca, falla a los 28 días | 37 |
| Tabla 30 Módulo Dinámico a los 28 días, diseño de mezcla 1..... | 37 |
| Tabla 31 Módulo Dinámico a los 28 días, diseño de mezcla 2..... | 38 |
| Tabla 32 Módulo dinámico a los 28 días, diseño de mezcla 3 | 38 |
| Tabla 33 Módulo dinámico a los 28 días, diseño de mezcla 4 | 39 |
| Tabla 34 Módulo dinámico a los 28 días, diseño de mezcla 5 | 40 |
| Tabla 35 Resultados de vida al fisuramiento por fatiga en vigas de concreto, diseño de mezcla 1 | 41 |
| Tabla 36 Resultados de vida al fisuramiento por fatiga en vigas de concreto, diseño de mezcla 2 | 41 |



| | |
|---|----|
| Tabla 37 Resultados de vida al Fisuramiento por fatiga en vigas de concreto, diseño de mezcla 3 | 42 |
| Tabla 38 Resultados de vida al Fisuramiento por fatiga en vigas de concreto, diseño de mezcla 4 | 42 |
| Tabla 39 Resultados de vida al Fisuramiento por fatiga en vigas de concreto, diseño de mezcla 5 | 43 |
| Tabla 40 Resultados del método de cuartiles para identificar outliers en datos de SR 0,60 | 45 |
| Tabla 41 Resultados del método de cuartiles para identificar outliers en datos de SR 0,73 | 45 |
| Tabla 42 Resultados del método de cuartiles para identificar outliers en datos de SR 0,75 | 46 |
| Tabla 43 Resultados del método de cuartiles para identificar outliers en datos de SR 0,68 | 47 |
| Tabla 44 Resultados del método de cuartiles para identificar outliers en datos de SR 0,39 | 48 |
| Tabla 45 Datos obtenidos para la regresión lineal del modelo combinado para los 5 diseños de mezcla | 52 |
| Tabla 46 Datos obtenidos para la regresión lineal del modelo general | 53 |
| Tabla 47 Módulo de elasticidad estático del concreto en compresión a los 28 días, para todas las mezclas | 54 |
| Tabla 48 Reducción en la resistencia a la flexión por falla seca | 54 |
| Tabla 49 Módulo dinámico a los 28 días, resultados para todas las mezclas | 55 |
| Tabla 50 Coeficientes de determinación lineal..... | 55 |



Resumen ejecutivo

Los modelos de fisuramiento por fatiga son específicos para cada material, así como del protocolo de ensayo con el que se determinaron. Es por esto que el desempeño de los pavimentos rígidos en Costa Rica no ha sido el óptimo, ya que se utilizan modelos que no están adaptados a las condiciones y materiales presentes en el país. Esta investigación plantea el desarrollo de modelos de fisuramiento por fatiga específicos para materiales de uso típico en Costa Rica.

En este informe se abarcan los resultados obtenidos para los cinco diseños de mezcla realizados, incluyendo la caracterización física de los materiales, validación de los diseños de mezcla, ensayos estáticos y dinámicos (fisuramiento por fatiga y módulo); además se proponen modelos de predicción de vida al fisuramiento por fatiga, tanto para las mezclas individuales como para el conjunto de datos. Los resultados obtenidos, representan un primer acercamiento para la generación de un modelo general que pueda ser incluido en la guía de diseño mecanístico-empírica de Costa Rica.



1. Introducción

En Costa Rica se utiliza la metodología AASHTO 93 para el diseño de todo tipo de pavimentos, misma que se desarrolló en Illinois, EEUU y utilizó métodos de regresión para analizar los resultados obtenidos en la pista de prueba AASHO Road Test (Saldaña, 2013). Sin embargo, las condiciones en que se desarrolló, no representan las características climáticas del país. Para el desarrollo de dicha guía solo se utilizó un tipo de subrasante, un método constructivo y una cantidad específica de ejes equivalentes de diseño (Perera, 2015), bajo condiciones climáticas específicas del lugar que difieren a las de Costa Rica. Por lo tanto, para el diseño se utilizan ecuaciones con factores que no están calibrados para los materiales que se utilizan nacionalmente, así como las variables climáticas, entre otros factores que afectan el funcionamiento de la estructura de pavimentos.

En las rutas nacionales primarias circulan diariamente altos volúmenes de tránsito pesado, los cuales son los más críticos para el desempeño de una estructura de pavimento (MOPT, 2017). Es por esto que se deben diseñar de una manera adecuada, con el objetivo de que se desempeñen de manera óptima, ya sean pavimentos rígidos o flexibles.

En comparación con los pavimentos asfálticos, los rígidos presentan una mayor inversión inicial, pero a largo plazo los costos por mantenimiento y reparaciones son menores. Además, implican un ahorro en la iluminación de la carretera dado su color claro, y la disminución en el consumo de combustible en los vehículos gracias a la rugosidad superficial del material (Coto, 2016).

Sin embargo, la cantidad de carreteras del país construidas en pavimento rígido no son muchas, destacan Ruta 1 en el tramo Cañas – Liberia, Ruta 204 Zapote – San Francisco, Ruta 167 Universal – La Salle, Ruta 211 San Francisco – La Colina, Ruta 18, Ruta 2 RECOPE – Taras, aunque fue reemplazada por una carpeta asfáltica recientemente y Avenida 3 en San José. Adicionalmente, se encuentra en construcción el tramo de Limonal - Cañas en Ruta 1, el cual corresponde a un pavimento rígido también.

1.1. Objetivo General

Desarrollar modelos probabilísticos de desempeño de fisuramiento por fatiga, para el análisis de pavimentos rígidos con distintos agregados y concretos de uso común en pavimentos rígidos de Costa Rica.

1.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar el agregado grueso, agregado fino y cemento mediante ensayos de laboratorio, para su aplicación en diseños de mezclas de concreto de uso común en pavimentos.
- Realizar ensayos de carga estática, para obtener las propiedades mecánicas de las mezclas de concreto diseñadas y validar los diseños de mezcla a utilizar.
- Realizar el ensayo de fatiga y módulo dinámico, para obtener el comportamiento a fatiga en pavimentos rígidos
- Calibrar y generar modelos de fatiga, para evaluar el desempeño de pavimentos rígidos con las mezclas de concreto utilizadas.

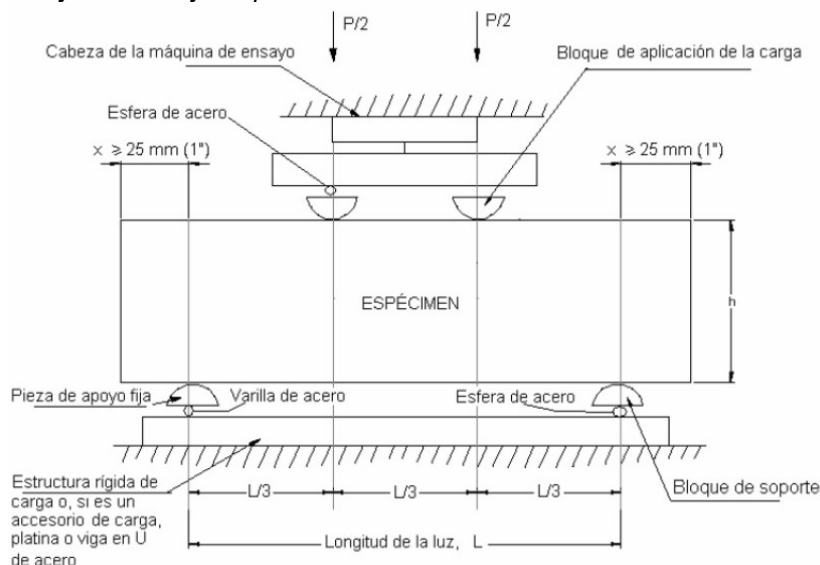
1.3. Antecedentes

En cuanto al desarrollo de los modelos probabilísticos en fisuramiento por fatiga se encuentran los siguientes estudios:

- En Costa Rica, Miranda (2016) desarrolló un trabajo final de graduación titulado “Modelos de desempeño en pavimentos rígidos” en el cual trabajó con tres mezclas de concreto: la primera con agregados de Guápiles y cemento de Holcim tipo MP/AR de uso industrial, la segunda con agregado de Puente de Piedra con cemento tipo MP/AR de uso general de Cemex, y la tercera se trabajó con agregados de la planta La Pacífica, cemento Cemex de alto rendimiento. Adicionalmente se utilizaron aditivos proporcionados por la empresa Sika, con el objetivo de asemejar el concreto utilizado en el proyecto Cañas-Liberia. Para cada mezcla se obtuvieron modelos de fisuramiento por fatiga. Por último, se validaron los modelos mediante un análisis mecanicista con el software ISLAB2000 y ApRIGID 1.0.
- Monge (2013) implementó por primera vez un ensayo de fisuramiento por fatiga en pavimentos rígidos en Costa Rica. Comparó el comportamiento ante la fisuramiento por fatiga de mezclas de concreto convencional sin modificar, contra concreto modificado con fibras de polipropileno: resultando que el último posee una mejor respuesta, ya que aporta una mejor ductilidad, aunque no aporta a la ganancia de resistencia a la compresión. Lo anterior se logró adaptando el protocolo de ensayo implementado por Austroads (2012), cuyo montaje se ve ilustrado en la Figura 1.

Figura 1

Montaje del ensayo implementado



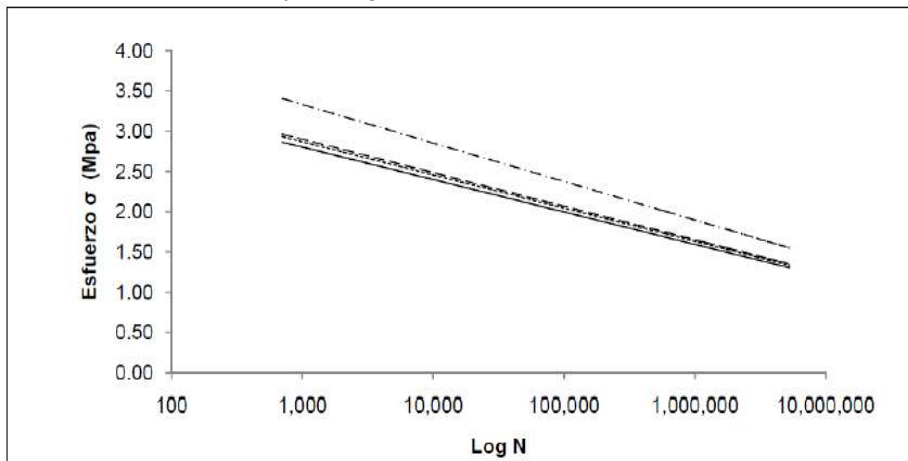
Nota. Tomado de *Resistencia a la flexión del concreto. Método de la viga simple cargada en los tercios de la luz* (p.3), por el Instituto Nacional de Vías, 2007.



- En Colombia, Boada y Pérez (2013) evaluaron el comportamiento a la fisuramiento por fatiga de una mezcla de concreto con módulo de ruptura de 3,5 MPa con adición de fibras plásticas. Se calibraron modelos empíricos de fisuramiento por fatiga para el análisis y diseño de pavimentos rígidos (Figura 2). Y se concluyó que la adición de fibras reduce en gran cantidad el espesor de la capa, sobre todo con tráficos bajos. Además, se resalta que las nuevas tecnologías de pavimentos deben estar orientadas a lograr infraestructura que responda eficientemente a la construcción sostenible.
- Austroads (Australian and New Zealand Road Transportation and Traffic Authorities) (2012) publicó un protocolo de ensayo para ejecutar pruebas de módulo y de fisuramiento por fatiga en elementos cementados, el cual fue utilizado por Monge (2013) y Miranda (2016) para realizar pruebas de fisuramiento por fatiga en concreto. El mismo consiste de aplicación de cargas en los tercios medios de vigas hechas del material en cuestión. Con los resultados de este ensayo se logra obtener un modelo que relaciona el nivel de esfuerzo con la cantidad de ciclos necesarios para la falla.

Figura 2

Modelo de fisuramiento por fatiga



Nota. Adaptada de “Comportamiento a la fatiga de una mezcla de concreto MR-3.5MPa para pavimento con adición de fibras plásticas” (p. 54), por M.A. Boada et al, 2011, *Pontificia Universidad Javeriana*.

- En España, Zanuye et al. (2011) presentaron un modelo de deterioro de fisuramiento por fatiga en concreto, que incluye el cambio en las propiedades del material a través del tiempo, por lo que se puede obtener la vida de fisuramiento por fatiga, así como la evolución de los esfuerzos y deformaciones. Este modelo se compara con otros ya existentes, con el objetivo de realizar algún tipo de modificación en los últimos y así poder estimar de una forma práctica el número de ciclos resistentes.
- Debido a la escasez de modelos desarrollados sobre fisuramiento por fatiga es que Rao y Roesler (2005) han recopilado los modelos que se desarrollan en la actualidad en el diseño de pavimentos. El estudio incluye información importante sobre cómo se ha definido la falla, así como el punto de la losa donde se calculan los esfuerzos con los que se han generado dichos modelos.



1.4. Justificación

Para el 2019 un 25% de las carreteras de la Red Vial Nacional de Costa Rica, se encuentran en buen estado. Lo anterior basado en parámetros de desempeño, tal como el Índice de Regularidad Internacional (IRI), deflectometría, el agarre superficial (GRIP) y otros. Estos determinan propiedades de la estructura, relacionadas con el confort del usuario y la respuesta estructural del pavimento (LanammeUCR, 2019).

En una economía emergente, se debe tener un sistema de carreteras que se adecúe a las necesidades de la población que cumpla de forma óptima sus funciones. Además, el desarrollo de infraestructura es un agente de reactivación económica, por lo que se debe desarrollar de forma organizada (CEPAL, 2001).

De acuerdo con el LanammeUCR (2019) para lograr tener un adecuado sistema de gestión vial se debe especializar en tres aspectos: sólido fundamento técnico, programación a largo plazo y alto nivel de servicio. Ya que al desarrollar estos puntos se garantiza una adecuada durabilidad de las estructuras, así como la optimización de los recursos e inversiones.

Estos aspectos se deben alcanzar desde distintas áreas: social, económica, financiera, técnica-ingenieril, ambiental, entre otras. Para el fundamento técnico, la ingeniería juega un papel protagónico, especialmente en el diseño de las estructuras que conforman las vías de comunicación, dicese de puentes, estructuras de pavimentos, diseño geométrico y funcional, sistemas de drenaje, estabilización geotécnica, seguridad vial y todo otro componente que mejore la funcionalidad de una carretera (LanammeUCR, 2019).

En el caso de los diseños de las estructuras de pavimentos, se tiene una amplia fundamentación técnico- científica, la cual fue desarrollada por AASHTO desde inicios de la década de 1950, y se ha utilizado en el país desde entonces, aunque se han desarrollado otras guías recientemente. Sin embargo, esta guía es meramente empírica, por lo que se basa en resultados experimentales, los cuales no están adaptados a las condiciones presentes en Costa Rica.

Los pavimentos rígidos en Costa Rica no han presentado el mejor desempeño que se puede esperar de ellos. Por ejemplo, en la Ruta Nacional 18 se han encontrado agrietamientos severos en algunas de las losas, las cuales se trataron con sellos, pero aun así las mismas siguieron expandiéndose, lo cual afecta directamente la función estructural del pavimento (Navas 2012 citado por Miranda 2016). Este fenómeno se da por la falta de parámetros adaptados al clima, tránsito, materiales y demás factores del país.

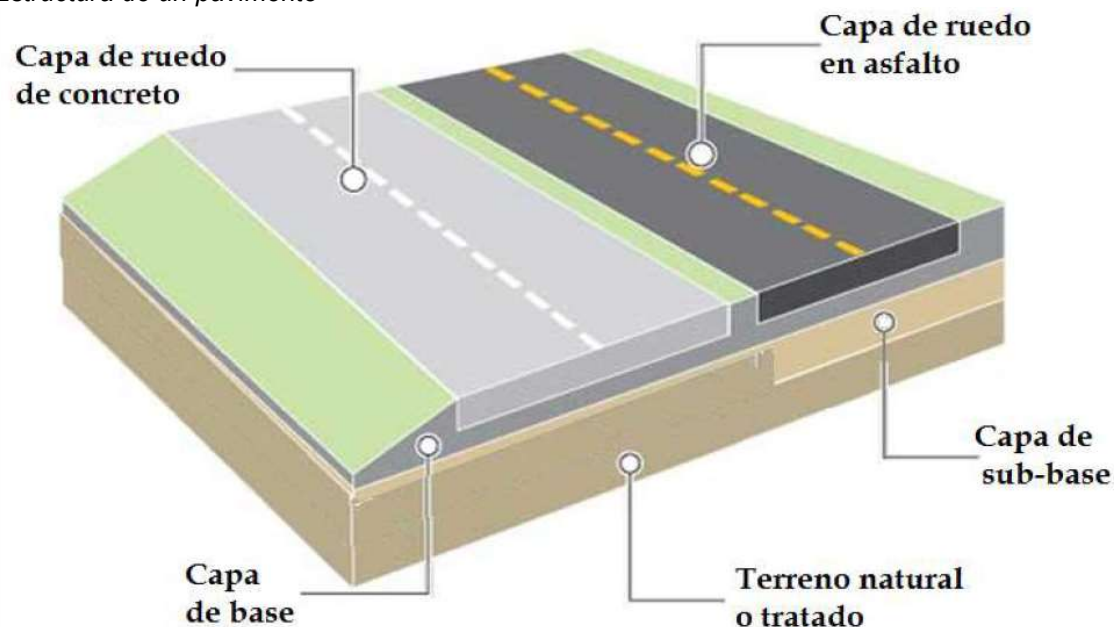
1.5. Marco Teórico

Una estructura de pavimento está constituida por distintos materiales que se superponen a una superficie nivelada para aumentar su resistencia, y que no permita deformaciones que disturben la circulación del tránsito (Moya, 2019).

Los pavimentos permiten el movimiento de vehículos considerablemente pesados, que de no existir la estructura que los soporte provocarían un deterioro considerable. Este a su vez afectaría el tránsito, inclusive podría llegar al nivel del peatón, ya que los materiales sobre los que se coloca el pavimento suelen ser suelos con baja capacidad de soporte.

La estructura de un pavimento está compuesta por cuatro partes, como se muestra la Figura 3: el terreno natural o subrasante, que es el material ya existente en la vía, la subbase y base, que son materiales granulares (algunas veces estabilizados) encargados de mejorar la resistencia de una forma más económica y transmitir las cargas a la subrasante, y por último la superficie de ruedo que es la capa que más resistencia aporta.

Figura 3
Estructura de un pavimento



Nota. Tomado de *Generalidades sobre pavimentos de concreto*, por M. Moya, 2019, Instituto Costarricense del Concreto y Cemento.

Según Huang (2004) en los pavimentos rígidos la capa superficial es el concreto, y puede no llevar subbase. Dada su rigidez propicia una mejor distribución de las cargas hacia la subrasante, aunque su construcción inicial suele ser más cara.

1.5.1. Especificaciones para pavimentos de concreto hidráulico (CR-2020)

Según el Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes, CR-2020, una mezcla de concreto hidráulico que será utilizada como estructura de un pavimento de volumen de tránsito intermedio a alto (TPDA > 5.000) debe cumplir con una serie de especificaciones referentes a materiales, dosificación y resistencia.

El concreto hidráulico estará conformado por una mezcla homogénea de cemento hidráulico, agua, agregados finos y gruesos, y aditivos si fueran necesarios. Los diseños de mezcla deben cumplir con los requisitos indicados en la Tabla 1.



Tabla 1

Requisitos del Concreto Hidráulico para Pavimentos

| Relación Agua/Materiales cementicios | Temperatura del Concreto | Asentamiento (revenimiento) AASHTOT 119 | Resistencia a la compresión, 28 días AASHTO T 22 | Resistencia a la flexión 28 días AASHTO T 97 |
|--|------------------------------|---|---|--|
| Máxima 0,45 | Mínima:13 °C Máxima:35 °C | Máximo ⁽¹⁾ : 100mm | Mínima 35 MPa | Mínima 4,5 MPa |

Nota. En el lugar de la descarga las tolerancias son de +0 mm, -65 mm, según lo establecido por la norma ASTM C94. ⁽¹⁾ Cuando se trabaja con concretos con aditivos Tipo I y II según ASTM C1017 o Tipo F y G según ASTM C494, el asentamiento puede aumentar a un valor máximo de 200 mm en el lugar de la descarga aplicando las mismas tolerancias. Adaptado de *Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes* por el Ministerio de Obras Públicas y Transportes (p.662), 2020.

Antes de producir el concreto hidráulico, se debe someter las proporciones propuestas de concreto, para aprobación, y como mínimo debe incluir:

- Tipo y ubicación de la fuente de todos los materiales propuestos a ser usados.
- Certificación de calidad, de todos los materiales propuestos.
- Masa saturada superficie seca, de todos los agregados finos y gruesos, por metro cúbico de concreto.
- Graduación de los materiales, gruesos y finos.
 - Los agregados finos deberán cumplir con las especificaciones indicadas en la Tabla 2 si es arena de río o en la Tabla 3 si es arena manufacturada.



Tabla 2

Especificaciones para arena de río

| | | |
|---|---|-----------|
| Agregados finos para concreto hidráulico (ASTM C33) | 1. Graduación (INTE C46 / INTE C49) | |
| | Malla | % pasando |
| | 9,5 mm | 100 |
| | 4,75 mm (No.4) | 95-100 |
| | 2,36 mm (No.8) | 80-100 |
| | 1,18 mm (No.16) | 50-85 |
| | 600 µm (No.30) | 25-60 |
| | 300 µm (No.50) | 5-30 |
| | 150 µm (No.100) | 0-10 |
| Agregados finos para concreto hidráulico (INTE C15) | 75 µm (No.200) | 0-3 |
| | 2. Módulo de finura (MF) entre 2,3 y 3,1 | |
| | 3. Material pasando malla de 75 µm puede ser aumentado a un 5 % máximo en concreto hidráulico no sujeto a la abrasión. | |
| | 4. Sanidad - Durabilidad en 5 ciclos con SO_4Na^2 (INTE C61), máximo 10 % de pérdida | |
| | 5. Equivalente de arena (AASHTO T 176) 70 % mínimo | |
| | 6. Impurezas orgánicas (INTE C59), más claro que el color patrón | |
| | 7. Si no cumple impurezas orgánicas debe revisarse la resistencia relativa a los 7 días (INTE C60) no sea menor al 95 % | |
| | 8. Terrones de arcilla y partículas deleznales (INTE C65), 3 % máximo | |
| | 9. Absorción de azul de metileno (ASTM C-1777) máximo 10 g•col /kg | |
| | 10. Carbón y lignito (INTE C63) 1 % máximo | |

Nota. No se deben utilizar agregados finos alternativos naturales (de origen volcánico) para elementos de concreto hidráulico, estructurales o no, expuestos a ambientes agresivos, así como elementos sujetos a abrasión mecánica (pisos industriales y pavimentos) o cualquier elemento de concreto hidráulico sometido a exposición agresiva. Adaptado de *Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes* por el Ministerio de Obras Públicas y Transportes (p.1244), 2020.



Tabla 3

Especificaciones para arena manufacturada

| | | | |
|---|-------------|--|--|
| Agregados finos para concreto hidráulico | ASTM C33 | 1. Graduación (INTE C46 / INTE C49) | |
| | | Malla | %pasando |
| | | 9,5 mm | 100 |
| | | 4,75 mm (No.4) | 95-100 |
| | | 2,36 mm (No.8) | 80-100 |
| | | 1,18 mm (No.16) | 50-85 |
| | | 600 µm (No.30) | 25-60 |
| | | 300 µm (No.50) | 5-30 |
| | | 150 µm (No.100) | 0-10 |
| | | 75 µm (No.200) | 0-3 |
| | | 2. Módulo de finura (MF) entre 2,3 y 3,1 | |
| | | 3. Si el material más fino de 75 µm (N° 200 se compone de polvo y piedra, esencialmente libre de arcilla o lutita, el límite será: 5 % máximo para concreto sujeto a la abrasión, y 7 % máximo para el concreto no sujeto a abrasión | |
| INTE C15 | | 4. Sanidad - Durabilidad en 5 ciclos con SO ₄ Na ² (INTE C61), % de pérdida 10% máximo | |
| | | 5. Equivalente de arena (AASHTO T 176), 60 % mínimo | |
| | | 6. Impurezas orgánicas (INTE C59), más claro que el color patrón | |
| | | 7. Si no cumple impurezas orgánicas debe revisarse la resistencia relativa a los 7 días (INTE C60) no sea menor al 95 % | |
| | | 8. Terrones de arcilla y partículas deleznable (INTE C65), 3 % máximo | |
| | | 9. Índice de plasticidad No Plástico | |
| | | 10. Carbón y lignito (INTE 06-02-26) 1 % máximo | |
| | | ASTM C1777 | 11. Absorción de azul de metileno máximo 5 mg/g |
| | | ASTM D422 | 12. Fracción fina menor a 2 µm especificación 6 % máximo |

Nota. Adaptado de *Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes* por el Ministerio de Obras Públicas y Transportes (p.1245), 2020.

- El agregado grueso debe cumplir con los requisitos de graduación INTE C15 de la Tabla 4 y las especificaciones de la Tabla 5.



