

Octava Edición

2019 - 2020

Trabajo completo

Desarrollo y aplicación de tecnologías de avanzada para el estudio del comportamiento y mejoramiento de los métodos de diseño de pavimentos rígidos

Autores:

Eduardo Tejeda Piusseaut

Edwin Alexander Rodríguez Vélez

Universidad Técnica de Manabí. Cuba

Félix Michael Hernández López

Universidad Tecnológica de La Habana (CUJAE). Cuba

Carlos A. Recarey Morfa

Universidad Central de Las Villas. Cuba

Marcio Muniz de Farias

Universidad de Brasilia (UNB). Brasil

Miguel Ángel Celigueta Jordana

Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE)

Universidad Politécnica de Cataluña. España



DESARROLLO Y APLICACION DE TECNOLOGIAS DE AVANZADA PARA EL ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO Y MEJORA DE METODOS DE DISEÑO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS

CAPITULO 1

DISEÑO Y MODELACIÓN COMPUTACIONAL DE PAVIMENTOS DE CEMENTO PORTLAND

1.1 Introducción

Los pavimentos de concreto de cemento portland, conocidos también como pavimentos rígidos, están formados por una losa de concreto, reforzado o no, apoyada sobre el suelo natural de subrasante, o sobre un material granular, que pudiera estar tratado con algún aglomerante.

La Guía AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) del 1993, es uno de los procedimientos de diseño más utilizados internacionalmente para estos pavimentos y ha tenido continuas versiones desde el año 1972, perfeccionando el modelo empírico, mediante el cual se determina el tráfico que soporta la estructura, a partir de las variables involucradas en el diseño, como son: la resistencia de la subrasante, el aporte de la capa de base, la influencia del clima y condiciones de drenaje, la pérdida de la serviciabilidad de la estructura en el tiempo, la confiabilidad en el diseño, la calidad del concreto y la forma de transferencia de cargas entre losas.

Con el avance de la informática y de las investigaciones más recientes, los procedimientos de diseño empírico-mecanicistas han ido tomando auge en la ingeniería de pavimentos, permitiendo realizar el diseño con mayor fiabilidad, tanto en la evaluación de las variables de entrada como en la influencia que tienen en el comportamiento de estructural a través del tiempo.

La versión del año 1993 de la guía AASTHO, actualmente vigente en muchos países de América, como en las versiones anteriores, tiene como limitante que, por su basamento empírico, no permite que sea adoptada fielmente en otras condiciones diferentes a las que fue creada. Algunos países le han hecho adaptaciones, para lo cual se requiere de la experimentación en las condiciones de tráfico, clima y materiales, así como conocer sobre el desempeño de las estructuras de estos pavimentos, ante estas variables, en las condiciones concretas del territorio.

La Guía 2008 MEPDG (Guía de diseño empírico-mecanicista para el diseño de pavimentos), es el procedimiento más completo en la actualidad, producto de varios años de investigación de la AASHTO y un equipo de investigadores, integrado por expertos en estructuras de pavimentos reconocidos internacionalmente. El alcance de esta guía incluye los procedimientos para el análisis, diseño, reconstrucción y rehabilitación de pavimentos flexibles y rígidos. También incluye procedimientos para evaluar pavimentos existentes y para el diseño del drenaje, brinda recomendaciones para los procedimientos de rehabilitación, así como para el análisis de coste durante el ciclo de vida de las estructuras. Para el diseño de los pavimentos de concreto utiliza modelos de fallo de los deterioros fundamentales de este tipo de pavimentos: irregularidades (medido con IRI), agrietamiento de losas y fallo en las juntas.



La instrumentación de pavimentos se ha convertido en una importante herramienta de monitoreo del desempeño del material in situ y una forma de cuantificar la respuesta de estos ante las solicitaciones de carga y de clima a que es expuesto. Dentro de los parámetros que requieren mediciones de campo se encuentran: la deformación unitaria, los esfuerzos de tensión y compresión, la humedad y la temperatura. Las mediciones in situ de estos parámetros permiten el desarrollo de modelos de desempeño precisos y la calibración de las técnicas de diseño de pavimentos desde un enfoque mecanicista¹.

1.2 Variables que intervienen en el diseño y comportamiento de los pavimentos de concreto

En función de la tecnología de construcción, los pavimentos rígidos pueden ser clasificados en: pavimentos de concreto simple, de concreto armado, compactado con rodillos y de concreto pre o postensado². El pavimento de concreto simple de cemento portland, formado por losas rectangulares, posee juntas transversales de contracción entre losas contiguas, y juntas longitudinales de alabeo, entre carriles, para evitar la aparición de fisuras debido a la retracción del concreto. La losa de pavimento, debido a su rigidez y alto módulo de elasticidad, absorbe gran parte de los esfuerzos que se ejercen sobre el pavimento, lo que produce una buena distribución de las cargas, llegando muy bajas tensiones al cimiento³.

Los pavimentos rígidos están sometidos a diversos esfuerzos, causados por la acción de las cargas de los vehículos o por los cambios de temperatura en la losa. Las cargas de tráfico originan esfuerzos abrasivos en la superficie o esfuerzos de compresión y tracción, por deflexiones de las losas; los cambios de temperatura provocan tensiones de combado o de fricción entre la losa y el soporte.

Los pavimentos de concreto pueden construirse sin pasadores, cuando la transferencia en las juntas se garantiza a través de la trabazón de agregados, ya que no presentan barras como elementos de transferencia de cargas. Los pavimentos construidos con pasadores llevan pequeñas barras de acero liso en las juntas transversales de contracción, cuya función es la de transmitir las cargas entre losas contiguas, mejorando la resistencia a la deformación en las juntas, para evitar dislocamientos verticales diferenciales (escalonamientos).

Las variables de diseño en pavimentos de concreto simple son: cargas de tráfico, condiciones ambientales, características del concreto y de los materiales del cimiento. El cimiento estará formado por una subrasante o por el conjunto formado por un material de base o subbase encima de la subrasante.

Los efectos producidos por el tránsito sobre la infraestructura de una carretera resultan complejos, debido no sólo a la variabilidad de los distintos vehículos que circulan, sino también a las interacciones vehículo-pavimento que producen fenómenos con solicitaciones adicionales a las propias cargas estáticas del tránsito, definidas en otros trabajos de investigación^{2,4}.

El peso de los camiones es transmitido al pavimento a través de la cantidad de ruedas, distribuyéndose en una superficie, cuyo tamaño depende de la presión de contacto entre el neumático y el pavimento.



La presión de contacto generalmente se considera igual a la presión estática. Las presiones de inflado usualmente empleadas en carreteras varían entre 0.65-0.70MPa, y en algunos casos pueden llegar a valores entre 0.8-0.9MPa⁵.

Estas estructuras de pavimento están formadas por dos tipos de materiales: el concreto de cemento portland que conforma la losa y el material de soporte o cimientado, que puede estar formado por varias capas. El cimientado puede ser la propia subrasante, en estado natural o compactado; o también puede ser un conjunto formado por una capa de base o subbase, apoyada sobre la subrasante. En los diseños, para caracterizar el aporte del cimientado, pueden utilizarse dos parámetros: el módulo de reacción de la subrasante (k) o el módulo resiliente (M_r).

En los diseños o revisión de las estructuras de pavimentos se necesita la caracterización de los materiales componentes del sistema, especialmente en los procedimientos empírico-mecanicistas, donde la racionalidad en la respuesta del pavimento depende en gran medida de la resistencia asumida para los materiales. La respuesta en tensiones, deformaciones y desplazamientos, se utiliza, junto a los criterios de falla, para predecir los deterioros de acuerdo a la confiabilidad establecida para el diseño.

El uso de subbase o base, colocado entre la subrasante y la losa, formado por materiales granulares tratados o no, puede mejorar el apoyo de la losa, y evitar el fenómeno de bombeo de materiales, cuando la subrasante natural tiene elevado contenido de finos y baja resistencia a los esfuerzos. La capa de base o subbase provee un soporte a la losa de concreto uniforme, estable y permanente durante su construcción y vida útil; asimismo, incrementa el aporte en carga del terreno de cimentación al aumentar la rigidez de la estructura^{6,7,8}.

En los pavimentos de concreto, sometidos a flexo-tracción, se utiliza como parámetro resistente la resistencia a la flexión, determinada mediante el ensayo de carga en vigas de dimensiones de 15x15x55cm⁹, cuyo valor de resistencia se conoce como módulo de rotura (M_R), requiriéndose este parámetro después de 28 días de curado.

1.3 Mecanismos de fallas en pavimentos de concreto simple

Los deterioros en los pavimentos de concreto simple son producidos por las tensiones, deformaciones y desplazamientos, que se generan en la losa debido a la influencia del tráfico, temperatura y la humedad en la cimentación. La manera en que los métodos de diseño aplacan estos deterioros durante el período de diseño es considerando en los análisis dos mecanismos de fallo: a) la pérdida de soporte por erosión, relacionado con el escalonamiento en las juntas y b) el fallo por fatiga, relacionado con los fallos por el agrietamiento transversal en las losas.