Tabla 4

Especificaciones de granulometría para los agregados gruesos

| Número del tamaño | Tamaño nominal del agregado (mm) | Material que pasa cada uno de los siguientes tamices (porcentaje en masa) | | | | | | | | | | | | |
|-------------------|----------------------------------|---|--------|-------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|--------|---------|---------|---------|
| | | 100 mm | 90 mm | 75 mm | 63 mm | 50 mm | 37,5 mm | 25,0 mm | 19,0 mm | 12,5 mm | 9,5 mm | 4,75 mm | 2,36 mm | 1,18 mm |
| 1 | 90 | 100 | 90-100 | - | 25-60 | - | 0-15 | - | 0-5 | - | - | - | - | - |
| 2 | 63 | - | - | 100 | 90-100 | 35-70 | 0-15 | - | 0-5 | - | - | - | - | - |
| 3 | 50 | - | - | - | 100 | 90-100 | 35-70 | 0-15 | - | 0-5 | - | - | - | - |
| 357 | 50 | - | - | - | 100 | 95-100 | - | 35-70 | - | 10-30 | - | 0-5 | - | - |
| 4 | 37,5 | - | - | - | - | 100 | 90-100 | 20-55 | 0-15 | - | 0-5 | - | - | - |
| 467 | 37,5 | - | - | - | - | 100 | 95-100 | - | 35-70 | - | 10-30 | 0-5 | - | - |
| 5 | 25,0 | - | - | - | - | - | 100 | 90-100 | 20-55 | 0-10 | 0-5 | - | - | - |
| 56 | 25,0 | - | - | - | - | - | 100 | 90-100 | 40-85 | 10-40 | 0-15 | 0-5 | - | - |
| 57 | 25,0 | - | - | - | - | - | 100 | 95-100 | - | 25-60 | - | 0-10 | 0-5 | - |
| 6 | 19,0 | - | - | - | - | - | - | 100 | 90-100 | 20-55 | 0-15 | 0-5 | - | - |
| 67 | 19,0 | - | - | - | - | - | - | 100 | 90-100 | - | 20-55 | 0-10 | 0-5 | - |
| 7 | 12,5 | - | - | - | - | - | - | - | 100 | 90-100 | 40-70 | 0-15 | 0-5 | - |
| 8 | 9,5 | - | - | - | - | - | - | - | - | 100 | 85-100 | 10-30 | 0-10 | 0-5 |
| 89 | 9,5 | - | - | - | - | - | - | - | - | 100 | 90-100 | 20-55 | 5-30 | 0-10 |

Nota. Adaptado de *Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes* por el Ministerio de Obras Públicas y Transportes (p. 1246), 2020.

Tabla 5

Especificaciones para el agregado grueso

| | |
|---|--|
| Agregados gruesos para concreto hidráulico (INTE C15) | 1. Abrasión en prueba de los ángeles (INTE C64), 50 % máximo |
| | 2. Sanidad - Durabilidad en 5 ciclos con SO_4Na^2 (INTE C61), pérdida 12 % máximo |
| | 3. Terrones de arcilla y partículas deleznales (INTE C65) concreto hidráulico arquitectónico y losas de puentes y pavimentos 3 %. Otros concreto hidráulicos 10 % máximo |
| | 4. Material pasando malla de 75 μm 1 % máximo. Agregado que no tiene arcilla o esquistos se pueda aumentar a 1,5 % |
| | 5. Requisitos con densidad relativa en condición saturada superficie seca < 2,4, aceptar 5 máximo |

Nota. Adaptado de *Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes* por el Ministerio de Obras Públicas y Transportes (p. 1247), 2020.



- Masa del agua de la mezcla, por metro cúbico de mezcla.
- Masa de cemento, por metro cúbico de concreto. Indicar si contiene puzolanas, cenizas, escorias de altos hornos y humo de sílice.
- Contenido de aire en la mezcla de concreto, en porcentaje por volumen.
- Asentamiento (revenimiento) máximo del concreto plástico, en milímetros.



2. Resultados

2.1. Caracterización de agregados

Para las primeras tres mezclas, se tiene un agregado fino correspondiente a una arena de río de Guápiles. La caracterización de este material fue elaborada por Solís (2021) en su trabajo de graduación “Evaluación de las propiedades de concretos de mediana resistencia producidos con insumos disponibles en Costa Rica”. La caracterización de los agregados gruesos se obtiene del informe de ensayo I-0758-2020 realizado por el laboratorio de concretos del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR).

Para el cuarto diseño de mezcla, se utilizan los agregados provenientes del proyecto Cañas-Limonar. Estos corresponden a dos agregados finos y dos agregados gruesos, los cuales fueron caracterizados por el LanammeUCR a pesar de tener disponible la caracterización realizada por la empresa encargada del proyecto. Los resultados se pueden obtener del informe de ensayo EIC-Lanamme-INF-0294-2023.

Para el quinto diseño de mezcla, se utilizan agregados provenientes de Agregados Guápiles. Estos corresponden a un agregado fino y tres agregados gruesos, los cuales fueron caracterizados por el LanammeUCR. Los resultados se pueden obtener de los informes de ensayo EIC-Lanamme-INF-1278-2023 y EIC-Lanamme-INF-1523-2023.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para los siguientes ensayos:

- Granulometría (ASTM C136)
- Densidad aparente e índice de vacíos (ASTM C29)
- Gravedad específica y absorción (ASTM C127 y ASTM C128)

Lo anterior se realiza tanto para los agregados finos como para los agregados gruesos.

2.1.1. Granulometría

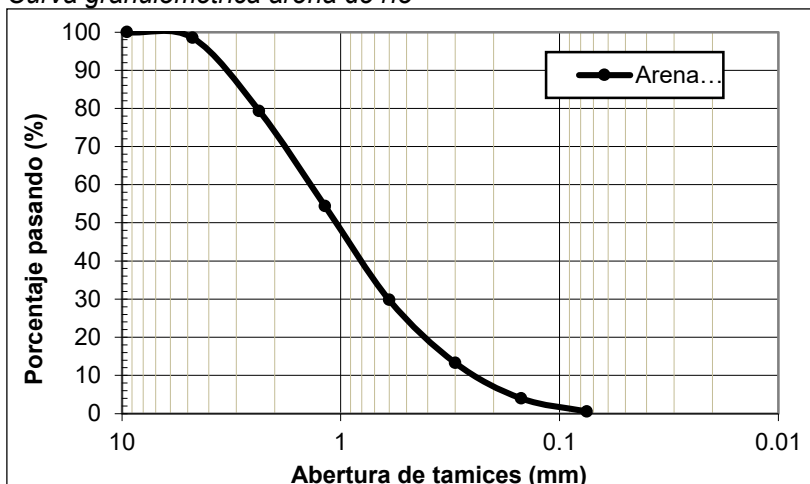
Arena de río

En la Figura 4 se presenta la curva granulométrica de la arena de río.



Figura 4

Curva granulométrica arena de río



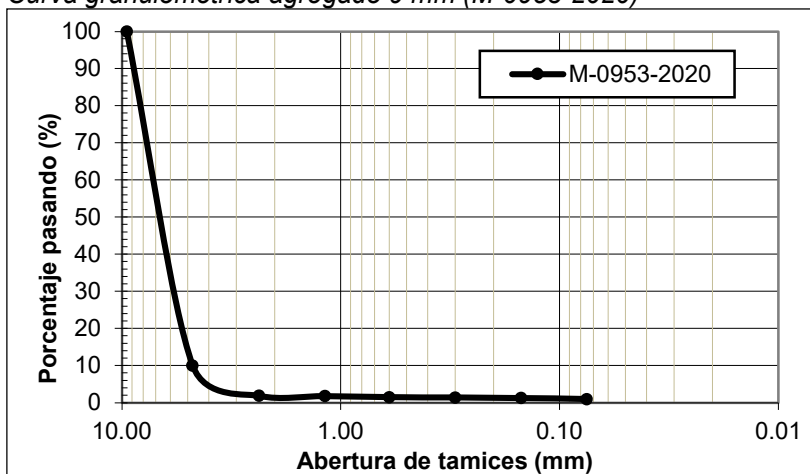
Nota. Adaptado de Solís (2021).

Piedra de 9 mm

La muestra M-0953-2020 consiste en agregado grueso de 9 mm. La curva granulométrica se presenta en la Figura 5.

Figura 5

Curva granulométrica agregado 9 mm (M-0953-2020)



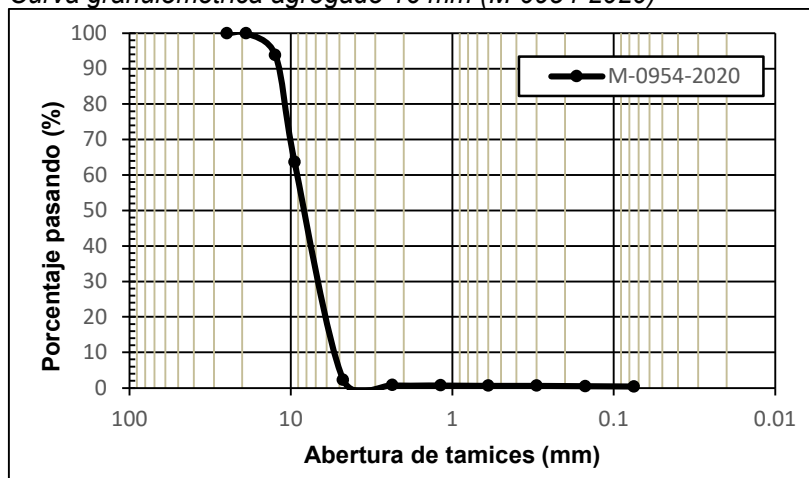
Piedra de 16 mm

En la Figura 16 se presenta la curva granulométrica de la muestra M-0954-2020, la cual se identifica como agregado grueso de 16 mm.



Figura 6

Curva granulométrica agregado 16 mm (M-0954-2020)

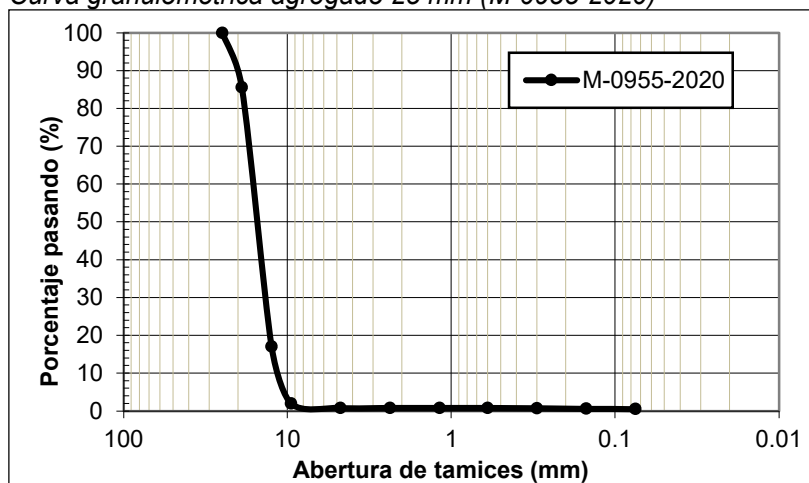


Piedra de 25 mm

La muestra M-0955-2020 consiste en agregado grueso de 25 mm. La curva granulométrica se detalla en la Figura 7.

Figura 7

Curva granulométrica agregado 25 mm (M-0955-2020)



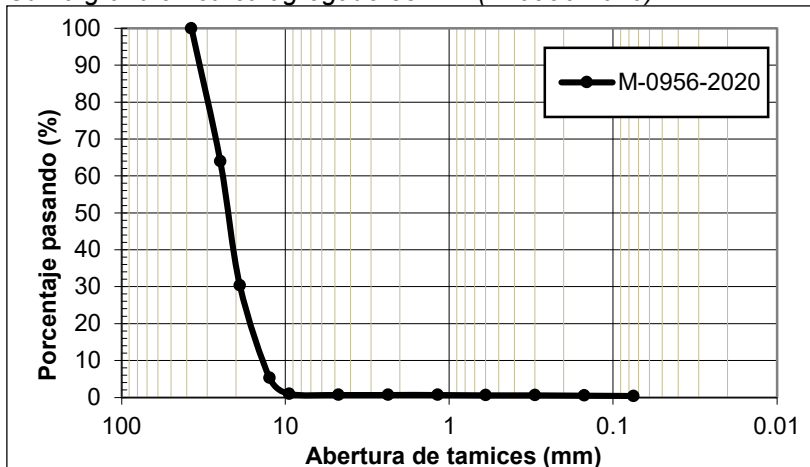
Piedra de 38 mm

En la Figura 8 se presenta la curva granulométrica de la muestra M-0956-2020, la cual se identifica como agregado grueso de 38 mm.



Figura 8

Curva granulométrica agregado 38 mm (M-0956-2020)

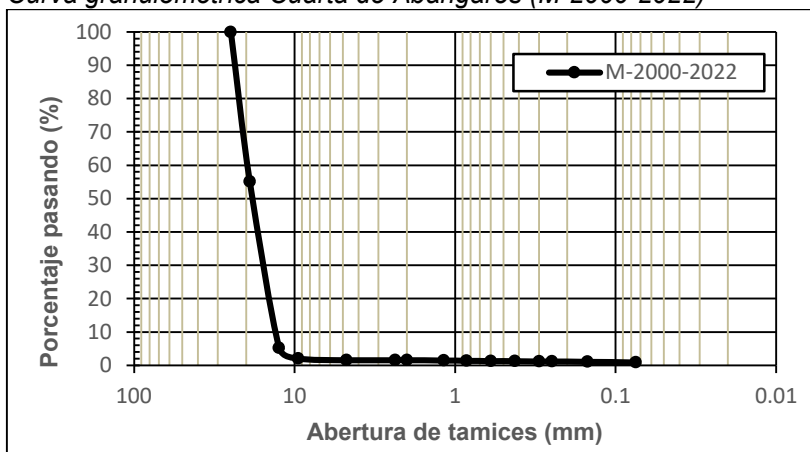


Piedra cuarta de Abangares

En la Figura 9 se presenta la curva granulométrica de la muestra M-2000-2022, la cual se identifica como agregado grueso procedente de Abangares; y en la de dicho agregado.

Figura 9

Curva granulométrica Cuarta de Abangares (M-2000-2022)



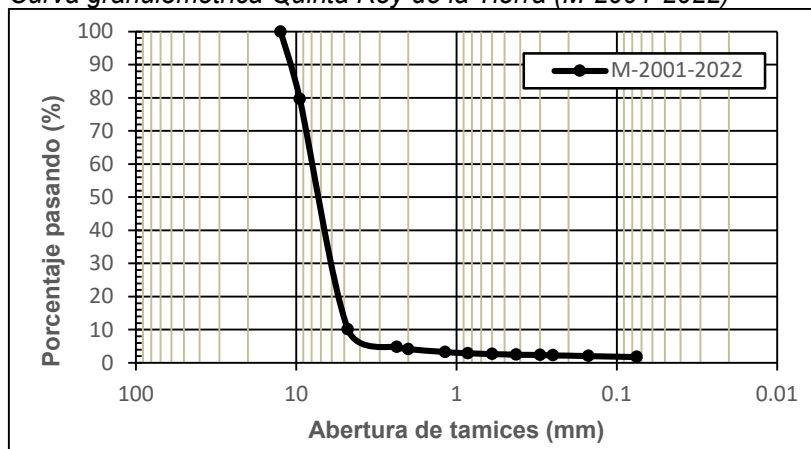
Piedra quinta del Quebrador Rey de la Tierra

En la Figura 10 se presenta la curva granulométrica de la muestra M-2001-2022, la cual se identifica como agregado grueso procedente del Quebrador Rey de la Tierra.



Figura 10

Curva granulométrica Quinta Rey de la Tierra (M-2001-2022)

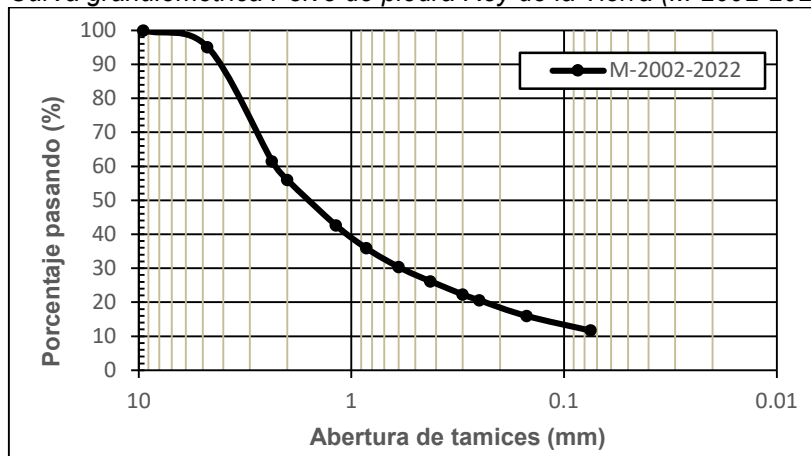


Polvo de piedra del Quebrador Rey de la Tierra

En la Figura 11 se presenta la curva granulométrica de la muestra M-2002-2022, la cual se identifica como agregado fino procedente del Quebrador Rey de la Tierra.

Figura 11

Curva granulométrica Polvo de piedra Rey de la Tierra (M-2002-2022)



Arena del Tajo San Buena

En la Figura 12 se presenta la curva granulométrica de la muestra M-2003-2022, la cual se identifica como agregado fino procedente del Tajo San Buena.



Figura 12

Curva granulométrica Polvo de piedra San Buena (M-2003-2022)

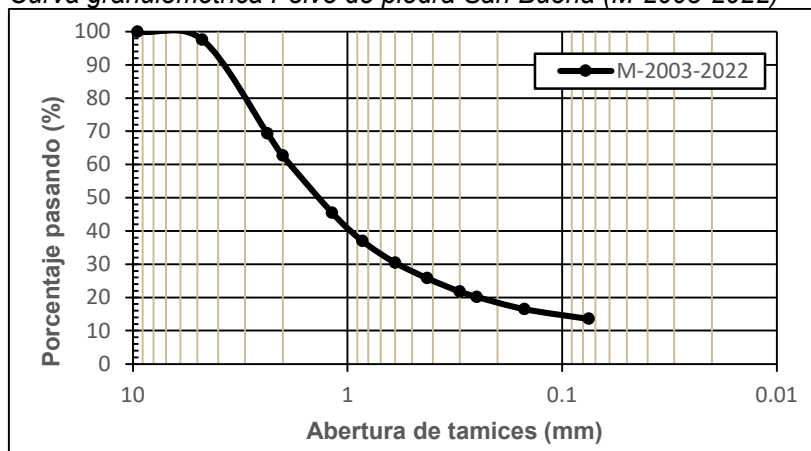
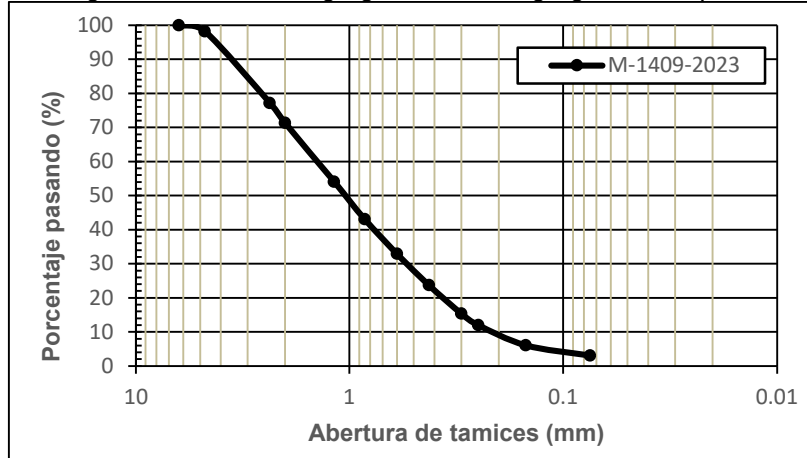




Figura 16

Curva granulométrica de agregado fino de Agregados Guápiles



2.1.2. Densidad masiva y razón de vacíos

En la Tabla 6 se presentan los resultados de peso unitario suelto y envarillado, así como la razón de vacíos para los agregados gruesos, obtenidos mediante el procedimiento de ensayo ASTM C29.

Tabla 6

Resultados del ensayo para la determinación de la densidad masiva (peso unitario) y vacíos en agregados gruesos

| Número de muestra | Peso unitario | | | | Razón de vacíos | | | |
|-------------------|----------------------------|------------|----------------------------|------------|-----------------|------------|---------|------------|
| | Envarillado | | Suelto | | Envarillado | | Suelto | |
| | Prom. (kg/m ³) | Desv. Est. | Prom. (kg/m ³) | Desv. Est. | Prom. % | Desv. Est. | Prom. % | Desv. Est. |
| M-0953-2020 | 1530 | 3,45 | 1390 | 9,43 | 41 | 0,13 | 47 | 0,36 |
| M-0954-2020 | 1570 | 7,35 | 1440 | 12,28 | 41 | 0,28 | 45 | 0,47 |
| M-0955-2020 | 1560 | 6,69 | 1450 | 7,87 | 41 | 0,25 | 45 | 0,30 |
| M-0956-2020 | 1460 | 0,42 | 1300 | 6,89 | 45 | 0,02 | 51 | 0,26 |
| M-2000-2022 | 1590 | 2,60 | 1470 | 3,42 | 40 | 0,10 | 45 | 0,13 |
| M-2001-2022 | 1510 | 2,69 | 1410 | 8,86 | 43 | 0,10 | 47 | 0,33 |
| M-1407-2023 | 1610 | 10,27 | 1520 | 12,61 | 39 | 0,39 | 42 | 0,48 |
| M-1408-2023 | 1550 | 5,75 | 1460 | 3,08 | 42 | 0,21 | 45 | 0,11 |
| M-1922-2023 | 1550 | 2,72 | 1440 | 2,84 | 42 | 0,10 | 46 | 0,11 |
| M-1409-2023 | 1620 | 7,84 | 1490 | 4,09 | 34 | 0,32 | 40 | 0,17 |

2.1.3. Gravedad específica y absorción

En la Tabla 7 se resumen los resultados de gravedad específica y porcentaje de absorción obtenidos mediante el procedimiento de ensayo ASTM C127 para los agregados gruesos y el ASTM C128 para los agregados finos.



Tabla 7

Gravedad específica y absorción de los agregados

| Número de muestra | Gravedad específica | | | Absorción (%) |
|-------------------|---------------------|-------|-------|---------------|
| | Gs | Gbs | Gbss | |
| M-0953-2020 | 2,78 | 2,62 | 2,68 | 2,1 |
| M-0954-2020 | 2,78 | 2,64 | 2,69 | 1,9 |
| M-0955-2020 | 2,78 | 2,66 | 2,70 | 1,7 |
| M-0956-2020 | 2,77 | 2,65 | 2,69 | 1,6 |
| Arena de río | 2,75* | 2,51* | 2,60* | 3,4* |
| M-2000-2022 | 2,76 | 2,67 | 2,70 | 1,3 |
| M-2001-2022 | 2,78 | 2,65 | 2,70 | 1,8 |
| M-2002-2022 | 2,77 | 2,50 | 2,60 | 3,9 |
| M-2003-2022 | 2,70 | 2,49 | 2,56 | 3,2 |
| M-1407-2023 | 2,76 | 2,64 | 2,68 | 1,7 |
| M-1408-2023 | 2,80 | 2,69 | 2,73 | 1,5 |
| M-1922-2023 | 2,81 | 2,68 | 2,73 | 1,7 |
| M-1409-2023 | 2,75 | 2,47 | 2,57 | 4,1 |

Nota. *Datos tomados de Solís (2021).

2.2. Diseños de mezcla de concreto

Para el proyecto se elaboraron cinco diferentes diseños de mezcla de concreto para pavimentos. Inicialmente, se realizan dos diseños de mezcla con los agregados gruesos previamente caracterizados, específicamente los de tamaño 38 mm (M-0955-2020) y 16 mm (M-0954-2020). Adicionalmente, se realiza un tercer diseño utilizando la arena de río y una combinación de agregados gruesos que cumpla con las especificaciones establecidas en el Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes (CR-2020).

Posteriormente, se elabora un cuarto diseño de mezcla que replicó el concreto utilizado en la expansión del tramo Cañas – Limonal de la Ruta Nacional 1. Lo anterior se realiza con base en los insumos suministrados por la empresa a cargo de la construcción. En este diseño se utiliza la piedra cuarta de Abangares (M-2000-2022), la piedra quinta del quebrador Rey de la Tierra (M-2001-2022), el polvo de piedra del quebrador Rey de la Tierra (M-2002-2022) y el polvo de piedra del tajo San Buena (M-2003-2022).

Finalmente, se realiza un quinto diseño de mezcla a partir de 4 agregados distintos, todos provenientes de Agregados Guápiles. Estos corresponderían a los agregados de tamaño máximo nominal de 38 mm (M-1407-2023), 19 mm (M-1408-2023), 12,5 mm (M-1922-2023) y agregado fino (M-1409-2023).

2.2.1. Combinación de agregados gruesos

A continuación, se muestran las combinaciones de agregados gruesos realizadas para los diseños de mezcla 3, 4 y 5. Los diseños de mezclas 1 y 2 solamente utilizan un tamaño de agregado grueso.



Diseño de mezcla 3

Para el tercer diseño de mezcla, se plantea un escenario donde se utilizan los tamaños de 9mm, 25mm y 38mm. Se utiliza la granulometría de los agregados para proponer, mediante el método de tanteo, diferentes combinaciones las cuales serán comparadas con las especificaciones INTE 06-01-02 mencionadas en el CR-2020 para así obtener una granulometría que cumpla con lo requerido. Entonces, se propone una opción de combinación la cual considera 60% de agregado de 38 mm, 25% de agregado de 25 mm y 15 % de agregado de 9 mm.

En las siguientes figuras (Figura 17 y Figura 18) se observa como esta combinación no cumple con las especificaciones No.4 de INTE 06-01-02 pero sí con las especificaciones No.467 para agregados con TMN de 1 ½”.

En la Tabla 8 se presenta el módulo de finura de la combinación.

Tabla 8

Módulo de finura de la combinación de la mezcla 3

| Proporción | | | | MF |
|------------|-------|-------|-------|------|
| 38 mm | 25 mm | 16 mm | 9 mm | |
| 60,0% | 25,0% | - | 15,0% | 7,23 |

Figura 17

Curva granulométrica de la mezcla 3 vs especificación No.4

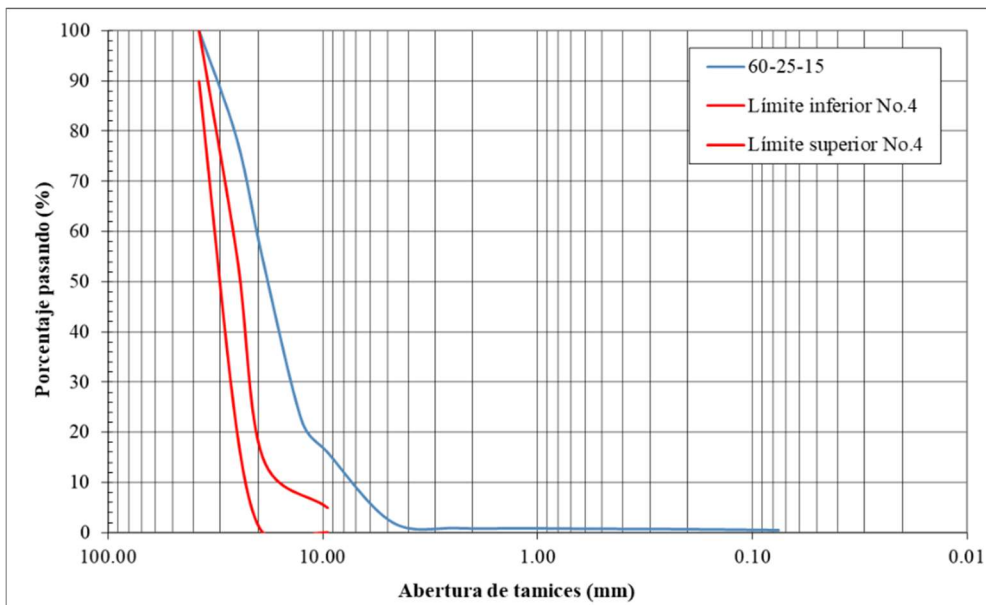
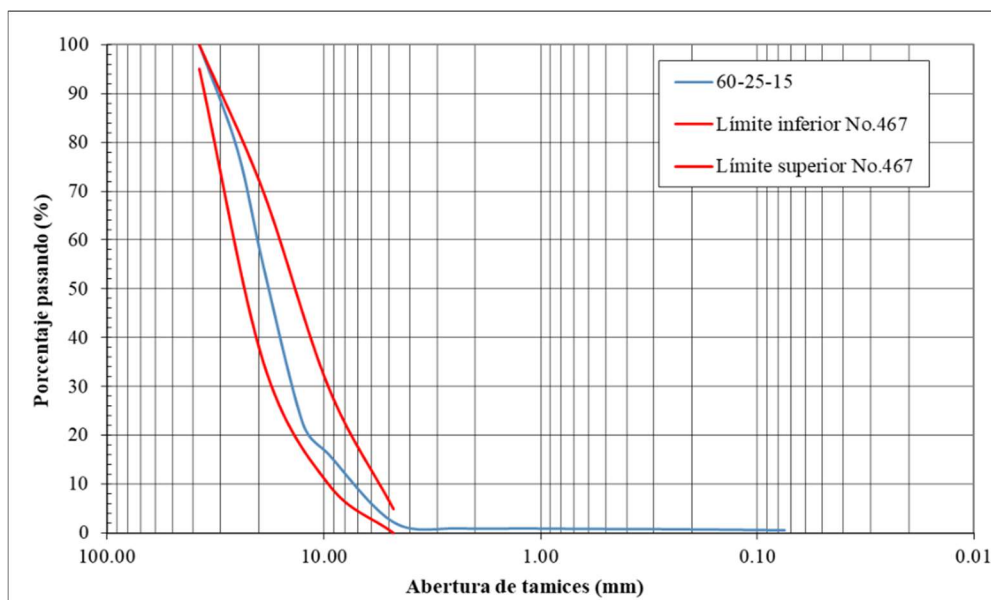




Figura 18

Curva granulométrica de la mezcla 3 vs especificación No.467



Diseño de mezcla 4 (Proyecto Cañas - Limonal)

Para el cuarto diseño de mezcla, se realiza una réplica del diseño de mezcla del proyecto Cañas – Limonal. En este, se utilizan como agregados a piedra cuarta de Abangares (M-2000-2022), la piedra quinta del Quebrador Rey de la Tierra (M-2001-2022), el polvo de piedra del Quebrador Rey de la Tierra (M-2002-2022) y el polvo de piedra del Tajo San Buena (M-2003-2022). Dicha mezcla es realizada por la empresa Holcim, la cual propone una relación de 36,7% de agregado grueso de Abangares, 20,6% de agregado grueso del Quebrador Rey de la Tierra, 25,9% de agregado fino del mismo quebrador y 16,8% de agregado fino del Tajo San Buena.

Sin embargo, la caracterización de los agregados realizada por la empresa difiere respecto con la propia, en especial en el caso de la piedra de 25 mm del Quebrador de Abangares. Por lo tanto, la granulometría de la mezcla 4 difiere ligeramente de la proporcionada por el fabricante.

En la Figura 19 se muestra la granulometría de la mezcla. Además, en la Tabla 9 se muestra el módulo de finura de la combinación de agregados.

Tabla 9

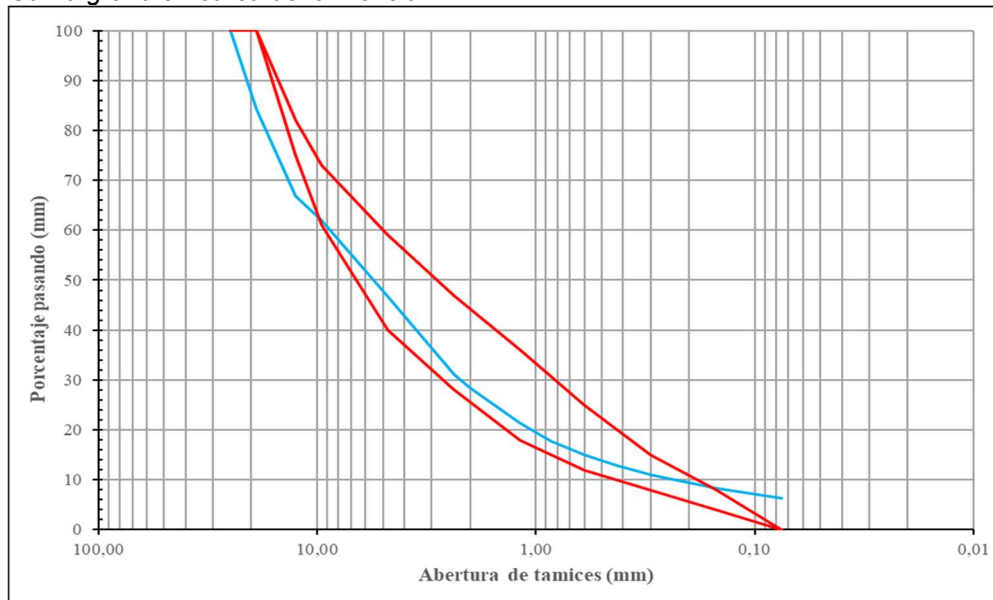
Módulo de finura de la combinación de la mezcla 4

| Proporción | | | | MF |
|------------------|-------------------------|----------------------------------|---------------------------|------|
| Cuarta Abangares | Quinta Rey de la Tierra | Polvo de piedra Rey de la Tierra | Polvo de piedra San Buena | |
| 35,0% | 19,1% | 27,4% | 18,5% | 5,10 |



Figura 19

Curva granulométrica de la mezcla 4



Diseño de mezcla 5

En esta mezcla se utilizan los agregados provenientes de Guápiles. Estos corresponderían a los agregados de tamaño máximo nominal de 38 mm (M-1407-2023), 19 mm (M-1408-2023), 12,5 mm (M-1922-2023) y agregado fino (M-1409-2023), los cuales se toman en la proporción mostrada en la Tabla 10.

Tabla 10

Módulo de finura de la combinación de la mezcla 5

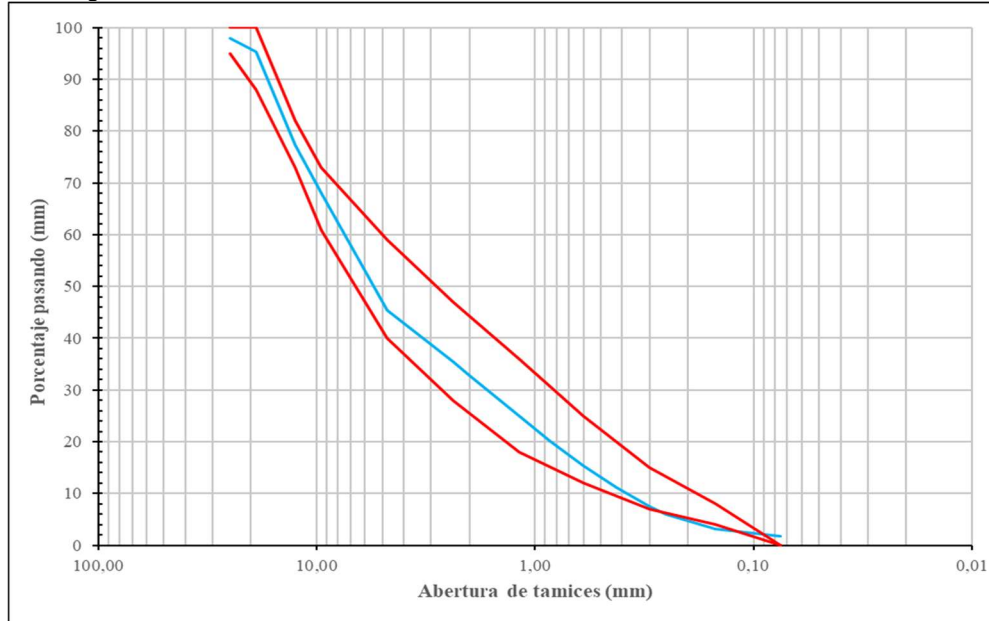
| Proporción | | | | MF |
|--------------|--------------|----------------|-------|------|
| Piedra 38 mm | Piedra 19 mm | Piedra 12,5 mm | Arena | |
| 10,0% | 20,0% | 25,0% | 45,0% | 5,05 |

Además, en la Figura 20 se muestra la curva granulométrica de los agregados utilizados en esta mezcla.



Figura 20

Curva granulométrica de la mezcla 5



2.2.2. Primeros tres diseños de mezcla

Para elaborar los diseños de mezcla se cuenta con datos iniciales los cuales no varían indiferentemente del agregado grueso que se utilice. Estos datos se presentan en la Tabla 11.

Tabla 11

Datos iniciales para establecer los tres primeros diseños de mezcla

| | | | |
|-----------------------------------|-------------------|-------------------------------|----------------|
| f'c (kg/cm²) a 28 días | 400 | Cemento tipo UG | Gs 2,81 |
| Revenimiento (mm) | 50 | | |
| Sin inductor de aire | - | | |
| Tamaño máximo nominal (mm) | Según combinación | Peso unitario del agua | 1000 |
| Módulo de finura AF | 3,21 | γw (kg/m³) | |

Como se mencionó anteriormente se realiza un diseño de mezcla que considera el agregado grueso de 16 mm (1), el de 38 mm (2) y otro con la combinación de agregados propuesta (3). más adelante, en el Apéndice 1, se muestran los cálculos de los diseños. Estos se ajustan para incluir el aditivo SH FLUXI RDS. Este tiene como objetivo principal retardar el tiempo de endurecimiento del concreto. Según el distribuidor, SAHE, mediante comunicación directa: “el aditivo FLUXI RDS es un aditivo reductor de agua de rango medio y retardante, tiene una reducción de agua de hasta un 25%, lo que incide directamente en la relación agua cemento vs un patrón sin aditivo y permite hacer concretos de gran prestación”.

Para los diseños con el aditivo se considera, inicialmente, una reducción en el agua de diseño de un 15%. El procedimiento seguido para el diseño de mezcla es el mismo



planteado anteriormente, donde únicamente varía la cantidad de agua de diseño (ver Apéndice 2 más adelante). Los resultados obtenidos para las diferentes combinaciones propuestas se presentan en la Tabla 12.

Tabla 12

Tres primeros diseños de mezcla con aditivo

| Diseño de mezcla | Agregado grueso utilizado | Proporción | a/c |
|------------------|---------------------------|-------------|------|
| 1 | 16 mm | 1:1,51:1,87 | 0,35 |
| 2 | 38 mm | 1:1,94:2,33 | 0,35 |
| 3 | 9mm, 25mm, 38mm | 1:1,54:1,95 | 0,44 |

2.2.1. Diseño de mezcla 4 (Cañas – Limonal)

Para elaborar el diseño de mezcla se cuenta con datos iniciales de la Tabla 13. Este diseño de detalla en el Apéndice 2 más adelante, mientras que la combinación de agregados se muestra en la Tabla 9.

Tabla 13

Datos iniciales para el diseño de mezcla 4

| | | | | |
|--|---------|---|-----------|------|
| f_c (kg/cm²) a 28 días | 356,895 | | | |
| Revenimiento (mm) | 50 | Cemento tipo UG | Gs | 2,95 |
| Sin inductor de aire | - | | | |
| Tamaño máximo nominal (mm) | 25 | Peso unitario del agua | | 1000 |
| Módulo de finura AF | 5,2 | γ_w (kg/m³) | | |

Los resultados obtenidos para la combinación propuesta se presentan en la Tabla 14:

Tabla 14

Diseño de mezcla con agregados de Cañas - Limonal

| Diseño de mezcla | Agregado utilizado | Proporción | a/c |
|------------------|--|-------------|------|
| 4 | Cuarta Abangares, Quinta Rey de la Tierra, Arena Rey de la Tierra, Arena San Buena | 1:1,79:2,11 | 0,44 |

2.2.2. Diseño de mezcla 5 (Agregados Guápiles)

Para elaborar el diseño de mezcla se cuenta con datos iniciales de la Tabla 15. Este diseño de detalla en el Apéndice 2 más adelante, mientras que la combinación de agregados se muestra en la Tabla 10.

Tabla 15

Datos iniciales para el diseño de mezcla 5

| | | | | |
|--|---------|---|-----------|------|
| f_c (kg/cm²) a 28 días | 396,895 | | | |
| Revenimiento (mm) | 75 | Cemento tipo UG | Gs | 2,95 |
| Sin inductor de aire | - | | | |
| Tamaño máximo nominal (mm) | 38 | Peso unitario del agua | | 1000 |
| Módulo de finura AF | 5,05 | γ_w (kg/m³) | | |



Cabe destacar que en este diseño también se añade aditivo Fluxi RDS. Los resultados obtenidos para la combinación propuesta se presentan en la Tabla 16:

Tabla 16

Diseños de mezcla con agregados de Cañas - Limonal

| Diseño de mezcla | Agregado utilizado | Proporción | a/c |
|------------------|---|-------------|------|
| 5 | Piedra 38 mm, Piedra 19 mm, Piedra 12,5 mm y Arena (Todos procedentes de Agregados Guápiles) | 1:1,95:2,38 | 0,43 |

2.3. Validación de diseños de mezcla

Una vez seleccionados los diseños por utilizar se procede a la fase de validación de los mismos. Esto con el fin de determinar si estos cumplen los siguientes requisitos establecidos en el CR-2020:

- Relación agua-cemento no mayor a 0,45.
- Temperatura del concreto entre los 13 °C y los 35 °C.
- Asentamiento máximo de 100mm.
- Resistencia a la compresión mínima de 35 MPa (357 kg/cm²), a los 28 días.
- Resistencia a la flexión mínima de 4,5 MPa (45,9 kg/cm²), a los 28 días.

Como se mencionó anteriormente, para la validación se ejecutan, como mínimo, los siguientes ensayos:

- Procedimiento para determinar el asentamiento en el concreto de cemento hidráulico (ASTM C143): Se realiza una prueba para cada mezcla ejecutada.
- Método de ensayo para determinar el contenido de aire del concreto fresco recién mezclado por el método de presión (ASTM C231).
- Método para determinar la densidad (peso unitario), rendimiento y contenido de aire del concreto por el método gravimétrico (ASTM C138).
- Método de Ensayo Normalizado para Resistencia a la Compresión de Especímenes Cilíndricos de Concreto (ASTM C39): Se realizarán 6 especímenes cilíndricos los cuales se fallarán 3 a los 7 días y 3 a los 28 días para determinar la resistencia a la compresión de la mezcla.
- Método de Ensayo Normalizado para Resistencia a Flexión en Vigas de Concreto (ASTM C78): Se realizarán 4 vigas que se fallarán 1 a los 7 días y 3 a los 28 días para determinar el módulo de ruptura de la mezcla.

2.3.1. Condiciones de mezcla

Las condiciones de mezcla para las 5 mezclas estudiadas se presentan en la Tabla 17.



Tabla 17

Condiciones principales de las distintas mezclas

| Mezcla | Temperatura de la mezcla (°C) | Asentamiento (mm) | Contenido de aire (%) | Peso unitario (kg/m ³) |
|--------|-------------------------------|-------------------|-----------------------|------------------------------------|
| 1 | 27,0 | 70 | 3,0 | 2340 |
| 2 | 26,0 | 90 | 1,8 | 2397 |
| 3 | 28,0 | 90 | 2,4 | 2344 |
| 4 | 24,5 | 170 | 1,5 | 2374 |
| 5 | 27,5 | 95 | 2,2 | 2317 |

2.3.2. Resistencia a la compresión y flexión

Mezcla 1

La mezcla 1 de agregado de tamaño nominal de 19 mm fue sometida a los ensayos de resistencia a la compresión (ASTM C39) y resistencia a la flexión (ASTM C78). Los resultados para este diseño se aprecian en la Tabla 18.

Tabla 18

Resistencia a la compresión y a la flexión para la mezcla 1

| Esfuerzo | Curado | Resistencia promedio | | Módulo de ruptura promedio | Desviación estándar | |
|------------|--------|----------------------|--------------------|----------------------------|---------------------|--------------------|
| | | MPa | kg/cm ² | | MPa | kg/cm ² |
| Compresión | 7 | 37,8 | 375 | - | 2,1 | 21,7 |
| Compresión | 28 | 50,0 | 508 | - | 4,2 | 43,0 |
| Flexión | 7 | - | - | 4,30 | 0,0 | - |
| Flexión | 28 | - | - | 5,10 | 0,4 | - |

Mezcla 2

La mezcla 2 de agregado de tamaño nominal de 38 mm fue sometida a los ensayos de resistencia a la compresión y resistencia a la flexión. Los resultados para este diseño se aprecian en la Tabla 19.

Tabla 19

Resistencia a la compresión y a la flexión para la mezcla 2

| Esfuerzo | Curado | Resistencia a compresión promedio | | Módulo de ruptura promedio | Desviación estándar | |
|------------|--------|-----------------------------------|--------------------|----------------------------|---------------------|--------------------|
| | | MPa | kg/cm ² | | MPa | kg/cm ² |
| Compresión | 7 | 34,0 | 342 | - | 2,9 | 29,4 |
| Compresión | 28 | 43,0 | 435 | - | 5,7 | 58,4 |
| Flexión | 7 | - | - | 3,10 | 0,0 | - |
| Flexión | 28 | - | - | 4,55 | 0,2 | - |

Mezcla 3

La mezcla 3 de combinación de agregados gruesos fue sometida a los ensayos de resistencia a la compresión y resistencia a la flexión. Los resultados para este diseño se aprecian en la Tabla 20.



Tabla 20

Resistencia a la compresión y a la flexión para la mezcla 3

| Esfuerzo | Curado | Resistencia a compresión promedio | | Módulo de ruptura promedio | Desviación estándar | |
|------------|--------|-----------------------------------|--------------------|----------------------------|---------------------|--------------------|
| | | MPa | kg/cm ² | | MPa | kg/cm ² |
| Compresión | 7 | 32,0 | 321 | - | 4,0 | 40,8 |
| Compresión | 28 | 47,0 | 479 | - | 1,3 | 13,1 |
| Flexión | 7 | - | - | 3,61 | 0,3 | - |
| Flexión | 28 | - | - | 4,71 | 0,1 | - |

Mezcla 4

La mezcla 4 que imita el concreto del proyecto Cañas-Limonar fue sometida a los ensayos de resistencia a la compresión y resistencia a la flexión. Los resultados para este diseño se aprecian en la Tabla 21.

Tabla 21

Resistencia a la compresión y a la flexión para la mezcla 4

| Esfuerzo | Curado | Resistencia a compresión promedio | | Módulo de ruptura promedio | Desviación estándar | |
|------------|--------|-----------------------------------|--------------------|----------------------------|---------------------|--------------------|
| | | MPa | kg/cm ² | | MPa | kg/cm ² |
| Compresión | 7 | 40,0 | 405 | - | 0,7 | 7,0 |
| Compresión | 28 | 49,9 | 509 | - | 3,8 | 40,8 |
| Flexión | 7 | - | - | 4,80 | 0,1 | - |
| Flexión | 28 | - | - | 5,17 | 0,2 | - |

Mezcla 5

La mezcla 5, de agregados provenientes de Agregados Guápiles, fue sometida a los ensayos de resistencia a la compresión y resistencia a la flexión. Los resultados para este diseño se aprecian en la Tabla 22.

Tabla 22

Resistencia a la compresión y a la flexión para la mezcla 5

| Esfuerzo | Curado | Resistencia a compresión promedio | | Módulo de ruptura promedio | Desviación estándar | |
|------------|--------|-----------------------------------|--------------------|----------------------------|---------------------|--------------------|
| | | MPa | kg/cm ² | | MPa | kg/cm ² |
| Compresión | 7 | 30,0 | 309 | - | 2,3 | 23,5 |
| Compresión | 28 | 37,0 | 379 | - | 14,0 | 142,7 |
| Flexión | 7 | - | - | 4,20 | 0,3 | - |
| Flexión | 28 | - | - | 4,90 | 0,2 | - |

2.3.3. Validación

En la Tabla 23 se presentan los resultados obtenidos para cada uno de los diseños en comparación con las especificaciones del CR-2020.



Tabla 23

Comparación de las propiedades de las mezclas con la norma CR-2020

| Mezcla | Relación a/c | Temperatura de la mezcla (°C) | Asentamiento (mm) | Resistencia a la compresión a los 28 días (MPa) | Resistencia a la flexión a los 28 días (MPa) |
|------------------------|----------------|-------------------------------|-------------------|---|--|
| Especificación CR-2020 | $\leq 0,45$ | $13 \leq T \leq 35$ | ≤ 100 | ≥ 35 MPa | $\geq 4,5$ MPa |
| Mezcla 1 | 0,35 cumple | 27,0 cumple | 70 cumple | 37,0 cumple | 5,10 cumple |
| Mezcla 2 | 0,35 cumple | 26,0 cumple | 90 cumple | 42,7 cumple | 4,55 cumple |
| Mezcla 3 | 0,44 cumple | 28,0 cumple | 90 cumple | 47,0 cumple | 4,71 cumple |
| Mezcla 4 | 0,44 cumple | 24,5 cumple | 170* cumple | 49,9 cumple | 5,17 cumple |
| Mezcla 5 | 0,43 cumple | 27,5 cumple | 95* cumple | 37,0 cumple | 4,9 cumple |

Nota. El valor de asentamiento se presenta con aditivo, este valor debe ser de 140 mm \pm 35 mm.

Como se observa, en todos los casos se cumplen con los requisitos establecidos para que el concreto hidráulico sea utilizado en pavimentos rígidos.

2.4. Ensayos mecánicos

A continuación, se muestran los resultados obtenidos a la fecha para los tres diseños de mezcla enumerados anteriormente.

2.4.1. Módulo elástico estático (ASTM C469)

Diseño de mezcla 1

El módulo de elasticidad estático de la mezcla 1 se puede apreciar en la Tabla 24 a continuación:

Tabla 24

Módulo de elasticidad estático del concreto en compresión a los 28 días, diseño de mezcla 1

| Espécimen No. | Área (mm ²) | Resistencia (MPa) | Módulo de elasticidad (MPa) |
|------------------|-------------------------|-------------------|-----------------------------|
| 1 | 18265 | 45,2 | 26500 |
| 2 | 18096 | 45,6 | 26600 |
| 3 | 18189 | 45,4 | 21700 |
| Promedio | | | 24933 |
| Desv.Est. | | | 2801 |

Diseño de mezcla 2

El módulo de elasticidad estático de la mezcla 2 se puede apreciar en la Tabla 25 a continuación.