El movimiento del agua a través de las juntas, unido a suelos finos utilizados como cimientado de las losas, produce el fenómeno conocido como bombeo, que es un problema difícil de caracterizar de manera analítica, requiriendo un volumen experimental extremadamente elevado; como lo demuestran los resultados derivados de los tramos de pruebas de la ASHTO Road Test, empleados para el análisis de erosión en diferentes normativas^{10,11}. El efecto de la pérdida de soporte por erosión, se puede reducir mediante la aplicación de medidas de diseño o constructivas: aumentando la eficiencia de transferencia

de carga entre losas, manteniendo el material sellante impermeable en las juntas, y utilizando capas de bases granulares o tratadas.

Los deterioros en las losas por agrietamiento transversal, están asociados al fenómeno de fatiga en el concreto, causados fundamentalmente por los esfuerzos repetitivos aplicados en el borde y centro de la losa. El criterio de fallo en el dimensionamiento de la losa se evalúa mediante la relación entre el número de repeticiones esperadas de cada carga del espectro y el número de repeticiones que admite la losa antes del fallo por fatiga.

1.4 Efectos de la diferencia de temperatura en la losa por la radiación solar

Las variaciones en la temperatura del pavimento provocado por los cambios de temperatura ambiente que se producen durante el día, generan tensiones en las losas de concreto y son causantes de ciertos deterioros. Las losas de concreto se expanden o contraen en su longitud, por una variación uniforme de temperatura por lo cual surgen tensiones de fricción entre la losa y el cimiento. Cuando se originan gradientes de temperatura durante el día, a través de su espesor, pueden también producirse las llamadas tensiones de combado, ya sea por calentamiento de la parte superior de la losa durante el día o por su enfriamiento en la noche.

Cuando se eleva la temperatura ambiente, la parte superior de la losa de concreto se calienta mucho más que la parte inferior (diferencia de temperatura positiva a través de la losa) y como resultado, se produce un alargamiento de la parte superior respecto a la parte inferior (curvatura convexa), como se muestra en la figura 1.1a, lo que crea un vacío debajo y en el medio de la losa. Como el peso propio de la losa se opone a la curvatura; la curvatura real no puede desarrollarse, por lo que se restringe el movimiento libre de la losa, causando tensión de tracción en la parte inferior de la losa. Bajo las cargas del tráfico, cualquier pérdida real de apoyo debido a las diferencias de temperatura aumenta aún más los esfuerzos de tracción críticos en la parte inferior de la losa¹²

Durante la noche, la parte superior de la losa es comúnmente más fría que la parte inferior (diferencia de temperatura negativa a través de la losa). El resultado es una curvatura cóncava de la losa, como se muestra en la figura 1.1b, lo que crea huecos por debajo de los bordes de la losa, que, combinados con la carga de tráfico, aumenta la tensión de tracción en la parte superior, y puede conducir a la iniciación de grietas de fatiga, de arriba hacia abajo¹².



a) Curvatura de la losa de concreto por diferencia de temperatura positiva (diurna)

b) Curvatura de la losa de concreto por diferencia de temperatura negativa (nocturna)

Figura 0.1 Representación del fenómeno de alabeo por diferencial térmico en losas de concreto



Las precipitaciones por su acción sobre los suelos de subrasante y capas no aglomeradas de base o subbase pueden ocasionar modificaciones en el comportamiento de estos materiales, provocado por el incremento de la humedad, sobre todo cuando las condiciones de drenaje son desfavorables, y también puede influir sobre la reducción de temperatura de la parte inferior de la losa.

Por la sensibilidad de las tensiones críticas de los pavimentos de concreto a los gradientes de temperatura, es necesario considerar la variación horaria de la temperatura, ya que durante el día pueden producirse gradientes de magnitud tal que ocasionen grandes tensiones debido al combado. Las dimensiones de la losa (espesor, largo y ancho), las propiedades de los materiales, la temperatura ambiente y la humedad del cemento, son variables que influyen en el gradiente de temperatura entre la parte superior e inferior de la losa, y, por tanto, en las tensiones producidas debido al combado.

1.5 Instrumentación y experimentación en pavimentos de concreto simple

Debido a la gran variabilidad climática, de materiales y tráfico a la que están sometidos los pavimentos, es muy elevado el coste requerido para el desarrollo de ensayos en tiempo real (RTL, por sus siglas en inglés), que abarque todas las condiciones existentes, realizadas por períodos prolongados. Sin embargo, al caracterizar el desempeño a largo plazo de las estructuras de pavimentos para desarrollar o validar metodologías de diseño, solo existe un procedimiento, el uso de equipos de ensayos acelerados en pavimentos (APT, por sus siglas en inglés).