Tabla 25

Módulo de elasticidad estático del concreto en compresión a los 28 días, diseño de mezcla 2

| Espécimen No. | Área (mm ²) | Resistencia (MPa) | Módulo de elasticidad (MPa) |
|------------------|-------------------------|-------------------|-----------------------------|
| 1 | 20300 | 20,3 | 20300 |
| 2 | 24100 | 24,1 | 24100 |
| 3 | 19900 | 19,9 | 19900 |
| Promedio | | | 21433 |
| Desv.Est. | | | 2318 |

Diseño de mezcla 3

El módulo de elasticidad estático de la mezcla 3 se puede apreciar en la Tabla 26.

Tabla 26

Módulo de elasticidad estático del concreto en compresión a los 28 días, diseño de mezcla 3

| Espécimen No. | Área (mm ²) | Resistencia (MPa) | Módulo de elasticidad (MPa) |
|------------------|-------------------------|-------------------|-----------------------------|
| 1 | 18091 | 47,7 | 26300 |
| 2 | 18042 | 47,7 | 26900 |
| 3 | 17996 | 47,9 | 27500 |
| Promedio | | | 26900 |
| Desv.Est. | | | 600 |

Diseño de mezcla 4

El módulo de elasticidad estático de la mezcla 4 se puede apreciar en la Tabla 29.

Tabla 27

Módulo de elasticidad estático del concreto en compresión a los 28 días, diseño de mezcla 4

| Espécimen No. | Área (mm ²) | Resistencia (MPa) | Módulo de elasticidad (MPa) |
|------------------|-------------------------|-------------------|-----------------------------|
| 1 | 18054 | 43,4 | 25441 |
| Promedio | | | 25441 |
| Desv.Est. | | | - |

Diseño de mezcla 5

El módulo de elasticidad estático de la mezcla 5 se puede apreciar en la Tabla 28.

Tabla 28

Módulo de elasticidad estático del concreto en compresión a los 28 días, diseño de mezcla 5

| Espécimen No. | Área (mm ²) | Resistencia (MPa) | Módulo de elasticidad (MPa) |
|------------------|-------------------------|-------------------|-----------------------------|
| 1 | 18074 | 28,4 | 22800 |
| 2 | 18028 | 28,4 | 21800 |
| 3 | 18041 | 28,4 | 22800 |
| Promedio | | | 22467 |
| Desv.Est. | | | 577 |



2.4.1. Módulo dinámico (Austroads, 2012)

Para todos los casos, se aplica el 35% de la carga máxima soportada por las vigas para el ensayo de flexión (ASTM C78) en condición seca, siendo un valor de carga lo suficientemente bajo como para no dañar la viga y que el material se comporte dentro del rango elástico; pero lo suficientemente alto como para poder medir las deformaciones producto del esfuerzo de tensión en el tercio central del espécimen. Los resultados de las vigas para la condición seca se resumen en la Tabla 29.

Tabla 29

Resistencia de vigas a flexión en condición seca, falla a los 28 días

| Diseño de mezcla | Carga máxima (kN) |
|-------------------|-------------------|
| 1 (16 mm) | 26,27 |
| 2 (38 mm) | 28,68 |
| 3 (Combinada) | 37,84 |
| 4 (Cañas-Liberia) | 46,29 |
| 5 (Guápiles) | 21,50 |

A continuación, se resumen los ensayos de módulo dinámico realizados a la fecha para los diseños de mezcla.

Diseño 1 (16 mm)

Para el diseño de mezcla 1 el valor nominal correspondiente al 35% de la carga utilizado fue de 12,25 kN. En la Tabla 30 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 30

Módulo Dinámico a los 28 días, diseño de mezcla 1

| Espécimen No. | Carga promedio (N) | Deformación unitaria promedio (mm/mm) | Módulo Dinámico promedio (GPa) |
|--------------------|--------------------|---------------------------------------|--------------------------------|
| 1 | 11982 | 7,12E-02 | 21,4 |
| 2 | 11947 | 6,03E-02 | 25,2 |
| 3 | 12786 | 8,04E-02 | 20,2 |
| 4 | 12636 | 8,02E-02 | 20,0 |
| 5 | 12281 | 7,11E-02 | 22,0 |
| 6 | 12231 | 7,55E-02 | 20,6 |
| 7 | 12147 | 7,12E-02 | 21,7 |
| 8 | 12067 | 6,86E-02 | 22,4 |
| 9 | 12274 | 7,36E-02 | 21,2 |
| 10 | 12273 | 7,11E-02 | 22,0 |
| 11 | 11981 | 6,48E-02 | 23,5 |
| 12 | 12191 | 6,59E-02 | 23,5 |
| 13 | 12145 | 8,13E-02 | 19,0 |
| 14 | 11930 | 5,93E-02 | 25,6 |
| 15 | 12187 | 6,07E-02 | 25,6 |
| Promedio | | | 22,27 |
| Desv.Estad. | | | 2,11 |



Diseño 2 (38 mm)

Para el diseño de mezcla 2 el valor nominal correspondiente al 35% de la carga utilizado fue de 10,85 kN. En la Tabla 31 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 31

Módulo Dinámico a los 28 días, diseño de mezcla 2

| Espécimen No. | Carga promedio (N) | Deformación unitaria promedio (mm/mm) | Módulo Dinámico promedio (GPa) |
|---------------------|--------------------|---------------------------------------|--------------------------------|
| 1 | 10713 | 4,92E-05 | 27,2 |
| 2 | 10920 | 4,74E-05 | 28,4 |
| 3 | 11006 | 4,85E-05 | 28,4 |
| 4 | 10844 | 5,07E-05 | 26,4 |
| 5 | 10823 | 5,30E-05 | 26,0 |
| 6 | 10969 | 7,35E-05 | 18,7 |
| 7 | 10942 | 7,24E-05 | 19,0 |
| 8 | 10863 | 7,85E-05 | 17,4 |
| 9 | 10836 | 6,08E-05 | 22,2 |
| 10 | 10658 | 5,69E-05 | 23,3 |
| 11 | 10925 | 6,30E-05 | 22,0 |
| Promedio | | | 23,54 |
| Desv. Estad. | | | 4,01 |

Diseño 3 (combinada)

Para el diseño de mezcla 3 el valor nominal correspondiente al 35% de la carga utilizado fue de 16,15 kN. En la Tabla 32 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 32

Módulo dinámico a los 28 días, diseño de mezcla 3

| Espécimen No. | Carga promedio (N) | Deformación unitaria promedio (mm/mm) | Módulo Dinámico promedio (GPa) |
|---------------------|--------------------|---------------------------------------|--------------------------------|
| 1 | 16250 | 7,57E+00 | 27,0 |
| 2 | 16108 | 6,97E+00 | 28,8 |
| 3 | 16073 | 8,84E+00 | 23,0 |
| 4 | 16031 | 9,15E+00 | 21,8 |
| 5 | 16101 | 8,38E+00 | 24,3 |
| 6 | 16113 | 7,02E+00 | 28,4 |
| 7 | 16181 | 7,75E-01 | 26,1 |
| 8 | 16161 | 7,09E+00 | 28,1 |
| 9 | 16147 | 7,69E+00 | 26,8 |
| 10 | 16095 | 7,23E+00 | 27,8 |
| 11 | 16233 | 7,49E+00 | 27,0 |
| 12 | 16147 | 7,92E-02 | 25,9 |
| 13 | 16249 | 9,43E-02 | 22,1 |
| 14 | 16181 | 7,41E-02 | 27,6 |
| 15 | 16226 | 8,74E-02 | 23,4 |
| Promedio | | | 25,87 |
| Desv. Estad. | | | 2,28 |



Diseño 4 (Cañas - Liberia)

Para el diseño de mezcla 4 el valor nominal correspondiente al 35% de la carga utilizado fue de 16,20 kN. En la Tabla 33 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 33

Módulo dinámico a los 28 días, diseño de mezcla 4

| Espécimen No. | Carga promedio (N) | Deformación unitaria promedio (mm/mm) | Módulo Dinámico promedio (GPa) |
|---------------------|--------------------|---------------------------------------|--------------------------------|
| 1 | 11867 | 4,74E-05 | 31,5 |
| 2 | 11879 | 4,85E-05 | 31,0 |
| 3 | 11969 | 5,15E-05 | 28,9 |
| 4 | 16146 | 6,51E-05 | 31,6 |
| 5 | 16118 | 6,98E-05 | 29,3 |
| 6 | 16164 | 6,37E-05 | 32,3 |
| 7 | 16192 | 6,65E-05 | 31,2 |
| 8 | 16200 | 6,25E-05 | 33,1 |
| 9 | 16252 | 6,14E-05 | 33,9 |
| 10 | 16136 | 6,58E-05 | 31,5 |
| 11 | 16205 | 5,96E-05 | 34,3 |
| 12 | 16135 | 5,96E-05 | 34,2 |
| 13 | 14296 | 7,13E-05 | 25,5 |
| 14 | 15991 | 6,80E-05 | 29,8 |
| 15 | 16172 | 7,18E-05 | 28,6 |
| 16 | 15999 | 6,46E-05 | 30,9 |
| 17 | 16062 | 8,64E-05 | 23,5 |
| Promedio | | | 30,65 |
| Desv. Estad. | | | 2,91 |

Diseño 5 (Agregados Guápiles)

Para el diseño de mezcla 5 el valor nominal correspondiente al 35% de la carga utilizado fue de 7,25 kN. En la Tabla 34 se muestran los resultados obtenidos.



Tabla 34

Módulo dinámico a los 28 días, diseño de mezcla 5

| Espécimen No. | Carga promedio (N) | Deformación unitaria promedio (mm/mm) | Módulo Dinámico promedio (GPa) |
|---------------------|--------------------|---------------------------------------|--------------------------------|
| 1 | 7219 | 4,50E-05 | 20,5 |
| 2 | 7198 | 4,67E-05 | 19,5 |
| 3 | 7202 | 5,10E-05 | 18,1 |
| 4 | 7262 | 4,91E-05 | 18,7 |
| 5 | 7270 | 4,91E-05 | 18,9 |
| 6 | 7257 | 4,53E-05 | 20,2 |
| 7 | 7299 | 4,36E-05 | 21,2 |
| 8 | 7287 | 5,20E-05 | 17,8 |
| 9 | 7239 | 4,58E-05 | 20,1 |
| 10 | 7299 | 5,45E-05 | 16,9 |
| 11 | 7335 | 4,87E-05 | 19,1 |
| 12 | 7247 | 3,52E-05 | 26,3 |
| 13 | 7276 | 4,42E-05 | 20,8 |
| 14 | 7239 | 4,46E-05 | 20,8 |
| 15 | 7365 | 5,13E-05 | 18,1 |
| 16 | 7399 | 4,89E-05 | 19,1 |
| Promedio | | | 19,76 |
| Desv. Estad. | | | 2,06 |

2.4.2. Fisuramiento por fatiga en vigas de concreto (Austroads, 2012)

El ensayo de fisuramiento por fatiga consiste en aplicar pulsos de carga haversiana a la viga, hasta llevarla a la falla. Cada periodo de los pulsos de carga incluye 250 ms de carga y 250 ms de descanso. Usualmente se aplica entre el 50 % y el 90 % de la carga estimada de falla por flexión en una viga seca, en donde se utilizaron los mismos resultados mostrados en la Tabla 29. El criterio de falla para este ensayo se define como el número de ciclos aplicados al espécimen para reducir su módulo de elasticidad inicial en un 50 %.

Para este ensayo, se fallan los mismos especímenes que se utilizan durante el ensayo de módulo dinámico, ya que no han experimentado ningún tipo de deformación permanente, pues se les aplicó únicamente el 35 % de su carga máxima de rotura por 100 ciclos. Durante el tiempo de ejecución del ensayo, se registra la carga aplicada y la deformación de la viga cada 10 ms aproximadamente; además del número total de ciclos hasta la falla.

El tiempo, en segundos, que tarda cada uno de los especímenes en fallar puede calcularse multiplicando la cantidad de ciclos soportados por la viga hasta la ruptura por la duración del ciclo (0,5 s). Las deformaciones máximas se miden con la galga extensométrica colocada en cada una de las vigas ensayadas durante la prueba de fisuramiento por fatiga.

Para obtener la relación de esfuerzos (SR) es necesario calcular el esfuerzo aplicado a la viga, producto de la carga. En donde el esfuerzo se calcula como el momento máximo soportado por la viga dividido en entre el módulo sección, como se muestra en la (1 y la (2.

$$SR = \frac{\sigma}{MR} \quad (1)$$



Donde,

σ : Esfuerzo

MR: Módulo Ruptura

$$\sigma = \frac{\text{Momento max.}}{\text{Modulo Sección}} \quad (2)$$

Para calcular el momento máximo, al ser una viga con dos puntos de apoyo y la carga en los tercios medios, se utiliza la (3).

$$\text{Momento max.} = \frac{\text{Distancia entre apoyos} * \text{carga}}{4} \quad (3)$$

El módulo de sección se calculó de acuerdo con la fórmula para rectángulos, tomando el ancho y la altura de la viga como valores de entrada. A continuación, se muestran los resultados de vida al fisuramiento por fatiga obtenidos a la fecha.

Diseño 1 (16 mm)

Se fallaron 14 vigas de concreto al Fisuramiento por fatiga, variando el valor de la carga para obtener distintas relaciones de esfuerzo (SR). En la Tabla 35 se muestran los resultados obtenidos en términos del SR y los ciclos (N) a los que falló.

Tabla 35

Resultados de vida al fisuramiento por fatiga en vigas de concreto, diseño de mezcla 1

| Viga | SR | N | Viga | SR | N |
|------|------|-----|------|------|--------|
| 1 | 0,70 | 5 | 8 | 0,56 | 168 |
| 2 | 0,73 | 9 | 9 | 0,56 | 59 |
| 3 | 0,79 | 3 | 10 | 0,56 | 18906 |
| 4 | 0,78 | 101 | 11 | 0,56 | 155390 |
| 5 | 0,57 | 367 | 12 | 0,48 | 24636 |
| 6 | 0,57 | 168 | 13 | 0,47 | 4261 |
| 7 | 0,57 | 810 | 14 | 0,48 | 5599 |

Diseño 2 (38 mm)

Se fallaron 11 vigas de concreto al Fisuramiento por fatiga, variando el valor de la carga para obtener distintas relaciones de esfuerzo (SR). En la Tabla 36 se muestran los resultados obtenidos en términos del SR y los ciclos (N) a los que falló.

Tabla 36

Resultados de vida al fisuramiento por fatiga en vigas de concreto, diseño de mezcla 2

| Viga | SR | N | Viga | SR | N |
|------|------|--------|------|------|------|
| 1 | 0,72 | 121662 | 7 | 1,03 | 19 |
| 2 | 0,72 | 59299 | 8 | 1,03 | 55 |
| 3 | 0,73 | 143 | 9 | 0,90 | 3775 |
| 4 | 0,74 | 93770 | 10 | 0,90 | 874 |
| 5 | 0,72 | 30562 | 11 | 0,91 | 525 |
| 6 | 0,72 | 16810 | | | |



Diseño 3 (combinada)

Se fallaron 15 vigas de concreto al Fisuramiento por fatiga, variando el valor de la carga para obtener distintas relaciones de esfuerzo (SR). En la Tabla 37 se muestran los resultados obtenidos en términos del SR y los ciclos (N) a los que falló.

Tabla 37

Resultados de vida al Fisuramiento por fatiga en vigas de concreto, diseño de mezcla 3

| Viga | SR | N | Viga | SR | N |
|------|------|-------|------|------|--------|
| 1 | 0,75 | 7766 | 9 | 0,62 | 3203 |
| 2 | 0,75 | 23288 | 10 | 0,61 | 12316 |
| 3 | 0,76 | 6867 | 11 | 0,61 | 4975 |
| 4 | 0,74 | 115 | 12 | 0,52 | 180430 |
| 5 | 0,76 | 1751 | 13 | 0,53 | 352527 |
| 6 | 0,60 | 2180 | 14 | 0,52 | 235980 |
| 7 | 0,61 | 21529 | 15 | 0,52 | 83485 |
| 8 | 0,60 | 18142 | | | |

Diseño 4 (Cañas - Liberia)

Se fallaron 17 vigas de concreto al Fisuramiento por fatiga, variando el valor de la carga para obtener distintas relaciones de esfuerzo (SR). En la Tabla 38 se muestran los resultados obtenidos en términos del SR y los ciclos (N) a los que falló.

Tabla 38

Resultados de vida al Fisuramiento por fatiga en vigas de concreto, diseño de mezcla 4

| Viga | SR | N | Viga | SR | N |
|------|------|--------|------|------|-------|
| 1 | 0,72 | 889 | 10 | 1,06 | 39776 |
| 2 | 0,73 | 4124 | 11 | 0,86 | 32830 |
| 3 | 0,72 | 172 | 12 | 0,86 | 32830 |
| 4 | 0,87 | 235 | 13 | 1,00 | 1 |
| 5 | 0,68 | 2316 | 14 | 0,86 | 670 |
| 6 | 0,68 | 57654 | 15 | 0,85 | 112 |
| 7 | 0,68 | 102756 | 16 | 0,67 | 9380 |
| 8 | 1,06 | 39899 | 17 | 0,68 | 5576 |
| 9 | 1,06 | 39571 | | | |

Diseño 5 (Agregados Guápiles)

Se fallaron 23 vigas de concreto al Fisuramiento por fatiga, variando el valor de la carga para obtener distintas relaciones de esfuerzo (SR). En la Tabla 41 se muestran los resultados obtenidos en términos del SR y los ciclos (N) a los que falló.



Tabla 39

Resultados de vida al Fisuramiento por fatiga en vigas de concreto, diseño de mezcla 5

| Viga | SR | N | Viga | SR | N |
|------|------|------|------|------|--------|
| 1 | 0,47 | 1266 | 13 | 0,30 | 27920 |
| 2 | 0,47 | 390 | 14 | 0,36 | 8165 |
| 3 | 0,47 | 148 | 15 | 0,39 | 16625 |
| 4 | 0,38 | 5105 | 16 | 0,47 | 4409 |
| 5 | 0,39 | 7783 | 17 | 0,47 | 8166 |
| 6 | 0,47 | 6432 | 18 | 0,52 | 1043 |
| 7 | 0,39 | 8173 | 19 | 0,53 | 2228 |
| 8 | 0,39 | 8171 | 20 | 0,35 | 26850 |
| 9 | 0,36 | 1823 | 21 | 0,36 | 109540 |
| 10 | 0,30 | 8171 | 22 | 0,41 | 49019 |
| 11 | 0,30 | 8170 | 23 | 0,49 | 45 |
| 12 | 0,36 | 3346 | | | |



3. Modelos de predicción de vida al fisuramiento por fatiga

3.1. Análisis de los datos

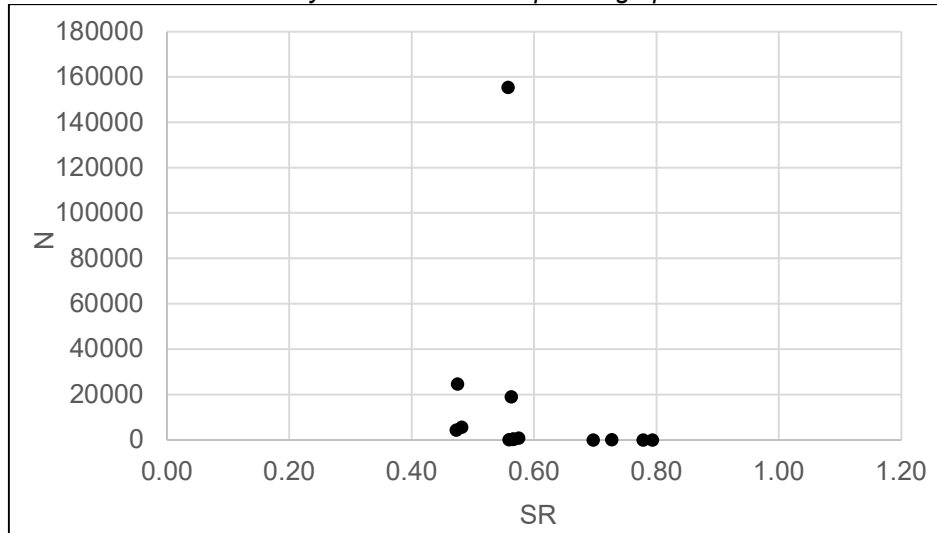
Se realiza un análisis preliminar de los datos, en donde el objetivo es eliminar posibles *outliers*, para eso se utilizan los diagramas de caja y el método de errores cuadrados.

3.1.1. Diseño de mezcla 1 (16 mm)

Inicialmente se grafican los datos obtenidos para las relaciones de esfuerzo (SR) y los ciclos (N), como se aprecia en la Figura 21, en donde, se observa que existen algunos puntos fuera de tendencia.

Figura 21

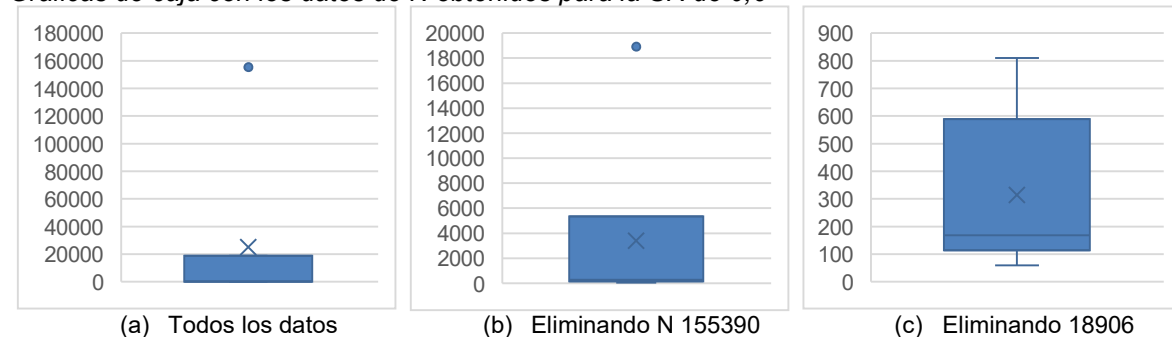
Datos obtenidos del ensayo de fisuramiento por fatiga para el diseño de mezcla 1



Se realiza el análisis de cajas para los datos con SR de 0,6; en donde, se obtienen las gráficas mostradas en la Figura 22, eliminando inicialmente dos datos, correspondientes con los valores de N de 155390 y 18906.

Figura 22

Gráficas de caja con los datos de N obtenidos para la SR de 0,6





Luego de eliminados los dos datos anteriormente mostrados, se procede a utilizar el método de cuartiles para verificar que los datos remanentes posean la misma tendencia. La Tabla 40, muestra los resultados obtenidos en donde de acuerdo con el límite inferior obtenido se elimina el punto correspondiente con SR 0,6 y LogN 1,77 (N 59).

Tabla 40

Resultados del método de cuartiles para identificar outliers en datos de SR 0,60

| Datos (LogN) | Método de Cuartiles | |
|--------------|-----------------------|------|
| 2,56 | Cuartil1 | 2,11 |
| 2,23 | Cuartil3 | 2,31 |
| 2,91 | Promedio intercuartil | 0,20 |
| 2,23 | Límite inferior | 1,80 |
| 1,77 | Límite superior | 3,07 |

3.1.2. Diseño de mezcla 2 (38 mm)

Siguiendo el mismo procedimiento explicado en el apartado anterior, se grafican los datos obtenidos y se observan datos salidos de tendencia (Figura 23), por lo tanto, utilizando el método de cuartiles se elimina un único dato correspondiente con SR 0,73 y LogN 2,16 (N 143), el cual se puede apreciar fuera de rango de acuerdo con los límites calculados en la Tabla 41.

Figura 23

Datos obtenidos del ensayo de fisuramiento por fatiga para el diseño de mezcla 2

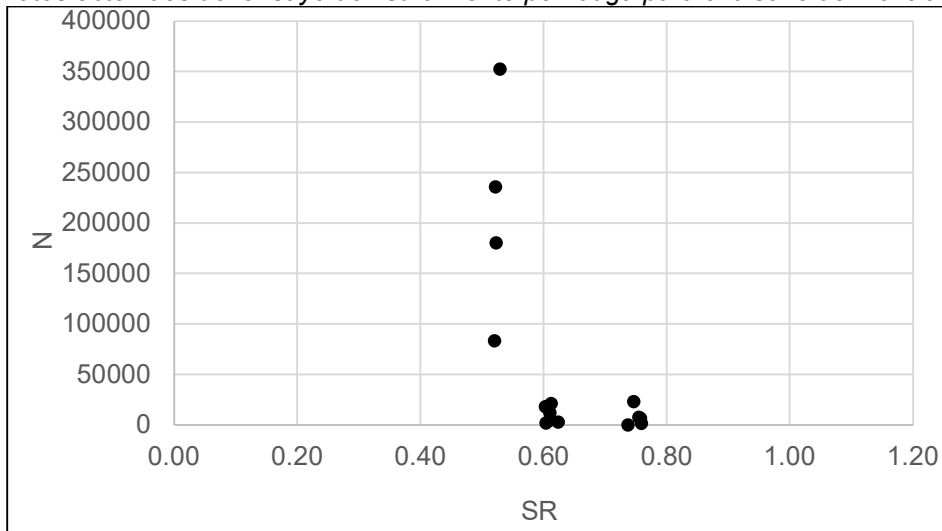


Tabla 41

Resultados del método de cuartiles para identificar outliers en datos de SR 0,73

| Datos (LogN) | Método de Cuartiles | |
|--------------|-----------------------|------|
| 5,09 | Cuartil1 | 4,29 |
| 4,77 | Cuartil3 | 4,92 |
| 2,16 | Promedio intercuartil | 0,63 |
| 4,97 | Límite inferior | 3,34 |
| 4,49 | Límite superior | 5,87 |
| 4,23 | | |



3.1.3. Diseño de mezcla 3 (combinada)

Se grafican los datos obtenidos y se observan datos salidos de tendencia (Figura 24). Utilizando el método de cuartiles se elimina un único dato correspondiente con SR 0,74 y LogN 2,06 (N 115), el cual se puede apreciar fuera de rango de acuerdo con los límites calculados en la Tabla 42.

Figura 24

Datos obtenidos del ensayo de fisuramiento por fatiga para el diseño de mezcla 3

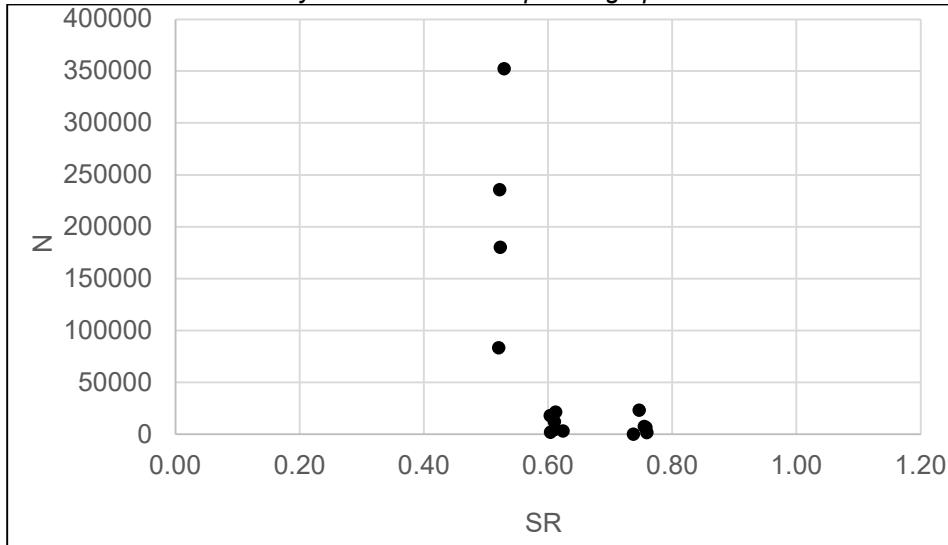


Tabla 42

Resultados del método de cuartiles para identificar outliers en datos de SR 0,75

| Datos (LogN) | Método de Cuartiles | |
|--------------|-----------------------|------|
| 3,89 | Cuartil1 | 3,24 |
| 4,37 | Cuartil3 | 3,89 |
| 3,84 | Promedio intercuartil | 0,65 |
| 2,06 | Límite inferior | 2,27 |
| 3,24 | Límite superior | 4,86 |
| 3,89 | | |

3.1.4. Diseño de mezcla 4 (Cañas - Liberia)

Se grafican los datos obtenidos y se observan datos salidos de tendencia (Figura 25), dichos datos corresponden a un SR 0,68 con logN 4,76 (N 57654) y logN 5,01 (N 102756). Los datos restantes se encuentran dentro de un rango aceptable como se puede ver en los cuartiles de la Tabla 43.



Figura 25

Datos obtenidos del ensayo de fisuramiento por fatiga para el diseño de mezcla 4

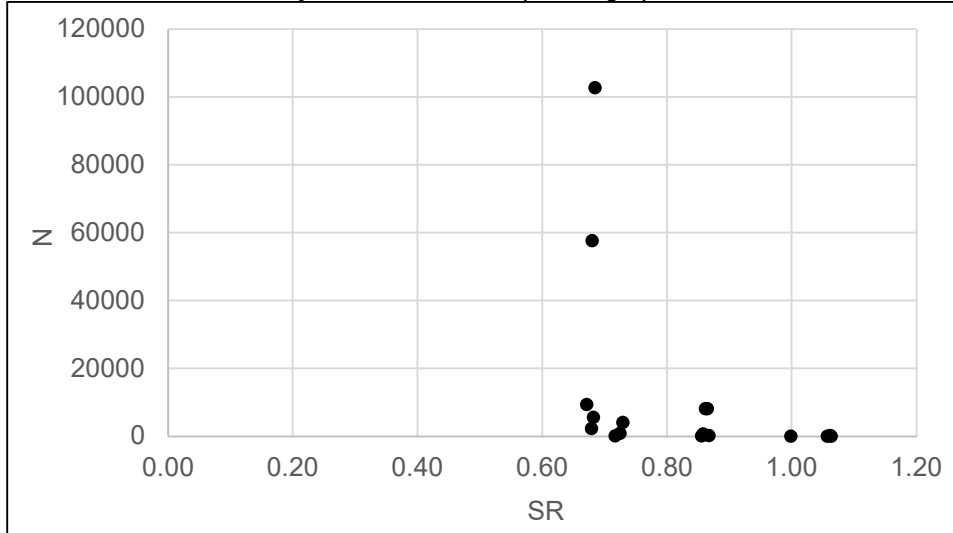


Tabla 43

Resultados del método de cuartiles para identificar outliers en datos de SR 0,68

| Datos (LogN) | | Método de Cuartiles | |
|--------------|--|-----------------------|------|
| 3,97 | | Cuartil1 | 3,56 |
| 3,36 | | Cuartil3 | 3,86 |
| 3,75 | | Promedio intercuartil | 0,30 |
| | | Límite inferior | 3,10 |
| | | Límite superior | 4,31 |

3.1.5. Diseño de mezcla 5 (Agregados Guápiles)

Se grafican los datos obtenidos y se observan datos salidos de tendencia (Figura 26). Eliminando un único dato correspondiente con SR 0,36 y LogN 5,04 (N 109540), el cual se puede apreciar fuera de rango de acuerdo con los límites calculados en la Tabla 44.



Figura 26

Datos obtenidos del ensayo de fisuramiento por fatiga para el diseño de mezcla 5

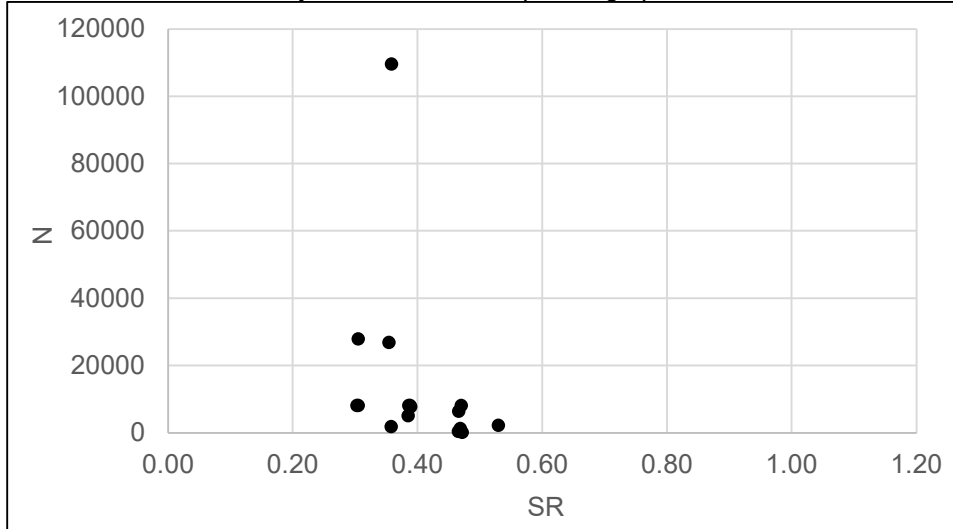


Tabla 44

Resultados del método de cuartiles para identificar outliers en datos de SR 0,39

| Datos (LogN) | | Método de Cuartiles | |
|--------------|--|-----------------------|------|
| 3,71 | | Cuartil1 | 3,90 |
| 3,91 | | Cuartil3 | 3,91 |
| 3,89 | | Promedio intercuartil | 0,01 |
| | | Límite inferior | 3,89 |
| | | Límite superior | 3,93 |

3.2. Modelos de predicción

A continuación, se muestran los modelos de predicción obtenidos.

3.2.1. Modelos de predicción individuales

En la Figura 27, Figura 28, la Figura 29, la Figura 30 y la Figura 31 se muestran los modelos de predicción obtenidos individualmente para los diseños de mezcla 1, 2, 3, 4 y 5 respectivamente.



Figura 27

Modelo de predicción lineal para el diseño de mezcla 1 (16 mm)

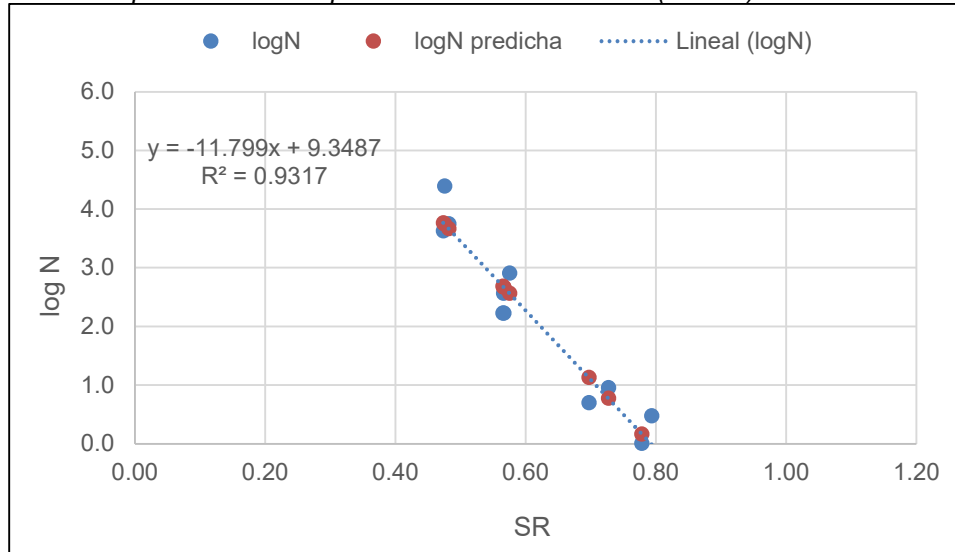


Figura 28

Modelo de predicción lineal para el diseño de mezcla 2 (38 mm)

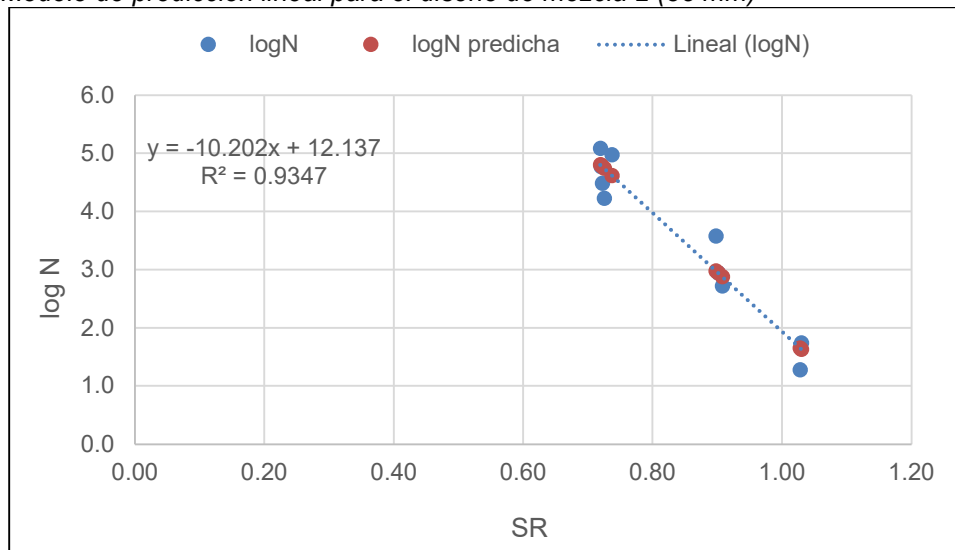




Figura 29

Modelo de predicción lineal para el diseño de mezcla 3 (combinada)

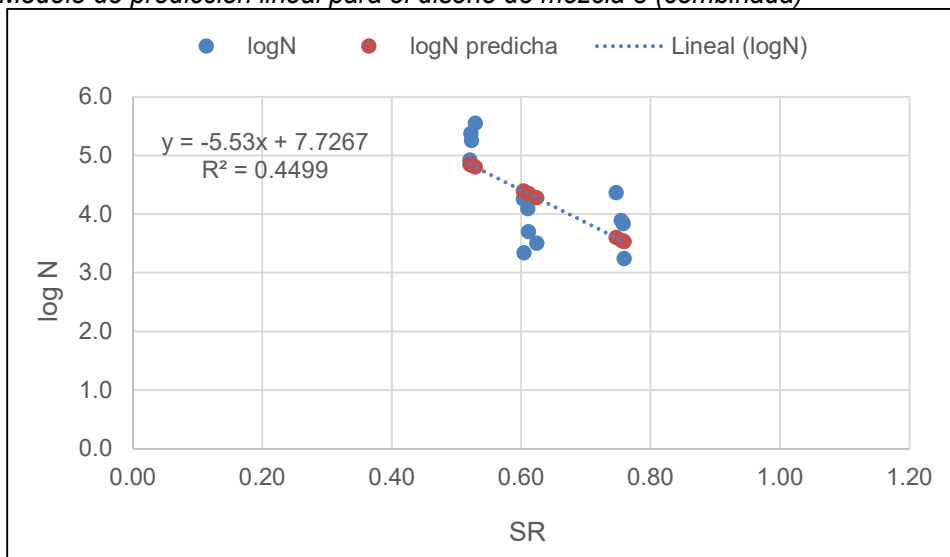


Figura 30

Modelo de predicción lineal para el diseño de mezcla 4 (Cañas - Liberia)

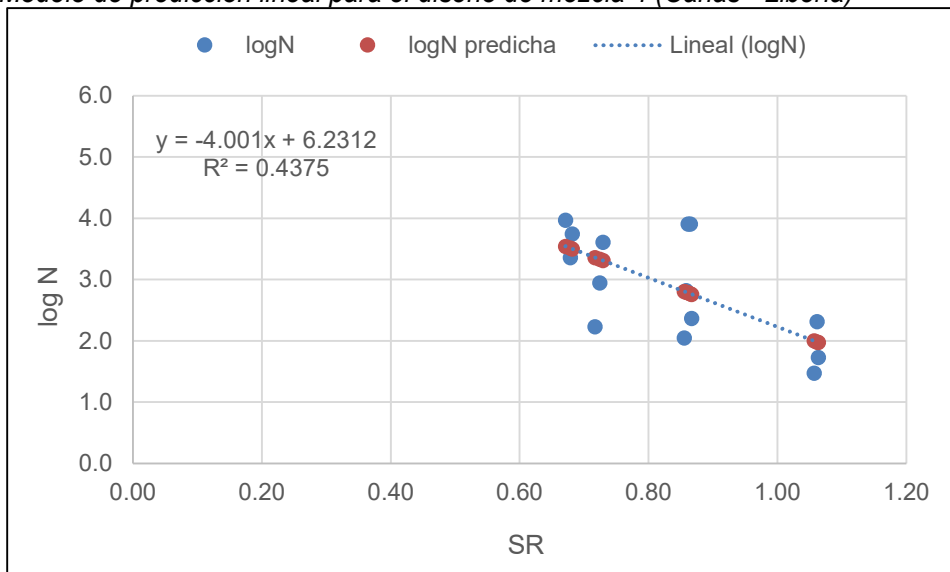
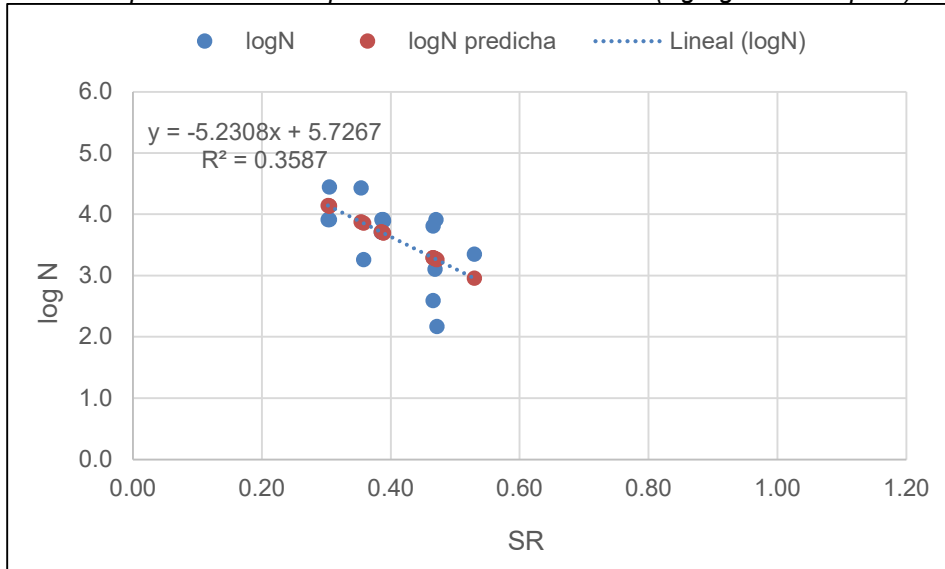




Figura 31

Modelo de predicción lineal para el diseño de mezcla 5 (Agregados Guápiles)



Los modelos obtenidos tienen la forma mostrada en la (4), (5), (6), la (7) y la (8).

$$\log N = -11,799 * SR + 9,3487 \quad (4)$$

$$\log N = -10,202 * SR + 12,137 \quad (5)$$

$$\log N = -5,530 * SR + 7,7267 \quad (6)$$

$$\log N = -4,001 * SR + 6,2312 \quad (7)$$

$$\log N = -5,231 * SR + 6,7267 \quad (8)$$

3.2.2. Modelos de predicción combinados

Se proponen dos modelos de predicción de vida al fisuramiento por fatiga utilizando los datos obtenidos, tanto de los diseños de mezcla utilizados en esta investigación, como en investigaciones previas. Estas fueron realizadas por Monge (2013) y Miranda (2016), quienes aplicaron el mismo método de ensayo y aportaron resultados de fisuramiento por fatiga de 4 diseños de mezcla (1 por Monge y 3 por Miranda).



Modelos de predicción utilizando los 5 diseños de mezcla

Para obtener una mejor predicción se decidió añadir distintas variables adicionales (tamaño máximo nominal, plasticidad, entre otras), sin embargo; solo la variable Tamaño Máximo Nominal (TMN) resultó significativa; obteniendo los resultados de predicción mostrados en la Tabla 45 y Figura 32. Este modelo se realizó con 64 líneas de datos.

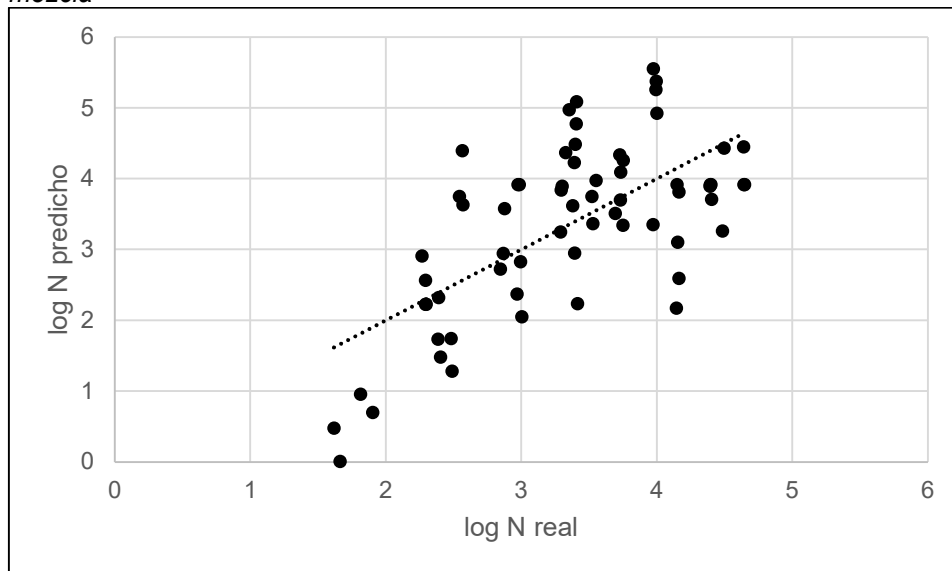
Tabla 45

Datos obtenidos para la regresión lineal del modelo combinado para los 5 diseños de mezcla

| Estadísticas de la regresión | | | | |
|------------------------------------|--------------|----------------------|-----------------|--------------|
| Coeficiente de determinación R^2 | | R^2 ajustado | | |
| 0,44 | | 0,42 | | |
| F | | Valor crítico de F | | |
| 23,84 | | 2,23E-8 | | |
| Coeficientes de la regresión | | | | |
| Variable | Coeficientes | Error típico | Estadístico t | Probabilidad |
| Intercepción | 2,84 | 0,59 | 4,78 | 0,00 |
| SR | -2,98 | 0,58 | -5,10 | 0,00 |
| TMN | 0,07 | 0,01 | 5,11 | 0,00 |

Figura 32

Gráfica de predicción, N medido versus N predicho, para el modelo combinado de los 5 diseños de mezcla



La forma del modelo se muestra en la (9).

$$\text{Log}N = -2,976 * SR + 0,071 * TMN + 2,836 \quad (9)$$



Modelo general, utilizando datos de las tesis de licenciatura de Monge (2013) y Miranda (2016)

Para diseñar el modelo general, y considerando los alcances de ambas tesis; se añaden al modelo las variables de TMN (mencionada anteriormente) y Aditivo plastificante con efecto retardador de fragua (variable binaria, donde 1 implica que se añadió aditivo a la mezcla y 0 que no cuenta con aditivo). Además, se corroboró la afectación de las fibras adicionadas en el diseño de mezcla utilizado por Monge (2013), sin embargo, la variable no fue representativa, por lo que se descartó. Finalmente, se obtiene una nube de puntos de 95 datos (Apéndice 4). Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 46 y Figura 33.

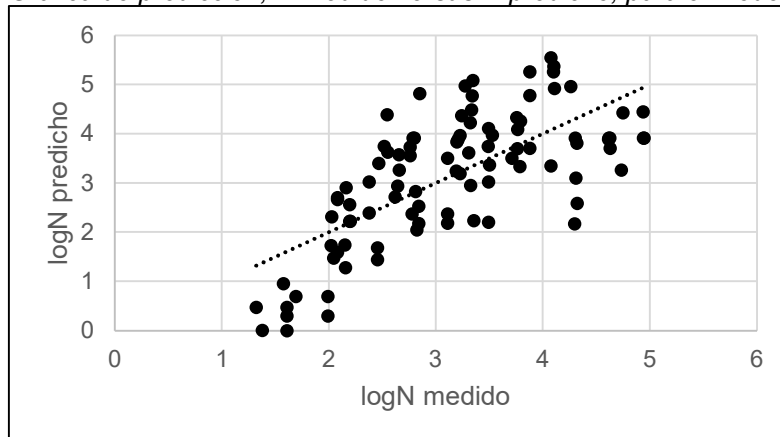
Tabla 46

Datos obtenidos para la regresión lineal del modelo general

| Estadísticas de la regresión | | | | |
|------------------------------------|--------------|----------------------|-----------------|--------------|
| Coeficiente de determinación R^2 | | R^2 ajustado | | |
| 0,49 | | 0,48 | | |
| F | | Valor crítico de F | | |
| 29,74 | | 1,72E-13 | | |
| Coeficientes de la regresión | | | | |
| Variable | Coeficientes | Error típico | Estadístico t | Probabilidad |
| Intercepción | 3,76 | 0,57 | 6,58 | 0,00 |
| SR | -3,85 | 0,55 | -7,04 | 0,00 |
| TMN | 0,08 | 0,01 | 6,56 | 0,00 |
| Aditivo | -0,65 | 0,26 | -2,56 | 0,01 |

Figura 33

Gráfica de predicción, N medido versus N predicho, para el modelo general



De la Tabla 46 se puede observar que todas las variables son significativas para un 95 % de confianza. La forma del modelo se muestra en la (10).

$$\text{Log}N = -3,84 * SR + 0,079 * TMN - 0,65 * \text{Aditivo} + 3,76 \quad (10)$$



4. Análisis de resultados

4.1. Diseños de mezcla

Con respecto a los diseños de mezcla, se puede observar en la Tabla 23 que, todas cumplen con lo estipulado en la norma CR- 2020 para ser utilizadas como superficie de ruedo de un pavimento. Estas, poseen resistencias superiores a los 35 MPa especificados, siendo la Mezcla 3 la que posee una mayor resistencia a la compresión y a la flexión.

4.2. Ensayos mecánicos

Los módulos elásticos obtenidos para cada mezcla se muestran en la Tabla 47. Los valores promedio obtenidos son similares para todas las mezclas, sin embargo; las desviaciones estándar demuestran una variabilidad importante sobre todo para las Mezclas 1 y 2.

Tabla 47

Módulo de elasticidad estático del concreto en compresión a los 28 días, para todas las mezclas

| Mezcla | Módulo de elasticidad (MPa) | Desv.Est. |
|--------|-----------------------------|-----------|
| 1 | 24933 | 2801 |
| 2 | 21433 | 2318 |
| 3 | 26900 | 600 |
| 4 | 25441 | 500 |
| 5 | 22467 | 577 |

Para poder realizar el ensayo de módulo dinámico y falla de vida a la fatiga, fue necesario fallar un espécimen a la flexión en una condición seca (sacado un día previo a la falla del cuarto húmedo). Lo anterior, debido a que se tenían que pegar las galgas necesarias sin humedad para los ensayos. Los resultados se muestran en la Tabla 29, al comparar estos valores con los resultados mostrados en la Tabla 23, se obtiene una reducción importante en la resistencia a la flexión para cada mezcla (Tabla 48). Para las Mezclas 1 y 2 la reducción fue de un 50%.