Para la instrumentación en pavimentos existen dos formas: a) la instrumentación en pistas de prueba para ensayos acelerados de carga a través de sistemas mecánicos y b) la instrumentación de tramos de vía en servicio cuya carga es aplicada a través del tráfico real o por medio de vehículos con carga controlada. Con mayor frecuencia las respuestas medidas en pavimentos son: las deformaciones, los esfuerzos y las deflexiones. Las deformaciones se utilizan para controlar el daño por fatiga de los materiales y el ahuellamiento de bases granulares. El estado de esfuerzos de la estructura del pavimento permite identificar la influencia de la aplicación de las cargas sobre las capas de la estructura y las deflexiones son utilizadas en retrocálculos para cuantificar las propiedades in-situ de los materiales¹.

Para la instrumentación en pavimentos, con el objetivo de determinar el comportamiento ante cargas y clima en las estructuras, es necesario, además de los sensores para la obtención de la señal de deformaciones y temperatura dentro del pavimento, la utilización de un sistema de adquisición de datos. El sistema de adquisición de datos es la interfaz entre la señal y una PC. El hardware y software desarrollado específicamente para la adquisición de datos se presentan en forma de módulos que pueden ser conectados a la PC en los puertos (paralelo, serie, USB, etc.), o tarjetas conectadas a la placa madre. Permiten una gran precisión en combinación con la capacidad de medir las deformaciones y temperatura, con un proceso centralizado de los datos recolectados y su registro, que facilita el análisis de los datos, que se procesan utilizando el software de procesamiento y se almacena en su base de datos. La actividad de registro de los datos proporcionados por los diferentes sensores se realiza a través de LabView.



1.6 Tecnologías de avanzada para la modelación micromecánica en pavimentos

El desarrollo de la micromecánica se inició hace más de cien años con Voigt (1889), Einstein (1911) y Reuss (1929), siendo estos los primeros colaboradores en el desarrollo de modelos micromecánicos que podrían usarse para estudiar el comportamiento de concretos basados en las propiedades individuales de los materiales constituyentes¹³. Las primicias de modelación micromecánicas de este tipo se pueden agrupar en dos amplias categorías: los que tienen partículas que no interactúan y los que consideran partículas que interactúan entre sí. Como una sub-clasificación adicional, los modelos de partículas que no interactúan pueden tener geometrías específicas (1960 a 1970 - Modelos heterogéneos) o geometrías no específicas (1880 a 1930 - Modelos homogéneos).

Generalmente los modelos que tienen partículas que no interactúan se solucionaron con el empleo de modelos homogéneos y el desarrollo de métodos como elementos finitos y elementos de contorno. En el caso de las partículas que interactúan primeramente se emplearon geometrías simplificadas y se hizo uso de los métodos de elementos finitos y modelos Lattice (década del 90). Geometrías más complejas fueron abordadas en la década del 2000 y se comenzó a emplear un enfoque micro-estructural con el método de los elementos finitos o métodos de los elementos discretos¹⁴. Se han desarrollado diversos trabajos^{15,16,17,18,19,20,21,22,23,24} en estos temas de modelación micromecánica del concreto para pavimentos, aunque falta mucho por investigar y desarrollar. En la gran mayoría los áridos han sido modelados con geometrías simplificadas, debido a las inexistencias de técnicas que logren este aspecto. La introducción de conceptos como: 1) combinación de modelación y experimentación como vía de calibrar y validar los modelos numéricos, 2) modelación (discreta o continua) numérica estocástica, modelación multi-escala y 3) modelación con niveles de detalle morfológicos de los materiales constituyentes, son aspectos a desarrollar.

En los concretos para pavimentos, hay una serie de parámetros que deben considerarse en el estudio del comportamiento de estos sistemas complejos, que contienen una o más fases incrustadas en una matriz continua o discreta. Estos parámetros incluyen: 1) forma y morfología de las partículas; 2) tamaño de partículas y su distribución de tamaños; 3) distribución espacial y concentración de partículas; 4) orientación de las partículas; 5) composición de la matriz o material adherente; 6) enlace entre las fases matriz y los componentes discretos. Todos estos parámetros entre otros, deben considerarse en una predicción micromecánica rigurosa del comportamiento del concreto para pavimentos. Una vez que se alcanza una mejor comprensión, las técnicas de homogeneización pueden usarse para simplificar la forma del modelo final.