Tabla 48

Reducción en la resistencia a la flexión por falla seca

| Mezcla | % diferencia |
|--------|--------------|
| 1 | 49 |
| 2 | 38 |
| 3 | 19 |
| 4 | 11 |
| 5 | 55 |

Los resultados de módulo dinámico para cada mezcla se muestran en la Tabla 49. En general, se mantiene la tendencia para la Mezcla 4, con el valor mayor. El resultado promedio para todos los diseños es de 25 GPa. Al igual que con el módulo elástico, las desviaciones estándar para las Mezcla 2 y 4 son las más altas.



Tabla 49

Módulo dinámico a los 28 días, resultados para todas las mezclas

| Mezcla | Módulo Dinámico promedio (GPa) | Desv.Estad. |
|--------|--------------------------------|-------------|
| 1 | 22,27 | 2,11 |
| 2 | 23,54 | 4,01 |
| 3 | 25,87 | 2,28 |
| 4 | 30,65 | 2,91 |
| 5 | 19,76 | 2,06 |

Finalmente, con respecto a los ensayos de vida a la fatiga, los resultados mostraron mucha variabilidad para una misma relación de esfuerzos (SR), esto se puede deber a la cantidad de coladas necesarias para obtener al menos cinco resultados para cada SR. Al realizar cada colada, se generaba una variabilidad adicional a la propia del material (heterogéneo). Al contar únicamente con un equipo para la falla, no era posible fallar las cinco vigas un mismo día, sobre todo, para los SR menores (más ciclos de carga, más tiempo de falla). De la misma forma, para la relación de esfuerzos menor, en algunos casos fue necesario aumentar el SR inicial. Lo anterior, debido a que no era posible fallar la viga en un único día y no se extendió el ensayo más de dos días, dado que afectaba la edad promedio de falla de las otras vigas, establecida en 28 días.

4.3. Modelos de predicción de vida a la fatiga

Al existir la variabilidad mencionada en el apartado anterior, se realizó un análisis de *outliers* que permitió eliminar de la nube de puntos los datos salidos de rango para cada SR.

Para todos los casos, se utilizó una modelo de predicción lineal dependiente del SR. Los coeficientes de determinación (R^2) para los modelos individuales se muestran en la Tabla 50, la variable independiente es significativa para un 95% de confianza en todos los casos.

Tabla 50

Coefficientes de determinación lineal

| Mezcla | R^2 |
|--------|-------|
| 1 | 0,93 |
| 2 | 0,93 |
| 3 | 0,45 |
| 4 | 0,44 |
| 5 | 0,36 |

A pesar de que la Mezcla 1 y 2 mostraron las mayores desviaciones estándar en los ensayos de módulo estático y dinámico, en el ensayo de vida a la fatiga, los datos mostraron el mejor ajuste lineal. La mayor dispersión de los datos se da para las mezclas que poseen el menor y mayor valor de módulo dinámico. Además, para la mezcla 5 no fue posible conseguir SR mayores de 0.6.

Con respecto a los modelos generales, el primer modelo utiliza únicamente los datos de las cinco mezclas estudiadas. Se incluye el tamaño máximo nominal (TMN), para tratar de



capturar adecuadamente el comportamiento. Las dos variables independientes son significativas para un 95% de confianza. El coeficiente de determinación obtenido es de 0,42, lo que demuestra que existe mucha dispersión de los datos, directamente relacionado con los resultados discutidos anteriormente.

Finalmente, se presenta un modelo general que incluye datos adicionales obtenidos de dos tesis de licenciatura que aplicaron los mismos procedimientos utilizados en esta investigación. Al incluir más datos es posible mejorar el R^2 y reducir el error, sin embargo, el coeficiente de determinación aún es bajo (por debajo de 0,5). Además, fue necesario incluir una variable adicional, debido a que existían mezclas con aditivos diferentes, para ajustar la predicción de los datos.



5. Conclusiones y Recomendaciones

5.1. Conclusiones

Con respecto a la caracterización de las fuentes de agregados, se seleccionaron fuentes procedentes de distintas partes del país, y que, además; son representativas de distintos proyectos viales en construcción. Se generaron cuatro diseños de mezcla con resistencias acorde para su uso como superficie de ruedo, y se reprodujo el diseño de mezcla utilizado en el proyecto Cañas-Limonar.

Se realizaron ensayos de carga estática para validar el comportamiento del material, lo que produjo resultados favorables al cumplir con las especificaciones técnicas establecidas en el CR-2020. Posterior, se realizaron los ensayos dinámicos de módulo y el ensayo de vida a fatiga. Los resultados mostraron variabilidad para un mismo valor de carga para la falla, esto derivó en un análisis de *outliers* que permitió limpiar la base de datos para la construcción de los modelos.

Además, se obtuvieron modelos probabilísticos de desempeño de fisuramiento por fatiga, para cinco diseños distintos de mezcla de concreto y se logró generar dos modelos generales. Para cada material estudiado fue posible obtener coeficientes de correlación que rondaron entre 0,3 y 0,9. Esta variabilidad responde al comportamiento de los datos, particularmente para los últimos tres diseños de mezcla estudiados. La capacidad del laboratorio no permitió la falla de todas las vigas al mismo tiempo para la edad de 28 días, lo que implicó realizar al menos cuatro coladas distintas, incrementando la variabilidad propia del ensayo.

Finalmente, se presentaron dos modelos de predicción generales que contemplaron todos los datos obtenidos de los cinco diseños de mezcla y de dos tesis de licenciatura, lo que permitió alimentar el modelo y reducir los errores. Los resultados obtenidos, representan un primer acercamiento para la generación de un modelo general que pueda ser incluido en la guía de diseño mecánico-empírica de Costa Rica.

5.2. Recomendaciones

Se recomienda continuar alimentando los modelos generales presentados con distintos tipos de diseño de mezcla, que contemplen otras fuentes de materiales y variabilidad de aditivos, de tal forma que sea posible minimizar errores y aumentar la capacidad de predicción. Lo anterior, con la finalidad de poder obtener un modelo que permita predecir el desempeño de vida a la fatiga de las mezclas de concreto, utilizadas para construcción de pavimentos; he incorporarlo a la guía de diseño mecánica-empírica de Costa Rica.

Además, se recomienda minimizar la cantidad de coladas de concreto para vigas, de tal forma que sea posible disminuir los errores por variabilidad de la mezcla.



6. Referencias Bibliográficas

- Aghón, G., Albuquerque, F., Cortés, P. (2001). *Desarrollo económico local y descentralización en América Latina: Un análisis comparativo*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/2693/S2001704_es.pdf
- Austroads. (2012). *Preliminary Investigation of the Influence of Micro-cracking on Fatigue Life on Cemented Materials* [Investigación preliminar de la influencia de las microfisuras en el ciclo de vida de la fatiga en materiales cementados]. Sidney: Austroads Ltd.
- Boada, M., Pérez, E. (2013). *Comportamiento a la fatiga de una mezcla de concreto MR-3.5 MPa para pavimento con adición de fibras plásticas*. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.
- Coto, J. (2016). *Comparación de las estructuras de pavimento rígido y flexible por medio de un análisis de ciclo de vida, enfocado a carreteras de tránsito pesado*. (Tesis de grado para obtener el título de Licenciatura en Ingeniería en Construcción). Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Huang, Y. (2004). *Pavement Analysis Design* [Diseño de análisis de pavimento]. Kentucky, Estados Unidos: Pearson Prentice Hall.
- Ministerio de Obras Públicas y Transportes. (2017). *Anuario de información de tránsito 2017*. [Archivo PDF]. <https://www.mopt.go.cr/wps/wcm/connect/1464ac83-902a-4688-8287-1893dde634bd/AnuarioTransito2017.pdf?MOD=AJPERES>
- Ministerio de Obras Públicas y Transportes (2020). CR-2020: *Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes* [archivo en PDF]. https://www.google.com/url?sa=i&url=http%3A%2F%2Frepositorio.mopt.go.cr%3A8080%2Fxmlui%2Fhandle%2F123456789%2F3614%2Fdiscover%3Ffiltertype%3Dsubject%26filter_relational_operator%3Dequals%26filter%3DPUENTES&psig=AOvVaw24-58_L21I8kMZAe_R6ULv&ust=1680108455338000&source=images&cd=vfe&ved=0CAMQjB1qFwoTCODo1-6J__0CFQAAAAAdAAAAABAE
- Miranda, J. (2016). *Modelos de Desempeño en Pavimentos Rígidos*. (Tesis de grado para obtener el título de Licenciatura en Ingeniería Civil). Universidad de Costa Rica.
- Monge, S. (2013). *Evaluación del Comportamiento a la fatiga de una Mezcla de Concreto MR-4,5 MPa con Adición de Fibras de Polipropileno*. (Tesis de grado para obtener el título de Licenciatura en Ingeniería Civil). Universidad de Costa Rica.
- Moya, M. (2019). *Generalidades sobre pavimentos de concreto*. [Archivo PDF]. Instituto Costarricense del Concreto y del Cemento.



- Perera, A. (2015). *Determinación y análisis de los factores climáticos críticos para el diseño de pavimentos flexibles en Costa Rica*. (Tesis de grado para obtener el título de Licenciatura en Ingeniería Civil). Universidad de Costa Rica.
- Rao, S., Roesler, J. (2005). *Cumulative fatigue damage analysis of concrete pavement using accelerated pavement testing results* [Análisis del daño acumulativo de la fatiga en el pavimento de concreto utilizando los resultados de pruebas aceleradas de pavimentos]. Universidad de Illinois.
- Saldaña, D. (2013). *Estudio comparativo de la sensibilidad de la metodología de diseño estructural de pavimentos flexibles: método AASHTO 93 y ME-PDG V 1.1*. [Archivo PDF]. Universidad Católica de Chile. Recuperado de <https://repositorio.uc.cl/bitstream/handle/11534/1830/613677.pdf?1>
- Sanabria, J. Barrantes, R. Chacón, M., Elizondo, A. (2019). *Informe de evaluación de la red vial nacional pavimentada de Costa Rica, Años 2018 - 2019*. [Archivo PDF]. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica. https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/1750/ERV_N2018%20Firmado.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Solís, B. (2021). *Evaluación de las propiedades de concretos de mediana resistencia producidos con insumos disponibles en Costa Rica*. (Tesis de grado para obtener el título de Licenciatura en Ingeniería Civil). Universidad de Costa Rica.



7. Apéndices

7.1. Apéndice 1: Cálculo de diseño de mezcla sin aditivo para 1m³ de concreto

Propiedades generales de los diseños de mezcla:

Tabla A 1

Propiedades cemento hidráulico

| Cemento Uso General Holcim | |
|----------------------------|------|
| GBs | 2,81 |

Tabla A 2

Volumen de concreto

| V total (m ³) | V total (litros) |
|---------------------------|------------------|
| 1 | 1000 |

Tabla A 3

Datos generales para diseños de mezcla

| | |
|-----------------------------------|-----|
| Resistencia (kg/cm ²) | 400 |
| Revenimiento (cm) | 7,5 |
| Aire incluido | No |
| Control | SR |

7.1.1. Diseño 1 sin aditivo

a) Materiales

Tabla A 4

Propiedades de agregados diseño de mezcla 1 sin aditivo

| Agregados | Tamaño Nominal (mm) | %W al dosificar | %D | GBs | Pesos unitarios totales (kg/m ³) | |
|-----------|---------------------|-----------------|-------|-------|--|------------|
| | | | | | Sueltos | Varillados |
| Piedra | 19,00 | 0,00% | 1,90% | 2,640 | 1140 | 1570 |
| Arena | 4,75 | 0,00% | 3,40% | 2,510 | 1550 | - |
| MF | 3,21 | | | | | |

b) Diseño de mezcla



Tabla A 5

Tamaño máximo nominal diseño 1 sin aditivo

| | |
|---------------------|-----------|
| Agregado M.N | 16 |
|---------------------|-----------|

Tabla A 6

Agua de diseño y porcentaje de aire diseño 1 sin aditivo

| | |
|-----------------------|------------|
| Agua de diseño | 200 |
| % de aire | 2% |

Tabla A 7

Corrección de la resistencia de diseño 1 sin aditivo

| | |
|--------------------------------|---------------------|
| Control | Sin Registro |
| ΔF_{c28} | 400 |
| F_{cr} (kg/cm ²) | 490 |

Tabla A 8

Relación agua-cemento diseño 1 sin aditivo

| | |
|------------|------|
| A/C | 0,35 |
|------------|------|

Tabla A 9

Propiedades de los agregados diseño 1 sin aditivo

| | | | |
|---------------|------|--------------------------------------|-------|
| MF: | 3,21 | Tamaño | 19 mm |
| Piedra | | V_m (m³) | 0,579 |

Tabla A 10

Pesos y cantidades de materiales diseño 1 sin aditivo

| 1. Piedra | | | |
|----------------------|-------|-----------------------|-------|
| P.b.v.P (kg) | 1570 | VBP (m ³) | 0,344 |
| P.s.P (kg) | 909,0 | PsssP (kg) | 926,3 |
| 2. Cemento | | 3. Agua | |
| Ps (kg) | 571,4 | Pwd (kg) | 200 |
| Vs (m ³) | 0,203 | Vwd (m ³) | 0,200 |
| 4. Aire | | 5. Arena | |
| Va (m ³) | 0,200 | VBA (m ³) | 0,232 |

c) Dosificación

d)

Tabla A 11

Proporción para diseño 1 sin aditivo

| | Cemento | Arena | Piedra |
|-----------------------------|----------------|--------------|---------------|
| Proporción Corregida | 1,00 | 1,02 | 1,59 |



Tabla A 12

Dosificación para 1 m³ de diseño 1 sin aditivo

| Cemento (kg) | Arena (kg) | Piedra (kg) | Agua (kg) |
|--------------|------------|-------------|-----------|
| 571,43 | 583,11 | 909,03 | 237,10 |

7.1.2. *Diseño 2 sin aditivo*

a) Materiales

Tabla A 13

Propiedades de agregados diseño de mezcla 2 sin aditivo

| Agregados | Tamaño Nominal (mm) | %W al dosificar | %D | GBs | Pesos unitarios totales (kg/m ³) | |
|-----------|---------------------|-----------------|-------|-------|--|------------|
| | | | | | Sueltos | Varillados |
| Piedra | 38,00 | 0,00% | 1,60% | 2,650 | 1300 | 1460 |
| Arena | 4,75 | 0,00% | 3,40% | 2,510 | 1550 | - |
| MF | 3,21 | | | | | |

b) Diseño de mezcla

Tabla A 14

Tamaño máximo nominal diseño 2 sin aditivo

| Agregado M.N | 38 mm |
|--------------|-------|
|--------------|-------|

Tabla A 15

Agua de diseño y porcentaje de aire diseño 2 sin aditivo

| | |
|----------------|------|
| agua de diseño | 175 |
| % de aire | 1,0% |

Tabla A 16

Corrección de la resistencia de diseño 2 sin aditivo

| Control | Sin Registro |
|---------------------------------------|--------------|
| ΔF_{c28} | 400 |
| F _{cr} (kg/cm ²) | 490 |

Tabla A 17

Relación agua-cemento diseño 2 sin aditivo

| | |
|-----|------|
| A/C | 0,35 |
|-----|------|



Tabla A 18

Propiedades de los agregados diseño 2 sin aditivo

| | | | |
|---------------|------|----------------|-------|
| MF: | 3,21 | Tamaño | 38 |
| Piedra | | Vm (m3) | 0,669 |

Tabla A 19

Pesos y cantidades de materiales diseño 2 sin aditivo

| 1. Piedra | | | |
|--------------|-------|------------|-------|
| P.b.v.P (kg) | 1460 | VBP (m3) | 0.369 |
| P.s.P (kg) | 976,7 | PsssP (kg) | 992,4 |
| 2. Cemento | | 3. Agua | |
| Ps (kg) | 493,4 | Pwd (kg) | 175,0 |
| Vs (m3) | 0,176 | Vwd (m3) | 0,175 |
| 4. Aire | | 5. Arena | |
| Va (m3) | 0,010 | VBA (m3) | 0,271 |

c) Dosificación

Tabla A 20

Proporción para diseño 2 sin aditivo

| | Cemento | Arena | Piedra |
|-----------------------------|----------------|--------------|---------------|
| Proporción Corregida | 1,00 | 1,38 | 1,98 |

Tabla A 21

Dosificación de mezcla para diseño 2 sin aditivo

| Cemento (kg) | Arena (kg) | Piedra (kg) | Agua (kg) |
|---------------------|-------------------|--------------------|------------------|
| 493,45 | 679,75 | 976,74 | 213,74 |

7.1.3. Diseño 3 sin aditivo

a) Materiales

Tabla A 22

Propiedades de agregados diseño de mezcla 3 sin aditivo

| Agregados | Tamaño Nominal (mm) | %W al dosificar | %D | GBs | Pesos unitarios totales (kg/m3) | |
|------------------|----------------------------|------------------------|-----------|------------|--|-------------------|
| | | | | | Sueltos | Varillados |
| Piedra | 38,00 | 0,00% | 1,70% | 2,648 | 1351 | 1496 |
| Arena | 4,75 | 0,00% | 3,40% | 2,510 | 1550 | - |
| MF | 3,21 | | | | | |



b) Diseño de mezcla

Tabla A 23

Tamaño máximo nominal diseño 3 sin aditivo

| | |
|---------------------|-------|
| Agregado M.N | 38 mm |
|---------------------|-------|

Tabla A 24

Agua de diseño y porcentaje de aire diseño 3 sin aditivo

| | |
|-----------------------|------|
| agua de diseño | 175 |
| % de aire | 1,0% |

Tabla A 25

Corrección de la resistencia de diseño 3 sin aditivo

| Control | Sin Registro |
|--------------------------------|---------------------|
| ΔF_{c28} | 400 |
| F_{cr} (kg/cm ²) | 490 |

Tabla A 26

Relación agua-cemento diseño 3 sin aditivo

| | |
|------------|------|
| A/C | 0,35 |
|------------|------|

Tabla A 27

Propiedades de los agregados diseño 3 sin aditivo

| | | | |
|---------------|------|--------------------------------------|-------|
| MF: | 3,21 | Tamaño | 38 |
| Piedra | | V_m (m³) | 0,669 |

Tabla A 28

Pesos y cantidades de materiales diseño 3 sin aditivo

| 1. Piedra | | | |
|----------------------|-------|-----------------------|-------|
| P.b.v.P (kg) | 1496 | VBP (m ³) | 0,378 |
| P.s.P (kg) | 1001 | PsssP (kg) | 1018 |
| 2. Cemento | | 3. Agua | |
| Ps (kg) | 493,4 | Pwd (kg) | 175,0 |
| Vs (m ³) | 0,176 | Vwd (m ³) | 0,175 |
| 4. Aire | | 5. Arena | |
| Va (m ³) | 0,010 | VBA (m ³) | 0,261 |

c) Dosificación



Tabla A 29

Proporción para diseño 3 sin aditivo

| | Cemento | Arena | Piedra |
|-----------------------------|----------------|--------------|---------------|
| Proporción Corregida | 1,00 | 1,33 | 2,03 |

Tabla A 30

Dosificación de mezcla para diseño 3 sin aditivo

| Cemento (kg) | Arena (kg) | Piedra (kg) | Agua (kg) |
|---------------------|-------------------|--------------------|------------------|
| 493,45 | 656,22 | 1000,8 | 214,53 |



7.2. Apéndice 2: Cálculo de diseños de mezcla con aditivo (15%) para 1 m³ de concreto

7.2.1. Diseño 1 con aditivo

- a) Materiales (Ver Tabla A 4)
- b) Diseño de mezcla

Tabla A 31

Tamaño máximo nominal diseño 1 con aditivo

| | |
|---------------------|-------|
| Agregado M.N | 19 mm |
|---------------------|-------|

Tabla A 32

Agua de diseño y porcentaje de aire diseño 1 con aditivo

| | |
|-----------------------|------|
| agua de diseño | 170 |
| % de aire | 2,0% |

Tabla A 33

Corrección de la resistencia de diseño 1 con aditivo

| Control | Sin Registro |
|--------------------------------|---------------------|
| ΔF_{c28} | 400 |
| F_{cr} (kg/cm ²) | 490 |

Tabla A 34

Relación agua-cemento diseño 1 con aditivo

| | |
|------------|------|
| A/C | 0,35 |
|------------|------|

Tabla A 35

Propiedades de los agregados diseño 1 con aditivo

| | | | |
|---------------|------|----------------|-------|
| Mf: | 3,21 | Tamaño | 19 |
| Piedra | | Vm (m3) | 0,579 |

Tabla A 36

Pesos y cantidades de materiales diseño 1 con aditivo

| 1. Piedra | | | |
|-------------------|-------|-----------------|-------|
| P.b.v.P (kg) | 1570 | VBP (m3) | 0,344 |
| P.s.P (kg) | 909,0 | PsssP (kg) | 926,3 |
| 2. Cemento | | 3. Agua | |
| Ps (kg) | 485,7 | Pwd (kg) | 170,0 |
| Vs (m3) | 0,173 | Vwd (m3) | 0,170 |
| 4. Aire | | 5. Arena | |
| Va (m3) | 0,020 | VBA (m3) | 0,293 |



c) Dosificación

Tabla A 37

Proporción para diseño 1 con aditivo

| | Cemento | Arena | Piedra |
|-----------------------------|----------------|--------------|---------------|
| Proporción Corregida | 1,00 | 1,51 | 1,87 |

Tabla A 38

Dosificación de mezcla para diseño 1 con aditivo

| Cemento (kg) | Arena (kg) | Piedra (kg) | Agua (kg) |
|---------------------|-------------------|--------------------|------------------|
| 485,71 | 734,97 | 909,03 | 212,26 |

7.2.2. *Diseño 2 con aditivo*

- a) Materiales (Ver Tabla A 13)
- b) Diseño de mezcla

Tabla A 39

Tamaño máximo nominal diseño 2 con aditivo

| | |
|---------------------|-------|
| Agregado M.N | 38 mm |
|---------------------|-------|

Tabla A 40

Agua de diseño y porcentaje de aire diseño 2 con aditivo

| | |
|-----------------------|--------|
| agua de diseño | 148,75 |
| % de aire | 1,0% |

Tabla A 41

Corrección de la resistencia de diseño 2 con aditivo

| Control | Sin Registro |
|--------------------------------|---------------------|
| ΔF_{c28} | 400 |
| F_{cr} (kg/cm ²) | 490 |

Tabla A 42

Relación agua-cemento diseño 2 con aditivo

| | |
|------------|------|
| A/C | 0,35 |
|------------|------|

Tabla A 43

Propiedades de los agregados diseño 2 con aditivo

| | | | |
|---------------|------|--------------------------------------|-------|
| MF: | 3,21 | Tamaño | 38 |
| Piedra | | V_m (m³) | 0,669 |



Tabla A 44

Pesos y cantidades de materiales diseño 2 con aditivo

| 1. Piedra | | | |
|--------------|-------|------------|-------|
| P.b.v.P (kg) | 1460 | VBP (m3) | 0,369 |
| P.s.P (kg) | 976,7 | PsssP (kg) | 992,4 |
| 2. Cemento | | 3. Agua | |
| Ps (kg) | 419,4 | Pwd (kg) | 148,7 |
| Vs (m3) | 0,149 | Vwd (m3) | 0,148 |
| 4. Aire | | 5. Arena | |
| Va (m3) | 0,010 | VBA (m3) | 0,323 |

c) Dosificación

Tabla A 45

Proporción para diseño 2 con aditivo

| | Cemento | Arena | Piedra |
|----------------------|---------|-------|--------|
| Proporción Corregida | 1,00 | 1,94 | 2,33 |

Tabla A 46

Dosificación de mezcla para diseño 2 con aditivo

| Cemento (kg) | Arena (kg) | Piedra (kg) | Agua (kg) |
|--------------|------------|-------------|-----------|
| 419,43 | 811,75 | 976,74 | 191,98 |

7.2.3. Diseño 3 con aditivo

a) Materiales (Ver Tabla A 22)

Tabla A 47

Granulometría de la combinación de tres agregados del diseño de mezcla 3

| Malla No. | Abertura (mm) | Porcentaje pasando (%) | | | Combinación 60-25-15 |
|-----------|---------------|------------------------|-------|-------|-------------------------|
| | | 38 mm | 25 mm | 9 mm | |
| 1 1/2" | 37,50 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| 1" | 25,00 | 64,0 | 100,0 | 100,0 | 78,4 |
| 3/4" | 19,00 | 30,4 | 85,6 | 100,0 | 54,6 |
| 1/2" | 12,50 | 5,3 | 17,0 | 100,0 | 22,4 |
| 3/8" | 9,50 | 1,0 | 2,0 | 100,0 | 16,1 |
| Nº 4 | 4,75 | 0,7 | 0,8 | 10,0 | 2,1 |
| Nº 8 | 2,36 | 0,7 | 0,8 | 1,9 | 0,9 |
| Nº 16 | 1,18 | 0,7 | 0,8 | 1,8 | 0,9 |
| Nº 30 | 0,60 | 0,6 | 0,8 | 1,5 | 0,8 |
| Nº 50 | 0,30 | 0,6 | 0,7 | 1,4 | 0,7 |
| Nº 100 | 0,15 | 0,5 | 0,6 | 1,3 | 0,6 |
| Nº 200 | 0,08 | 0,4 | 0,5 | 1,0 | 0,5 |



b) Diseño de mezcla

Tabla A 48

Tamaño máximo nominal diseño 3 con aditivo

| | |
|---------------------|-------|
| Agregado M.N | 38 mm |
|---------------------|-------|

Tabla A 49

Agua de diseño y porcentaje de aire diseño 3 con aditivo

| | |
|-----------------------|-------|
| agua de diseño | 148,7 |
| % de aire | 1,0% |

Tabla A 50

Corrección de la resistencia de diseño 3 con aditivo

| | |
|--------------------------------|---------------------|
| Control | Sin Registro |
| ΔF_{c28} | 400 |
| F_{cr} (kg/cm ²) | 490 |

Tabla A 51

Relación agua-cemento diseño 3 con aditivo

| | |
|------------|------|
| A/C | 0,35 |
|------------|------|

Tabla A 52

Propiedades de los agregados diseño 3 con aditivo

| | | | |
|---------------|------|--------------------------------------|-------|
| MF: | 3,21 | Tamaño | 38 |
| Piedra | | V_m (m³) | 0,669 |

Tabla A 53

Pesos y cantidades de materiales diseño 3 con aditivo

| 1. Piedra | | | |
|----------------------|-------|-----------------------|-------|
| P.b.v.P (kg) | 1496 | VBP (m ³) | 0,378 |
| P.s.P (kg) | 1001 | PsssP (kg) | 1018 |
| 2. Cemento | | 3. Agua | |
| Ps (kg) | 419,4 | Pwd (kg) | 148,7 |
| Vs (m ³) | 0,149 | Vwd (m ³) | 0,149 |
| 4. Aire | | 5. Arena | |
| Va (m ³) | 0,010 | VBA (m ³) | 0,314 |

c) Dosificación



Tabla A 54

Proporción para diseño 3 con aditivo

| | Cemento | Arena | Piedra |
|----------------------|---------|-------|--------|
| Proporción Corregida | 1,00 | 1,88 | 2,39 |

Tabla A 55

Dosificación de mezcla para diseño 3 con aditivo

| Cemento (kg) | Arena (kg) | Piedra (kg) | Agua (kg) |
|--------------|------------|-------------|-----------|
| 461,37 | 709,40 | 900,74 | 192,76 |

7.2.4. Diseño 4

a) Materiales

Tabla A 56

Granulometría de la réplica de la mezcla del proyecto Cañas-Limonal

| Malla No. | Abertura (mm) | Porcentaje pasando (%) | | | | Combinación |
|-----------|---------------|------------------------|-------------------------|----------------------------------|---------------------------|-------------|
| | | Cuarta Abangares | Quinta Rey de la Tierra | Polvo de piedra Rey de la Tierra | Polvo de piedra San Buena | |
| 1 1/2" | 37,50 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| 1" | 25,00 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| 3/4" | 19,00 | 55,2 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 83,6 |
| 1/2" | 12,50 | 5,3 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 65,3 |
| 3/8" | 9,50 | 2,1 | 79,7 | 100,0 | 1000 | 59,9 |
| Nº 4 | 4,75 | 1,6 | 10,1 | 95,1 | 97,6 | 43,7 |
| Nº 8 | 2,36 | 1,6 | 4,8 | 61,5 | 69,4 | 29,2 |
| Nº 16 | 1,18 | 1,5 | 3,3 | 42,6 | 45,5 | 19,9 |
| Nº 30 | 0,60 | 1,3 | 2,7 | 30,4 | 30,5 | 14,0 |
| Nº 50 | 0,30 | 1,2 | 2,4 | 22,3 | 21,8 | 10,4 |
| Nº 100 | 0,15 | 1,1 | 2,1 | 16,0 | 16,5 | 7,8 |
| Nº 200 | 0,08 | 0,9 | 1,8 | 11,7 | 13,6 | 6,0 |

Tabla A 57

Propiedades de agregados diseño de mezcla 4

| Agregados | Tamaño Nominal (mm) | %W al dosificar | %D | GBs | Pesos unitarios (kg/m3) | |
|-------------------------|---------------------|-----------------|-------|-------|-------------------------|------------|
| | | | | | Sueltos | Varillados |
| Piedra Abangares | 25,00 | 0,00% | 1,30% | 2,670 | 1470 | 1590 |
| Piedra Rey de la Tierra | 12,50 | 0,00% | 1,80% | 2,650 | 1410 | 1510 |
| Arena Rey de la Tierra | 9,50 | 0,00% | 3,90% | 2,500 | - | - |
| Arena San Buena | 9,50 | 0,00% | 3,20% | 2,490 | - | - |



b) Diseño de mezcla

Tabla A 58

Tamaño máximo nominal diseño 4

| | |
|---------------------|-------|
| Agregado M.N | 25 mm |
|---------------------|-------|

Tabla A 59

Agua de diseño y porcentaje de aire diseño 4

| | |
|-----------------------|-------|
| agua de diseño | 189,0 |
| % de aire | 1,5% |

Tabla A 60

Corrección de la resistencia de diseño 4

| Control | Con Registro |
|--------------------------------|---------------------|
| ΔF_{c28} | 352 |
| F_{cr} (kg/cm ²) | 392 |

Tabla A 61

Relación agua-cemento diseño 4

| | |
|------------|------|
| A/C | 0,44 |
|------------|------|

Tabla A 62

Pesos y cantidades de materiales diseño 4

| 1. Piedra | | | |
|---|-------|---|-------|
| P.s.P. Abangares (kg) | 587,9 | P.s.P. Rey de la Tierra (kg) | 320,4 |
| V.s.P. Abangares (m ³) | 0,220 | V.s.P. Rey de la Tierra (m ³) | 0,121 |
| 2. Cemento | | 3. Agua | |
| Ps (kg) | 431,3 | Pwd (kg) | 230,3 |
| Vs (m ³) | 0,146 | Vwd (m ³) | 0,230 |
| 4. Arena | | | |
| P.s.A. Rey de la Tierra (kg) | 460,6 | P.s.A. San Buena (kg) | 311,6 |
| V.s.A. Rey de la Tierra (m ³) | 0,184 | V.s.A. San Buena (m ³) | 0,125 |
| 5. Aire | | | |
| Va (m ³) | 0,010 | | |

c) Dosificación



Tabla A 63

Proporción en masa para diseño 4

| | Cemento | Arena | Piedra |
|----------------------|---------|-------|--------|
| Proporción Corregida | 1,00 | 1,79 | 2,11 |

Tabla A 64

Dosificación de mezcla para diseño 4

| Cemento (kg) | Piedra Abangares (kg) | Piedra Rey de la Tierra (kg) | Arena Rey de la Tierra (kg) | Arena San Buena (kg) | Agua (kg) |
|--------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------------|----------------------|-----------|
| 431,31 | 587,94 | 320,42 | 460,56 | 311,59 | 230,34 |

7.2.5. Diseño 5

a) Materiales

Tabla A 65

Granulometría del diseño de mezcla 5

| Malla | No. | Abertura (mm) | Porcentaje pasando (%) | | | | Combinación |
|--------|-----|---------------|------------------------|--------------|----------------|-------|-------------|
| | | | Piedra 38 mm | Piedra 19 mm | Piedra 12,5 mm | Arena | |
| 1 1/2" | | 38,00 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| 1" | | 25,00 | 78,9 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 97,9 |
| 3/4" | | 19,00 | 52,7 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 95,3 |
| 1/2" | | 12,50 | 16,1 | 100,0 | 28,4 | 100,0 | 77,3 |
| 3/8" | | 9,50 | 2,7 | 88,2 | 3,3 | 100,0 | 68,0 |
| N° 4 | | 4,75 | 1,7 | 2,8 | 1,5 | 98,2 | 45,4 |
| N° 8 | | 2,36 | 1,5 | 1,2 | 1,4 | 77,2 | 35,5 |
| N° 10 | | 2,00 | 1,5 | 1,2 | 1,3 | 71,3 | 32,8 |
| N° 16 | | 1,18 | 1,4 | 1,1 | 1,2 | 54,1 | 25,0 |
| N° 20 | | 0,85 | 1,4 | 1,0 | 1,2 | 43,1 | 20,0 |
| N° 30 | | 0,60 | 1,3 | 1,0 | 1,1 | 32,9 | 15,4 |
| N° 40 | | 0,43 | 1,3 | 1,0 | 1,1 | 23,7 | 11,3 |
| N° 50 | | 0,30 | 1,2 | 0,9 | 1,0 | 15,4 | 7,5 |
| N° 60 | | 0,25 | 1,2 | 0,9 | 0,9 | 12,0 | 5,9 |
| N° 100 | | 0,15 | 1,1 | 0,8 | 0,8 | 6,1 | 3,2 |

Tabla A 66

Propiedades de agregados diseño de mezcla 5

| Agregados | Tamaño Nominal (mm) | %W al dosificar | %D | GBs | Pesos unitarios (kg/m3) | |
|----------------|---------------------|-----------------|-------|-------|-------------------------|------------|
| | | | | | Sueltos | Varillados |
| Piedra 38 mm | 38,00 | 0,00% | 1,70% | 2,640 | | |
| Piedra 19 mm | 19,00 | 0,00% | 1,50% | 2,690 | | |
| Piedra 12,5 mm | 12,50 | 0,00% | 1,70% | 2,680 | 1440 | 1550 |
| Arena | 9,50 | 0,00% | 4,10% | 2,470 | - | - |



b) Diseño de mezcla

Tabla A 67

Tamaño máximo nominal diseño 5

| | |
|---------------------|-------|
| Agregado M.N | 38 mm |
|---------------------|-------|

Tabla A 68

Agua de diseño y porcentaje de aire diseño 5

| | |
|-----------------------|-------|
| agua de diseño | 175,0 |
| % de aire | 1,0% |

Tabla A 69

Corrección de la resistencia de diseño 5

| Control | Con Registro |
|---------------------------------------|---------------------|
| ΔF_{c28} | 346 |
| F _{cr} (kg/cm ²) | 396 |

Tabla A 70

Relación agua-cemento diseño 5

| | |
|------------|------|
| A/C | 0,43 |
|------------|------|

Tabla A 71

Pesos y cantidades de materiales diseño 5

| 1. Piedra | | | |
|----------------------------------|-------|--------------------------------|-------|
| P.s.P. 38 mm (kg) | 175,3 | P.s.P. 19 mm (kg) | 349,6 |
| V.s.P. 38 mm (m ³) | 0,066 | V.s.P. 19 mm (m ³) | 0,130 |
| P.s.P. 12,5 mm (kg) | 437,7 | | |
| V.s.P. 12,5 mm (m ³) | 0,163 | | |
| 2. Cemento | | 3. Agua | |
| Ps (kg) | 404,1 | Pwd (kg) | 223,0 |
| Vs (m ³) | 0,137 | Vwd (m ³) | 0,223 |
| 4. Arena | | | |
| P.s.A. Arena (kg) | 460,6 | | |
| V.s.A. Arena (m ³) | 0,184 | | |
| 5. Aire | | | |
| Va (m ³) | 0,010 | | |

c) Dosificación



Tabla A 72

Proporción en masa para diseño 5

| | Cemento | Arena | Piedra |
|----------------------|---------|-------|--------|
| Proporción Corregida | 1,00 | 1,95 | 2,38 |

Tabla A 73

Dosificación de mezcla para diseño 5

| Cemento (kg) | Piedra 38 mm (kg) | Piedra 19 mm (kg) | Piedra 12,5 mm (kg) | Arena (kg) | Agua (kg) |
|--------------|-------------------|-------------------|---------------------|------------|-----------|
| 404,06 | 175,34 | 349,62 | 437,73 | 788,93 | 223,01 |



7.3. Apéndice 3: Granulometrías de los materiales

Tabla A 74

Granulometría de la arena de río

| Masa inicial: | 1713,4 g | Masa final: | 1677,1 g | MF: | 3,21 |
|---------------|---------------|-------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|
| Malla No. | Abertura (mm) | Masa retenida (g) | Porcentaje Retenido (%) | Retenido acumulado (%) | Porcentaje Pasando (%) |
| 3/8" | 9,50 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 100,0 |
| Nº 4 | 4,75 | 25,7 | 1,5 | 1,5 | 98,5 |
| Nº 8 | 2,36 | 325,4 | 19,2 | 20,7 | 79,3 |
| Nº 16 | 1,18 | 422,9 | 24,9 | 45,6 | 54,4 |
| Nº 30 | 0,60 | 417,7 | 24,6 | 70,2 | 29,8 |
| Nº 50 | 0,30 | 280,6 | 16,5 | 86,7 | 13,3 |
| Nº 100 | 0,15 | 157,4 | 9,3 | 96,0 | 4,0 |
| Nº 200 | 0,08 | 58,7 | 3,5 | 99,4 | 0,6 |

Nota. Adaptado de Solís (2021).

Tabla A 75

Granulometría del agregado M-0953-2020

| Masa inicial: | 2678,4 g | Masa final: | 2652,3 g | MF: | 5,82 |
|---------------|---------------|-------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|
| Malla No. | Abertura (mm) | Masa retenida (g) | Porcentaje retenido (%) | Retenido acumulado (%) | Porcentaje pasando (%) |
| 3/8" | 9,50 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 100,0 |
| Nº 4 | 4,75 | 2411,8 | 90,0 | 90,0 | 10,0 |
| Nº 8 | 2,36 | 216,5 | 8,1 | 98,1 | 1,9 |
| Nº 16 | 1,18 | 2,9 | 0,1 | 98,2 | 1,8 |
| Nº 30 | 0,60 | 7,5 | 0,3 | 98,5 | 1,5 |
| Nº 50 | 0,30 | 1,9 | 0,1 | 98,6 | 1,4 |
| Nº 100 | 0,15 | 3,6 | 0,1 | 98,7 | 1,3 |
| Nº 200 | 0,08 | 6,7 | 0,3 | 99,0 | 1,0 |

Tabla A 76

Granulometría del agregado M-0954-2020

| Masa inicial: | 3249,3 | Masa final: | 3236,4 | MF: | 6,31 |
|---------------|---------------|-------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|
| Malla No. | Abertura (mm) | Masa retenida (g) | Porcentaje retenido (%) | Retenido acumulado (%) | Porcentaje pasando (%) |
| 1" | 25,00 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 100,0 |
| 3/4" | 19,00 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 100,0 |
| 1/2" | 12,50 | 203,0 | 6,2 | 6,2 | 93,8 |
| 3/8" | 9,50 | 977,9 | 30,1 | 36,3 | 63,7 |
| Nº 4 | 4,75 | 1993,7 | 61,4 | 97,7 | 2,3 |
| Nº 8 | 2,36 | 50,0 | 1,5 | 99,2 | 0,8 |
| Nº 16 | 1,18 | 2,0 | 0,1 | 99,3 | 0,7 |
| Nº 30 | 0,60 | 1,7 | 0,1 | 99,4 | 0,6 |
| Nº 50 | 0,30 | 1,7 | 0,1 | 99,4 | 0,6 |
| Nº 100 | 0,15 | 2,4 | 0,1 | 99,5 | 0,5 |
| Nº 200 | 0,08 | 2,6 | 0,1 | 99,6 | 0,4 |



Tabla A 77

Granulometría del agregado M-0955-2020

| Masa inicial: | 7067,6 | Masa final: | 7034,1 | MF: | 7,08 |
|---------------|---------------|-------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|
| Malla No, | Abertura (mm) | Masa retenida (g) | Porcentaje retenido (%) | Retenido acumulado (%) | Porcentaje pasando (%) |
| 1" | 25,00 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 100 |
| 3/4" | 19,00 | 1017,3 | 14,4 | 14,4 | 85,6 |
| 1/2" | 12,50 | 4848,8 | 68,6 | 83,0 | 17,0 |
| 3/8" | 9,50 | 1056,7 | 15,0 | 98,0 | 2,0 |
| Nº 4 | 4,75 | 85,8 | 1,2 | 99,2 | 0,8 |
| Nº 8 | 2,36 | 0,7 | 0,0 | 99,2 | 0,8 |
| Nº 16 | 1,18 | 1,4 | 0,0 | 99,2 | 0,8 |
| Nº 30 | 0,60 | 2,8 | 0,0 | 99,2 | 0,8 |
| Nº 50 | 0,30 | 3,6 | 0,1 | 99,3 | 0,7 |
| Nº 100 | 0,15 | 5,0 | 0,1 | 99,4 | 0,6 |
| Nº 200 | 0,08 | 7,7 | 0,1 | 99,5 | 0,5 |

Tabla A 78

Granulometría del agregado M-0956-2020

| Masa inicial: | 15429,3 | Masa final: | 15369,3 | MF: | 7,65 |
|---------------|---------------|-------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|
| Malla No, | Abertura (mm) | Masa retenida (g) | Porcentaje retenido (%) | Retenido acumulado (%) | Porcentaje pasando (%) |
| 1 1/2" | 37,50 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 100,0 |
| 1" | 25,00 | 5547,2 | 36,0 | 36,0 | 64,0 |
| 3/4" | 19,00 | 5192,8 | 33,7 | 69,6 | 30,4 |
| 1/2" | 12,50 | 3871,0 | 25,1 | 94,7 | 5,3 |
| 3/8" | 9,50 | 662,9 | 4,3 | 99,0 | 1,0 |
| Nº 4 | 4,75 | 47,4 | 0,3 | 99,3 | 0,7 |
| Nº 8 | 2,36 | 5,3 | 0,0 | 99,3 | 0,7 |
| Nº 16 | 1,18 | 2,1 | 0,0 | 99,3 | 0,7 |
| Nº 30 | 0,60 | 3,1 | 0,0 | 99,4 | 0,6 |
| Nº 50 | 0,30 | 5,3 | 0,0 | 99,4 | 0,6 |
| Nº 100 | 0,15 | 9,6 | 0,1 | 99,5 | 0,5 |
| Nº 200 | 0,08 | 14,1 | 0,1 | 99,6 | 0,4 |



Tabla A 79

Granulometría del agregado M-2000-2022

| Masa inicial: | 7242,6 | Masa final: | 7179,4 | MF: | 7,344 |
|---------------|---------------|-------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|
| Malla No. | Abertura (mm) | Masa retenida (g) | Porcentaje Retenido (%) | Retenido acumulado (%) | Porcentaje Pasando (%) |
| 1" | 25,00 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 100,0 |
| 3/4" | 19,00 | 3243,6 | 44,8 | 44,8 | 55,2 |
| 1/2" | 12,50 | 3613,7 | 49,9 | 94,7 | 5,3 |
| 3/8" | 9,50 | 236,8 | 3,3 | 97,9 | 2,1 |
| Nº 4 | 4,75 | 29,6 | 0,4 | 98,4 | 1,6 |
| Nº 8 | 2,36 | 4,3 | 0,1 | 98,4 | 1,6 |
| Nº 10 | 2,00 | 2,0 | 0,0 | 98,4 | 1,6 |
| Nº 16 | 1,18 | 7,4 | 0,1 | 98,5 | 1,5 |
| Nº 20 | 0,85 | 4,5 | 0,1 | 98,6 | 1,4 |
| Nº 30 | 0,60 | 4,4 | 0,1 | 98,7 | 1,3 |
| Nº 40 | 0,43 | 4,0 | 0,1 | 98,7 | 1,3 |
| Nº 50 | 0,30 | 4,5 | 0,1 | 98,8 | 1,2 |
| Nº 60 | 0,25 | 2,7 | 0,0 | 98,8 | 1,2 |
| Nº 100 | 0,15 | 7,6 | 0,1 | 98,9 | 1,1 |
| Nº 200 | 0,08 | 13,5 | 0,2 | 99,1 | 0,9 |

Tabla A 80

Granulometría del agregado M-2001-2022

| Masa inicial: | 3027,5 | Masa final: | 2971,8 | MF: | 5,949 |
|---------------|---------------|-------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|
| Malla No. | Abertura (mm) | Masa retenida (g) | Porcentaje Retenido (%) | Retenido acumulado (%) | Porcentaje Pasando (%) |
| 1/2" | 12,50 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 100,0 |
| 3/8" | 9,50 | 614,0 | 20,3 | 20,3 | 79,7 |
| Nº 4 | 4,75 | 2106,5 | 69,6 | 89,9 | 10,1 |
| Nº 8 | 2,36 | 163,1 | 5,4 | 95,2 | 4,8 |
| Nº 10 | 2,00 | 16,2 | 0,5 | 95,8 | 4,2 |
| Nº 16 | 1,18 | 28,1 | 0,9 | 96,7 | 3,3 |
| Nº 20 | 0,85 | 10,9 | 0,4 | 97,1 | 2,9 |
| Nº 30 | 0,60 | 7,6 | 0,3 | 97,3 | 2,7 |
| Nº 40 | 0,43 | 5,3 | 0,2 | 97,5 | 2,5 |
| Nº 50 | 0,30 | 4,1 | 0,1 | 97,6 | 2,4 |
| Nº 60 | 0,25 | 2,1 | 0,1 | 97,7 | 2,3 |
| Nº 100 | 0,15 | 5,4 | 0,2 | 97,9 | 2,1 |
| Nº 200 | 0,08 | 8,2 | 0,3 | 98,2 | 1,8 |



Tabla A 81

Granulometría del agregado M-2002-2022

| Masa inicial: | 1291,6 | Masa final: | 1146,4 | MF: | 3,321 |
|---------------|---------------|-------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|
| Malla No. | Abertura (mm) | Masa retenida (g) | Porcentaje Retenido (%) | Retenido acumulado (%) | Porcentaje Pasando (%) |
| 3/8" | 9,50 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 100,0 |
| Nº 4 | 4,75 | 63,3 | 4,9 | 4,9 | 95,1 |
| Nº 8 | 2,36 | 434,2 | 33,6 | 38,5 | 61,5 |
| Nº 10 | 2,00 | 70,6 | 5,5 | 44,0 | 56,0 |
| Nº 16 | 1,18 | 173,5 | 13,4 | 57,4 | 42,6 |
| Nº 20 | 0,85 | 86,5 | 6,7 | 64,1 | 35,9 |
| Nº 30 | 0,60 | 70,5 | 5,5 | 69,6 | 30,4 |
| Nº 40 | 0,43 | 54,4 | 4,2 | 73,8 | 26,2 |
| Nº 50 | 0,30 | 50,5 | 3,9 | 77,7 | 22,3 |
| Nº 60 | 0,25 | 22,5 | 1,7 | 79,4 | 20,6 |
| Nº 100 | 0,15 | 59,3 | 4,6 | 84,0 | 16,0 |
| Nº 200 | 0,075 | 54,8 | 4,2 | 88,3 | 11,7 |

Tabla A 82

Granulometría del agregado M-2003-2022

| Masa inicial: | 1725,7 | Masa final: | 1495,9 | MF: | 3,187 |
|---------------|---------------|-------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|
| Malla No. | Abertura (mm) | Masa retenida (g) | Porcentaje Retenido (%) | Retenido acumulado (%) | Porcentaje Pasando (%) |
| 3/8" | 9,50 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 100,0 |
| Nº 4 | 4,75 | 41,4 | 2,4 | 2,4 | 97,6 |
| Nº 8 | 2,36 | 486 | 28,2 | 30,6 | 69,4 |
| Nº 10 | 2,00 | 116,5 | 6,8 | 37,3 | 62,7 |
| Nº 16 | 1,18 | 297,3 | 17,2 | 54,5 | 45,5 |
| Nº 20 | 0,85 | 146,1 | 8,5 | 63,0 | 37,0 |
| Nº 30 | 0,60 | 112,0 | 6,5 | 69,5 | 30,5 |
| Nº 40 | 0,43 | 81,6 | 4,7 | 74,2 | 25,8 |
| Nº 50 | 0,30 | 68,2 | 4,0 | 78,2 | 21,8 |
| Nº 60 | 0,25 | 27,7 | 1,6 | 79,8 | 20,2 |
| Nº 100 | 0,15 | 64,4 | 3,7 | 83,5 | 16,5 |
| Nº 200 | 0,08 | 50,1 | 2,9 | 86,4 | 13,6 |



Tabla A 83

Granulometría del agregado M-1407-2023

| Masa inicial: | 10752,7 | Masa final: | 10669,4 | MF: | 7,364 |
|---------------|---------------|-------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|
| Malla No. | Abertura (mm) | Masa retenida (g) | Porcentaje Retenido (%) | Retenido acumulado (%) | Porcentaje Pasando (%) |
| 1 1/2" | 37,50 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 100,0 |
| 1" | 25,00 | 2268,1 | 21,1 | 21,1 | 78,9 |
| 3/4" | 19,00 | 2816,6 | 26,2 | 47,3 | 52,7 |
| 1/2" | 12,50 | 3932,0 | 36,6 | 83,9 | 16,1 |
| 3/8" | 9,50 | 1448,6 | 13,5 | 97,3 | 2,7 |
| Nº 4 | 4,75 | 109,8 | 1,0 | 98,3 | 1,7 |
| Nº 8 | 2,36 | 13,1 | 0,1 | 98,5 | 1,5 |
| Nº 10 | 2,00 | 2,5 | 0,0 | 98,5 | 1,5 |
| Nº 16 | 1,18 | 6,3 | 0,1 | 98,6 | 1,4 |
| Nº 20 | 0,85 | 6,0 | 0,1 | 98,6 | 1,4 |
| Nº 30 | 0,60 | 5,1 | 0,0 | 98,7 | 1,3 |
| Nº 40 | 0,43 | 5,0 | 0,0 | 98,7 | 1,3 |
| Nº 50 | 0,30 | 6,7 | 0,1 | 98,8 | 1,2 |
| Nº 60 | 0,25 | 3,7 | 0,0 | 98,8 | 1,2 |
| Nº100 | 0,15 | 12,7 | 0,1 | 98,9 | 1,1 |
| Nº200 | 0,08 | 25,1 | 0,2 | 99,1 | 0,9 |