Con el desarrollo acelerado de los medios de cómputos la modelación micromecánica se impondrá por necesidad y para lograr una mejor comprensión sobre el comportamiento de los concretos para pavimentos. Algunas investigaciones^{20,25} han demostrado la necesidad de considerar las partículas que interactúan en los estudios de los concretos, pero debido a la complejidad de la composición y morfología (meso-escala o micro-escala) de estas mezclas y sus componentes, generalmente se requieren del uso de soluciones numéricas de avanzada para estudiar su comportamiento. Esto se ha



abordado utilizando varios métodos numéricos, como el método de elementos finitos²⁶ y el modelo Lattice ²⁷ y actualmente el método de elementos discretos.^{13, 28}

Recientemente, se han realizado importantes avances en la modelación de los concretos para pavimentos ^{13,29,30}, empleando mecánica de daños continuos, modelos visco-plásticos, modelos de fractura incluido los modelos de zona cohesiva entre otros a escala micro-mecánica. En la actualidad y en un futuro para el estudio del comportamiento de los concretos para pavimentos, se acoplarán los modelos micro-mecánicos, de daños continuos, fractura y otros, para describir el comportamiento de los pavimentos utilizando las propiedades de sus materiales componentes (es decir, matriz, aglutinante o material adhesivo y agregado). El desafío en este enfoque combinado es determinar las propiedades del material en las escalas adecuadas, ya que se espera que las propiedades dependan de éstas.

Para tener en cuenta las complejas características geométricas de los componentes de los concretos para pavimentos, los investigadores han propuesto ³¹⁻⁴⁷ el uso de técnicas de captura y procesamiento de imágenes digitales que reproducen las microestructuras internas del material, es decir, la distribución espacial de los agregados dentro de la matriz o material adherente de la mezcla de concreto.

Como una alternativa a las metodologías que intentan reconstruir microestructuras tridimensionales reales de una mezcla de concreto, una metodología 2D ha sido utilizada por varios otros autores³⁵⁻⁴¹. En ese enfoque, las muestras de concreto producidas en el laboratorio se cortan para revelar sus microestructuras internas, que luego se digitalizan utilizando escáneres comunes o cámaras fotográficas digitales de alta resolución. Para este caso, es necesario un proceso de tratamiento de imágenes para convertirla la imagen virgen (en escala de grises) en un formato binario. Aunque el uso del proceso de imagen digital representa una gran mejora para la caracterización micro-estructural de mezclas de concreto, este método requiere de mucho trabajo y además es un poco impreciso.

Otro ejemplo del uso de estas técnicas se basa en la tecnología de tomografía axial computarizada de rayos X tridimensional que emplea el concepto de corte en serie ⁴²⁻⁴⁷. Durante el análisis, se exploran múltiples secciones transversales de la muestra que se analiza y luego se utilizan para reconstruir la imagen 3D de la muestra completa en un sistema de coordenadas tridimensional. Utilizando estas técnicas experimentales los investigadores, han intentado reconstruir microestructuras tridimensionales de muestras de concreto para pavimentos ⁴³⁻⁴⁷, sin embargo, este proceso puede llevar mucho tiempo y el levantamiento de la imagen en 3D presenta un alto costo computacional. Además, el análisis numérico posterior sigue siendo muy costoso desde el punto de vista computacional, especialmente si el daño se modela explícitamente durante las simulaciones. Otras de las limitaciones para uso generalizado del tomógrafo y micro-tomógrafos, es que las caracterizaciones micro-mecánicas obtenidas con estos equipamientos son representativas de la micro-estructura de la muestra estudiada y no es una caracterización estocástica de la geomorfología de los pavimentos en términos generales.

Para superar las limitaciones anteriores, recientemente se han realizado varias investigaciones^{14,29-41,46,47,48,50}, donde se han logrado desarrollar: generadores virtuales de partículas reales, y técnicas de empaquetamiento de partículas de microestructuras virtuales que se basan en características conocidas de los concretos, como la fracción de volumen, morfología, la graduación de agregados, etc.



para fabricar microestructuras virtuales representativas. Aunque exitoso en cierta medida, estos modelos generalmente requieren de las características geométricas y morfológicas de los agregados y de los elementos constituyentes de la mezcla, por ejemplo: forma y dimensiones, las cuales son modeladas virtualmente e implementadas en varios códigos numéricos que efectúan la modelación virtual de los agregados y de los empaquetamientos que constituyen el concreto. Los estudios experimentales en estos casos se hacen en función de la modelación micro-mecánica y el nivel de detalle que se desee obtener. Esta técnica es la que tiene menos costo experimental, ya que para los estudios se necesitan de analizadores de partículas y escáner 3D en el caso de los áridos gruesos, mientras que para los áridos finos, el filler y otras partículas de menor tamaño se utilizan las técnicas de microscopía, para el levantamiento 3D de las partículas individuales.

Disponiendo de los estudios experimentales⁴⁶ (geometría, distribución y geomorfología de los agregados, grueso, fino y filler) con los diferentes equipamientos de captura y procesamiento de imágenes se aplican las técnicas de generación de partículas virtuales individuales con la geometría real⁴⁷, para el caso de cada componente de la mezcla de concreto de modo tal que se disponga de un repositorio estocástico de partículas⁴⁶. Posteriormente se aplican las técnicas de empaquetamiento^{14,29-40} de partículas para lograr una representación estocástica del concreto para pavimentos.