Tabla A 84

Granulometría del agregado M-1408-2023

| Masa inicial: | 4601,0 | Masa final: | 4571,4 | MF: | 6,897 |
|---------------|---------------|-------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|
| Malla No. | Abertura (mm) | Masa retenida (g) | Porcentaje Retenido (%) | Retenido acumulado (%) | Porcentaje Pasando (%) |
| 3/4" | 19,00 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 100,0 |
| 1/2" | 12,50 | 3292,3 | 71,6 | 71,6 | 28,4 |
| 3/8" | 9,50 | 1157,2 | 25,2 | 96,7 | 3,3 |
| Nº 4 | 4,75 | 82,4 | 1,8 | 98,5 | 1,5 |
| Nº 8 | 2,36 | 6,4 | 0,1 | 98,6 | 1,4 |
| Nº 10 | 2,00 | 1,6 | 0,0 | 98,7 | 1,3 |
| Nº 16 | 1,18 | 4,4 | 0,1 | 98,8 | 1,2 |
| Nº 20 | 0,85 | 2,8 | 0,1 | 98,8 | 1,2 |
| Nº 30 | 0,60 | 2,9 | 0,1 | 98,9 | 1,1 |
| Nº 40 | 0,43 | 2,6 | 0,1 | 98,9 | 1,1 |
| Nº 50 | 0,30 | 3,2 | 0,1 | 99,0 | 1,0 |
| Nº 60 | 0,25 | 1,6 | 0,0 | 99,1 | 0,9 |
| Nº100 | 0,15 | 5,0 | 0,1 | 99,2 | 0,8 |
| Nº200 | 0,08 | 7,2 | 0,2 | 99,3 | 0,7 |



Tabla A 85

Granulometría del agregado M-1922-2023

| Masa inicial: | 2289,0 | Masa final: | 2273,2 | MF: | 6,04 |
|---------------|---------------|-------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|
| Malla No. | Abertura (mm) | Masa retenida (g) | Porcentaje Retenido (%) | Retenido acumulado (%) | Porcentaje Pasando (%) |
| 1/2" | 12,50 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 100,0 |
| 3/8" | 9,50 | 269,4 | 11,8 | 11,8 | 88,2 |
| Nº4 | 4,75 | 1956,6 | 85,5 | 97,2 | 2,8 |
| Nº8 | 2,36 | 34,9 | 1,5 | 98,8 | 1,2 |
| Nº10 | 2,00 | 1,1 | 0,0 | 98,8 | 1,2 |
| Nº16 | 1,18 | 2,6 | 0,1 | 98,9 | 1,1 |
| Nº20 | 0,85 | 1,0 | 0,0 | 99,0 | 1,0 |
| Nº30 | 0,60 | 0,7 | 0,0 | 99,0 | 1,0 |
| Nº40 | 0,43 | 0,6 | 0,0 | 99,0 | 1,0 |
| Nº50 | 0,30 | 1,1 | 0,0 | 99,1 | 0,9 |
| Nº60 | 0,25 | 0,4 | 0,0 | 99,1 | 0,9 |
| Nº100 | 0,15 | 1,7 | 0,1 | 99,2 | 0,8 |
| Nº200 | 0,08 | 2,5 | 0,1 | 99,3 | 0,7 |

Tabla A 86

Granulometría del agregado M-1409-2023

| Masa inicial: | 911,3 | Masa final: | 885,2 | MF: | 3,161 |
|---------------|---------------|-------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|
| Malla No. | Abertura (mm) | Masa retenida (g) | Porcentaje Retenido (%) | Retenido acumulado (%) | Porcentaje Pasando (%) |
| 1/4" | 6,30 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 100,0 |
| Nº4 | 4,75 | 16,1 | 1,8 | 1,8 | 98,2 |
| Nº8 | 2,36 | 191,3 | 21,0 | 22,8 | 77,2 |
| Nº10 | 2,00 | 53,7 | 5,9 | 28,7 | 71,3 |
| Nº16 | 1,18 | 156,9 | 17,2 | 45,9 | 54,1 |
| Nº20 | 0,85 | 100,2 | 11,0 | 56,9 | 43,1 |
| Nº30 | 0,60 | 93,1 | 10,2 | 67,1 | 32,9 |
| Nº40 | 0,43 | 83,8 | 9,2 | 76,3 | 23,7 |
| Nº50 | 0,30 | 76,0 | 8,3 | 84,6 | 15,4 |
| Nº60 | 0,25 | 31,0 | 3,4 | 88,0 | 12,0 |
| Nº100 | 0,15 | 53,5 | 5,9 | 93,9 | 6,1 |
| Nº200 | 0,08 | 27,8 | 3,1 | 96,9 | 3,1 |



7.4. Apéndice 4: Validación de las mezclas

7.4.1. Diseño de mezcla 1 (16 mm con aditivo)

Tabla A 87

Resistencia a la compresión a los 7 días, diseño de mezcla 16 mm

| Espécimen No. | Diámetro | Área | Carga | Resistencia | |
|-------------------|----------|-------|-------|-------------|--------------------|
| | mm | mm | kN | MPa | kg/cm ² |
| 1 | 151,8 | 18099 | 665 | 36,8 | 375 |
| 2 | 152,5 | 18244 | 717 | 39,3 | 401 |
| 3 | 153,3 | 18460 | 647 | 35,1 | 358 |
| Promedio | 153 | 18266 | 677 | 37 | 378 |
| Desv. Estd | 0,8 | 182,0 | 36,2 | 2,1 | 21,7 |

Tabla A 88

Resistencia a la compresión a los 28 días, diseño de mezcla 16 mm

| Espécimen No. | Diámetro | Área | Carga | Resistencia | |
|-------------------|----------|-------|-------|-------------|--------------------|
| | mm | mm | kN | MPa | kg/cm ² |
| 4 | 151,5 | 18017 | 949 | 52,7 | 537 |
| 5 | 151,0 | 17897 | 804 | 44,9 | 458 |
| 6 | 152,5 | 18247 | 944 | 51,8 | 528 |
| Promedio | 152 | 18054 | 899 | 50 | 508 |
| Desv. Estd | 0,8 | 178,0 | 82,2 | 4,2 | 43,0 |

Tabla A 89

Esfuerzo de flexión de vigas de concreto a los 7 días, diseño de mezcla 16 mm

| Espécimen No. | Dist. Apoyos (mm) | Ancho (mm) | Altura (mm) | Carga (kN) | Módulo de ruptura (MPa) |
|---------------|-------------------|------------|-------------|------------|-------------------------|
| 1 | 450 | 154 | 152 | 34,1 | 4,3 |

Tabla A 90

Esfuerzo de flexión de vigas de concreto a los 28 días, diseño de mezcla 16 mm

| Espécimen No. | Dist. Apoyos (mm) | Ancho (mm) | Altura (mm) | Carga (kN) | Módulo de ruptura (MPa) |
|-------------------|-------------------|------------|-------------|------------|-------------------------|
| 2 | 450 | 153 | 149 | 41,0 | 5,45 |
| 3 | 450 | 153 | 151 | 40,0 | 5,15 |
| 4 | 450 | 155 | 152 | 36,6 | 4,65 |
| Promedio | | | | | 5,1 |
| Desv. Estd | | | | | 0,4 |

7.4.2. Diseño de mezcla 2 (38 mm con aditivo)



Tabla A 91

Resistencia a la compresión a los 7 días, diseño de mezcla 38 mm

| Especimen No. | Diámetro | Área | Carga | Resistencia | |
|---------------|----------|-------|-------|-------------|--------------------|
| | mm | mm | kN | MPa | kg/cm ² |
| 1 | 152,0 | 18169 | 634 | 34,9 | 356 |
| 2 | 152,5 | 18251 | 646 | 35,4 | 361 |
| 3 | 152,5 | 18247 | 551 | 30,2 | 308 |
| Promedio | 152 | 18222 | 611 | 34 | 342 |
| Desv. Estd | 0,2 | 46,6 | 52,0 | 2,9 | 29,4 |

Tabla A 92

Resistencia a la compresión a los 28 días, diseño de mezcla 38 mm

| Especimen No. | Diámetro | Área | Carga | Resistencia | |
|---------------|----------|-------|-------|-------------|--------------------|
| | mm | mm | kN | MPa | kg/cm ² |
| 4 | 151,8 | 18095 | 892 | 49,3 | 503 |
| 5 | 152,3 | 18190 | 714 | 39,2 | 400 |
| 6 | 152,0 | 18133 | 716 | 39,5 | 403 |
| Promedio | 152 | 18139 | 774 | 43 | 435 |
| Desv. Estd | 0,2 | 48,1 | 102,1 | 5,7 | 58,4 |

Tabla A 93

Esfuerzo de flexión de vigas de concreto a los 7 días, diseño de mezcla 38 mm

| Especimen No. | Dist. Apoyos (mm) | Ancho (mm) | Altura (mm) | Carga (kN) | Módulo de ruptura (MPa) |
|---------------|-------------------|------------|-------------|------------|-------------------------|
| 1 | 450 | 154 | 152 | 24,7 | 3,1 |

Tabla A 94

Esfuerzo de flexión de vigas de concreto a los 28 días, diseño de mezcla 38 mm

| Especimen No. | Dist. Apoyos (mm) | Ancho (mm) | Altura (mm) | Carga (kN) | Módulo de ruptura (MPa) |
|---------------|-------------------|------------|-------------|------------|-------------------------|
| 2 | 450 | 153 | 151 | 35,5 | 4,55 |
| 3 | 450 | 154 | 151 | 34,1 | 4,35 |
| 4 | 450 | 155 | 151 | 37,1 | 4,70 |
| Promedio | | | | | 4,55 |
| Desv. Estd | | | | | 0,18 |

7.4.3. Diseño de mezcla 3 (combinada con aditivo)

Tabla A 95

Resistencia a la compresión a los 7 días, diseño de mezcla 3

| Especimen No. | Diámetro | Área | Carga | Resistencia | |
|---------------|----------|-------|-------|-------------|--------------------|
| | mm | mm | kN | MPa | kg/cm ² |
| 1 | 152,0 | 18165 | 491 | 27,0 | 275 |
| 2 | 151,5 | 18040 | 628 | 34,8 | 355 |
| 3 | 152,5 | 18130 | 589 | 32,5 | 331 |
| Promedio | 152 | 18112 | 570 | 32 | 321 |
| Desv. Estd | 0,3 | 64,6 | 70,7 | 4,0 | 40,8 |



Tabla A 96

Resistencia a la compresión a los 28 días, diseño de mezcla 3

| Espécimen No. | Diámetro | Área | Carga | Resistencia | |
|---------------|----------|-------|-------|-------------|--------------------|
| | mm | mm | kN | MPa | kg/cm ² |
| 4 | 152,3 | 18204 | 871 | 47,8 | 487 |
| 5 | 152,5 | 18271 | 871 | 47,7 | 486 |
| 6 | 152,5 | 18273 | 832 | 45,5 | 464 |
| Promedio | 152 | 18249 | 858 | 47 | 479 |
| Desv. Estd | 0,2 | 39,1 | 22,4 | 1,3 | 13,1 |

Tabla A 97

Esfuerzo de flexión de vigas de concreto a los 7 días, diseño de mezcla 3

| Espécimen No. | Dist. Apoyos (mm) | Ancho (mm) | Altura (mm) | Carga (kN) | Módulo de ruptura (MPa) |
|---------------|-------------------|------------|-------------|------------|-------------------------|
| 1 | 450 | 151 | 155 | 31,9 | 3,95 |
| 2 | | 150 | 154 | 26,2 | 3,30 |
| 3 | | 151 | 155 | 29,2 | 3,65 |
| 4 | | 150 | 154 | 28,4 | 3,55 |
| Promedio | | | | | 3,61 |
| Desv. Estd | | | | | 0,27 |

Tabla A 98

Esfuerzo de flexión de vigas de concreto a los 28 días, diseño de mezcla 3

| Espécimen No. | Dist. Apoyos (mm) | Ancho (mm) | Altura (mm) | Carga (kN) | Módulo de ruptura (MPa) |
|---------------|-------------------|------------|-------------|------------|-------------------------|
| 5 | 450 | 152 | 154 | 37,9 | 4,70 |
| 6 | | 150 | 155 | 38,9 | 4,85 |
| 7 | | 152 | 154 | 36,7 | 4,60 |
| 8 | | 152 | 154 | 37,8 | 4,70 |
| Promedio | | | | | 4,71 |
| Desv. Estd | | | | | 0,10 |

7.4.4. Diseño de mezcla 4 (Cañas - Limonal)

Tabla A 99

Resistencia a la compresión a los 7 días, diseño de mezcla 4

| Espécimen No. | Diámetro | Área | Carga | Resistencia | |
|---------------|----------|-------|-------|-------------|--------------------|
| | mm | mm | kN | MPa | kg/cm ² |
| 1 | 152,3 | 18195 | 708 | 38,9 | 397 |
| 2 | 152,0 | 18132 | 719 | 39,7 | 405 |
| 3 | 152,0 | 18173 | 734 | 40,4 | 412 |
| 4 | 151,8 | 18095 | 731 | 40,4 | 412 |
| 5 | 152,3 | 18206 | 730 | 40,1 | 409 |
| 6 | 152,5 | 18276 | 711 | 38,9 | 397 |
| Promedio | 152 | 18179 | 722 | 40 | 405 |
| Desv. Estd | 0,7 | 63 | 11,0 | 0,7 | 7,0 |



Tabla A 100

Esfuerzo de flexión de vigas de concreto a los 7 días, diseño de mezcla 4

| Características de las vigas de concreto a los 7 días, diseño de mezcla: | | | | | |
|--|-------------------|------------|-------------|------------|-------------------------|
| Espécimen No. | Dist. Apoyos (mm) | Ancho (mm) | Altura (mm) | Carga (kN) | Módulo de ruptura (MPa) |
| 1 | 450 | 152 | 155 | 39,2 | 4,85 |
| 2 | | 152 | 156 | 39,6 | 4,85 |
| 3 | | 152 | 155 | 38 | 4,7 |
| 4 | | 151 | 153 | 37,2 | 4,7 |
| Promedio | | | | | 4,8 |
| Desv. Estd | | | | | 0.09 |

7.4.5. Diseño de mezcla 5 (Agregados Guápiles)

Tabla A 101

Resistencia a la compresión a los 7 días, diseño de mezcla 5

| Espécimen No. | Diámetro (mm) | Área (mm) | Carga (kN) | Resistencia | |
|-------------------|---------------|-----------|------------|-------------|--------|
| | | | | MPa | kg/cm2 |
| 1 | 152,3 | 18221 | 575 | 31,6 | 322 |
| 2 | 151,5 | 18033 | 570 | 31,6 | 322 |
| 3 | 152,0 | 18158 | 526 | 29,0 | 296 |
| 4 | 152,8 | 18335 | 616 | 33,6 | 343 |
| 5 | 152,5 | 18279 | 520 | 28,5 | 291 |
| 6 | 152,3 | 18213 | 502 | 27,6 | 281 |
| Promedio | 152 | 18207 | 552 | 30 | 309 |
| Desv. Estd | 0,4 | 104,4 | 42,8 | 2,3 | 23,5 |

Tabla A 102

Resistencia a la compresión a los 28 días, diseño de mezcla 5

| Espécimen No. | Diámetro (mm) | Área (mm) | Carga (kN) | Resistencia | |
|-------------------|---------------|-----------|------------|-------------|--------|
| | | | | MPa | kg/cm2 |
| 1 | 151,5 | 18010 | 807 | 44,8 | 457 |
| 2 | 152,0 | 18149 | 758 | 41,8 | 426 |
| 3 | 151,5 | 18053 | 767 | 42,5 | 433 |
| 4 | 333,8 | 87519 | 772 | 8,8 | 90 |
| 5 | 151,8 | 18078 | 809 | 44,7 | 456 |
| 6 | 151,5 | 18039 | 732 | 40,6 | 414 |
| Promedio | 182 | 29641 | 774 | 37 | 379 |
| Desv. Estd | 74,3 | 28354,2 | 29,6 | 14,0 | 142,7 |

Tabla A 103

Esfuerzo de flexión de vigas de concreto a los 7 días, diseño de mezcla 5

| Espécimen No. | Dist. Apoyos (mm) | Ancho (mm) | Altura (mm) | Carga (kN) | Módulo de ruptura (MPa) |
|-------------------|-------------------|------------|-------------|------------|-------------------------|
| 1 | 450 | 153 | 154 | 29,9 | 3,70 |
| 2 | 450 | 153 | 154 | 35,6 | 4,40 |
| 3 | 450 | 152 | 154 | 35437,0 | 4,40 |
| 4 | 450 | 152 | 153 | 34519,0 | 4,35 |
| Promedio | | | | | 4,2 |
| Desv. Estd | | | | | 0,34 |



Tabla A 104

Esfuerzo de flexión de vigas de concreto a los 28 días, diseño de mezcla 5

| Espécimen No. | Dist. Apoyos (mm) | Ancho (mm) | Altura (mm) | Carga (kN) | Módulo de ruptura (MPa) |
|---------------|-------------------|------------|-------------|------------|-------------------------|
| 1 | 450 | 154 | 154 | 37,8 | 4,70 |
| 2 | 450 | 155 | 154 | 40,6 | 5,00 |
| 3 | 450 | 151 | 154 | 38,4 | 4,80 |
| 4 | 450 | 152 | 153 | 40,7 | 5,10 |
| Promedio | | | | | 4,9 |
| Desv. Estd | | | | | 0,18 |



7.5. Apéndice 5: Nube de puntos para el modelo general

Tabla A 105

Nube de puntos para modelo general

| Fuente Datos | logN | SR | TMN | aditivo |
|---------------|-----------|------|-----|---------|
| Diseño1 | 0,6989700 | 0,70 | 16 | 1 |
| Diseño1 | 0,9542425 | 0,73 | 16 | 1 |
| Diseño1 | 0,4771213 | 0,79 | 16 | 1 |
| Diseño1 | 0,0043214 | 0,78 | 16 | 1 |
| Diseño1 | 2,5646661 | 0,57 | 16 | 1 |
| Diseño1 | 2,2253093 | 0,57 | 16 | 1 |
| Diseño1 | 2,9084850 | 0,57 | 16 | 1 |
| Diseño1 | 2,2253093 | 0,56 | 16 | 1 |
| Diseño1 | 4,3915702 | 0,48 | 16 | 1 |
| Diseño1 | 3,6295115 | 0,47 | 16 | 1 |
| Diseño1 | 3,7481105 | 0,48 | 16 | 1 |
| Diseño2 | 5,0851550 | 0,72 | 38 | 1 |
| Diseño2 | 4,7730474 | 0,72 | 38 | 1 |
| Diseño2 | 4,9720639 | 0,74 | 38 | 1 |
| Diseño2 | 4,4851818 | 0,72 | 38 | 1 |
| Diseño2 | 4,2255677 | 0,72 | 38 | 1 |
| Diseño2 | 1,2787536 | 1,03 | 38 | 1 |
| Diseño2 | 1,7403627 | 1,03 | 38 | 1 |
| Diseño2 | 3,5769170 | 0,90 | 38 | 1 |
| Diseño2 | 2,9415114 | 0,90 | 38 | 1 |
| Diseño2 | 2,7201593 | 0,91 | 38 | 1 |
| Diseño2 | 1,4471580 | 0,95 | 38 | 1 |
| Diseño2 | 2,1760913 | 0,85 | 38 | 1 |
| Diseño2 | 3,9643539 | 0,75 | 38 | 1 |
| Tesis Monge | 1,6812412 | 0,95 | 38 | 1 |
| Tesis Monge | 2,5263393 | 0,85 | 38 | 1 |
| Tesis Monge | 3,1925675 | 0,75 | 38 | 1 |
| Tesis Miranda | 2,3747483 | 0,95 | 38 | 0 |
| Tesis Miranda | 3,5020172 | 0,95 | 38 | 0 |
| Tesis Miranda | 2,1846914 | 0,95 | 38 | 0 |
| Tesis Miranda | 2,2041200 | 0,85 | 38 | 0 |
| Tesis Miranda | 3,0203613 | 0,85 | 38 | 0 |
| Tesis Miranda | 3,7056072 | 0,75 | 38 | 0 |
| Tesis Miranda | 4,7806701 | 0,75 | 38 | 0 |
| Tesis Miranda | 4,9586785 | 0,65 | 38 | 0 |
| Tesis Miranda | 4,1074474 | 0,85 | 38 | 0 |
| Tesis Miranda | 5,2599019 | 0,75 | 38 | 0 |
| Tesis Miranda | 2,7041505 | 0,95 | 25 | 0 |
| Tesis Miranda | 2,6655810 | 0,95 | 25 | 0 |
| Tesis Miranda | 1,5910646 | 0,95 | 25 | 0 |
| Tesis Miranda | 3,4012282 | 0,85 | 25 | 0 |
| Tesis Miranda | 3,2659964 | 0,80 | 25 | 0 |
| Tesis Miranda | 4,8188854 | 0,75 | 25 | 0 |
| Tesis Miranda | 0,3010300 | 0,95 | 19 | 0 |
| Tesis Miranda | 0,4771213 | 0,95 | 19 | 0 |



Tabla A 106

Nube de puntos para modelo general (continuación)

| Fuente Datos | logN | SR | TMN | aditivo |
|---------------|-----------|------|-----|---------|
| Tesis Miranda | 0,0000004 | 0,95 | 19 | 0 |
| Tesis Miranda | 0,6989700 | 0,85 | 19 | 0 |
| Tesis Miranda | 3,0216027 | 0,75 | 19 | 0 |
| Tesis Miranda | 0,3010300 | 0,85 | 19 | 0 |
| Tesis Miranda | 2,3909351 | 0,75 | 19 | 0 |
| Tesis Miranda | 3,5533975 | 0,65 | 19 | 0 |
| Tesis Miranda | 3,7323938 | 0,65 | 19 | 0 |
| Diseño 3 | 3,8901974 | 0,75 | 38 | 1 |
| Diseño 3 | 4,3671322 | 0,75 | 38 | 1 |
| Diseño 3 | 3,8367670 | 0,76 | 38 | 1 |
| Diseño 3 | 3,2432861 | 0,76 | 38 | 1 |
| Diseño 3 | 3,3384565 | 0,60 | 38 | 1 |
| Diseño 3 | 4,3330239 | 0,61 | 38 | 1 |
| Diseño 3 | 4,2586852 | 0,60 | 38 | 1 |
| Diseño 3 | 3,5055569 | 0,62 | 38 | 1 |
| Diseño 3 | 4,0904697 | 0,61 | 38 | 1 |
| Diseño 3 | 3,6967931 | 0,61 | 38 | 1 |
| Diseño 3 | 5,2563087 | 0,52 | 38 | 1 |
| Diseño 3 | 5,5471924 | 0,53 | 38 | 1 |
| Diseño 3 | 5,3728752 | 0,52 | 38 | 1 |
| Diseño 3 | 4,9216085 | 0,52 | 38 | 1 |
| Diseño 4 | 3,9722028 | 0,67 | 38 | 1 |
| Diseño 4 | 3,3647386 | 0,68 | 38 | 1 |
| Diseño 4 | 3,7463228 | 0,68 | 38 | 1 |
| Diseño 4 | 2,2355284 | 0,72 | 38 | 1 |
| Diseño 4 | 2,9489018 | 0,72 | 38 | 1 |
| Diseño 4 | 3,6153187 | 0,73 | 38 | 1 |
| Diseño 4 | 2,0492180 | 0,85 | 38 | 1 |
| Diseño 4 | 2,8260748 | 0,86 | 38 | 1 |
| Diseño 4 | 3,9122221 | 0,86 | 38 | 1 |
| Diseño 4 | 3,9121157 | 0,86 | 38 | 1 |
| Diseño 4 | 2,3710679 | 0,87 | 38 | 1 |
| Diseño 4 | 1,4771213 | 1,06 | 38 | 1 |
| Diseño 4 | 2,3180633 | 1,06 | 38 | 1 |
| Diseño 4 | 1,7323938 | 1,06 | 38 | 1 |
| Diseño 5 | 3,9122752 | 0,30 | 38 | 1 |
| Diseño 5 | 3,9122221 | 0,30 | 38 | 1 |
| Diseño 5 | 4,4459154 | 0,30 | 38 | 1 |
| Diseño 5 | 4,4289443 | 0,35 | 38 | 1 |
| Diseño 5 | 3,2607867 | 0,36 | 38 | 1 |
| Diseño 5 | 3,7079957 | 0,38 | 38 | 1 |
| Diseño 5 | 3,9123815 | 0,39 | 38 | 1 |
| Diseño 5 | 3,9122752 | 0,39 | 38 | 1 |
| Diseño 5 | 3,8911470 | 0,39 | 38 | 1 |
| Diseño 5 | 2,5910646 | 0,47 | 38 | 1 |
| Diseño 5 | 3,8083460 | 0,47 | 38 | 1 |



Tabla A 107

Nube de puntos para modelo general (continuación)

| Fuente Datos | logN | SR | TMN | aditivo |
|--------------|-----------|------|-----|---------|
| Diseño 5 | 3,1024337 | 0,47 | 38 | 1 |
| Diseño 5 | 3,9120094 | 0,47 | 38 | 1 |
| Diseño 5 | 2,1702617 | 0,47 | 38 | 1 |
| Diseño 5 | 3,3479152 | 0,53 | 38 | 1 |