La dificultad para la simulación numérica micro-mecánica con esta última técnica radica en modelar un material compuesto (en la escala micro de la mecánica computacional) como es el caso del concreto, donde la estructura del agregado es aleatoria, la matriz está representada por una composición compleja y detalles microestructurales que son totalmente aleatoria. Es por eso que se exigen a los nuevos desarrollos numéricos, que la forma, el tamaño y la distribución de las partículas agregadas y componentes de las mezclas se asemejen a las mezclas de concreto real en el sentido estadístico y su representación estocástica. Las formulaciones de empaquetamiento establecidas¹⁴ emplean funciones de distribución (continuas, discretas y empíricas) para lograr la estocasticidad necesaria en la generación del medio. Para este propósito, se han desarrollado algunos modelos micro-mecánicos para simular las propiedades físico-mecánicas de los compuestos con microestructuras complejas.

Entre las principales ventajas de los modelos numéricos a nivel de la micro-escala sobre otras metodologías predictivas, se puede mencionar que utiliza la caracterización micro-estructural para tener en cuenta numerosos modos de daño por separado al considerar los componentes individuales de la mezcla de concreto y su heterogeneidad. Además, este enfoque no requiere una gran cantidad de experimentos de laboratorio, ya que normalmente se basa en técnicas numéricas y solo requiere propiedades de los componentes de las mezclas individuales como entradas al modelo. Adicionalmente se requerirá de un número de ensayos mínimos para calibrar y validar los modelos numéricos como base de investigación. El objetivo de estos estudios numéricos está en comprender la influencia de las propiedades físicas mecánicas del concreto y de los elementos que lo constituyen, que se rigen por: las propiedades del agregado (morfología, forma, textura, graduación, estructura esquelética, propiedades mecánicas), propiedades del aglutinante o material adherente (características físico-mecánica y químicas, etc.) y el efecto de las interacciones matriz-agregado (adhesión, absorción, interacciones fisicoquímicas, etc.).

CAPÍTULO 2

MODELO EXPERIMENTAL DE UN PAVIMENTO DE CONCRETO ANTE LOS EFECTOS DE CARGA Y LA TEMPERATURA

2.1. Introducción

El empleo simultáneo de la experimentación y la modelación computacional forman un complemento de gran utilidad para replicar, de forma fiable, la respuesta de las estructuras ante diferentes modificaciones de las variables independientes involucradas en el fenómeno.

En esta etapa de la investigación se realizó un trabajo experimental en un tramo de pavimento formado por cuatro losas de concreto, como modelo físico para evaluar las deformaciones producidas por las variaciones de temperatura y las cargas impuestas.

2.2. Modelo experimental

El tramo experimental ocupa una superficie de 325m² y se compone de cuatro losas de concreto hidráulico. Las losas de concreto tienen un espesor de 25cm y están divididas en dos secciones, la primera apoyada sobre la subrasante compactada, formada por el suelo del lugar y la segunda sobre un material de relleno de 25 cm de espesor empleado como subbase. El objetivo de ambas secciones es evaluar el efecto de la subbase sobre el comportamiento de las tensiones y deformaciones en las losas. Las características geométricas del tramo y su ubicación se muestran en la figura 2.1.

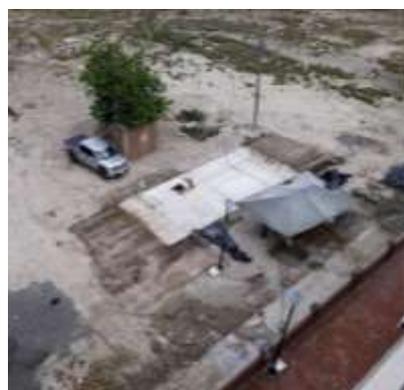


Figura 2.1 Esquema de distribución y características geométricas del tramo experimental

También se consideró el efecto de la colocación de arcén de concreto, de manera que uno de los laterales de las losas se le colocó arcén de concreto y el otro lado no. Además, con el propósito de evaluar la influencia del sistema de transferencia de cargas entre losas, se concibió una de las juntas transversales con el uso de pasadores y la otra con trabazón de agregados.

2.3. Preparación del cemento

Para la caracterización del cemento, en sus dos condiciones, fue necesario realizar los ensayos típicos en el laboratorio. Los resultados de los ensayos realizados al suelo del lugar empleado como subrasante natural compactada y del material de subbase, se muestran en la tabla 2.1. El suelo del lugar clasifica como un A-7-6, con elevado Índice de Plasticidad, y consecuentemente bajo valor de

CBR (3,9%). La subbase es un material de cantera, con Índice Plástico ligeramente superior al 6%, pero con elevado porcentaje de CBR como material de subbase.

Tabla 0.1. Resumen de la caracterización del suelo de subrasante y de la subbase

Ensayos	Norma	Subrasante	Subbase
Límite líquido	ASTM D4318	44.1	38.9
Índice de Plasticidad (%)	ASTM D4318	16.9	8.7
Clasificación	AASTHO	A-7-6	A-2-4
Máxima Densidad seca (kg/m ³)	ASTM D1557	1382	1860
Humedad óptima P.M (%)		28.78	15.2
CBR (%)	ASTM D1883	3.9	61
Módulo de reacción de suelo (MPa/m)	ASTM-D-1194	27	61
Módulo resiliente estimado (MPa)		129	262

Se realizó la excavación en toda el área teniendo en cuenta el espesor de la losa, más la profundidad del material a colocar, de tal forma que la superficie de la losa quedara a nivel del terreno natural del lugar. El material de la subbase se colocó en un espesor de 25cm, compactada hasta obtener la máxima densidad del Proctor Modificado. La figura 2.2 muestra partes de la ejecución del cimiento.



Figura 0.2 Ejecución del cimiento del pavimento

Las pruebas de control de densidades de los materiales compactados se realizaron con un densímetro nuclear, siendo satisfechas las especificaciones del proyecto. Mediante ensayo con placa de carga se obtuvo para los materiales (subrasante natural y subbase) el Módulo de Reacción (k) y el Módulo de Elasticidad (E). La figura 2.3 muestra imágenes del control de compactación y de la prueba de carga.



Figura 2.3 Control de compactación y determinación de la resistencia del cimiento

2.4. Construcción de las losas de concreto

Las losas de concreto se construyeron en dos etapas, primero los carriles y después el arcén de concreto, en uno de los laterales. Los pasadores con dimensiones de 25,4cm de diámetro y 45cm de largo; mientras que las barras de amarre son de 12mm de diámetro y 90cm de largo. Se utilizaron moldes de acero para el encofrado. Los pasadores se colocaron al centro del espesor de las losas, garantizando su horizontalidad mediante jaulas fabricadas para este propósito, engrasándolos convenientemente hasta la mitad. Antes del hormigonado se colocaron los sensores de deformación y de temperatura, de manera que quedaran en las posiciones previstas, embebidos dentro del concreto o en la superficie. En la figura 2.4 se puede apreciar el proceso de hormigonado.



Figura 2.4 Proceso de hormigonado de las losas

El concreto se fabricó para una resistencia a compresión de 35MPa a los 28 días de curado. En la construcción se tomaron muestras de concreto a los 7, 14 y 28 días de curado, en moldes cilíndricos para las pruebas de resistencia a compresión y prismáticos a fin de evaluar el módulo de rotura del concreto (Figura 2.5). La resistencia a compresión resultó con valores superiores a los requeridos en el proyecto, con elevados valores en el módulo de rotura del concreto desde las primeras edades. Durante los 28 días de curado se emplearon dispersores de agua y mantas plásticas para conservar la humedad.



Figura 2.5 Muestras de concreto de sección prismática para la determinación del módulo de rotura.

2.5. Instrumentación de las losas de concreto

La instrumentación se realizó con dos sensores de medición diferentes: medidores de deformación y de temperatura. Los medidores de deformación son galgas extensométricas (strain gauge) con un módulo de deformación similar al del concreto (35MPa) y resistencia nominal igual a 120 Ω . Algunas se colocaron embebidas en el concreto con un factor galga de 2,16 y otras en la superficie con factor galga de 2,23. Los medidores de temperatura son termo-resistencias del tipo PT-100, que son un tipo específico de detector de temperatura RTD (detector de temperatura por resistencia). Los elementos PT-100 están fabricados con Platino, con una resistencia eléctrica de 100 Ω a temperatura de 0 °C.

Para decidir la ubicación de los sensores embebidos y los de superficie se realizó una modelación mediante el software EverFE, para determinar las posiciones críticas de las cargas, es decir, donde se produce la mayor concentración de tensiones.

Las termo-resistencias se instalaron próximas a sensores de deformación ubicados en el centro. Estos sensores fueron instalados a cinco profundidades diferentes en la losa, para obtener un perfil de las variaciones de la temperatura, permitiéndose la considerar el gradiente término como no lineal.

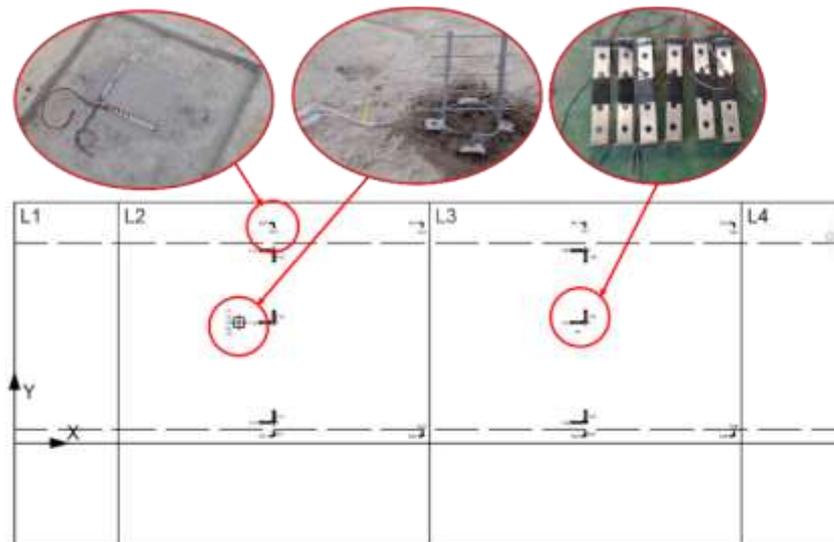


Figura 2.6 Ubicación de los sensores en el experimento

En la instalación de los instrumentos fue necesario conectar el sistema con el adquirente, ubicado en la caseta de mediciones. Luego del hormigonado se midió la resistencia nominal con un multímetro de doble precisión para comprobar la funcionalidad de todos los instrumentos.

Para la adquisición de los datos se empleó un sistema de adquisición modular de National Instruments NI cDAQ-9174 con 6 puertos intercambiables. Se emplearon 3 módulos para las mediciones:

- Un módulo NI 9235 con 8 canales de medio puente para instalar los strain gauge
- Dos módulos NI 9219 de 4 canales de uso múltiple (todas las variantes del puente de wheatstone) lo que permitió instalar 6 sensores de temperatura (5 dentro de la losa y uno en el exterior para medir la temperatura ambiente).

El ordenamiento de los datos adquiridos se realizó mediante interfaces programadas en Labview 2017 con el fin de controlar las tomas de las muestras y generar los reportes en cada caso de estudio.

Los estudios realizados en el tramo experimental comprendieron cuatro fases:

1. Medición de las variaciones de la temperatura en la losa durante el día.
2. Estudio de las tensiones de combado, producidas por los gradientes térmicos producidos en la losa durante el día.
3. Estudio de las tensiones por carga de tráfico.
4. Estudio de los estados críticos de tensiones (tensiones de combado + tensiones por cargas)

2.6. Resultados de las mediciones de temperatura y esfuerzo de combado en la losa

Las mediciones de temperatura se realizaron durante los meses de mayo a junio, en diferentes días de la semana, por 24 horas seguidas, obteniéndose así registros de temperatura a diferentes profundidades de la losa de concreto y su relación con la temperatura medida en el aire, siguiendo los trabajos de Balbo & Severi⁵¹. En la figura 2.8 se muestran las temperaturas medidas en la losa durante el día, a diferentes profundidades (puntos del 1 al 5 de la figura 2.7), además de la temperatura ambiente, lo que representa el patrón diario de temperatura.

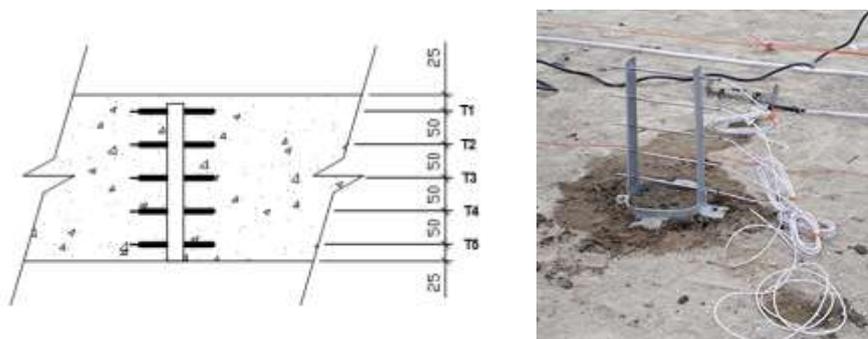


Figura 2.7 Posicionamiento de los sensores en el espesor de la losa

Desde las doce de la noche, hasta las ocho de la mañana no se registran diferencias apreciables en la temperatura ambiente, pero cercano a las dos de la tarde, se incrementa significativamente (30.7°C), volviendo a descender a 24.7°C cercano a las siete de la tarde, hasta 23.4°C después de las diez de la noche, para alcanzar de nuevo la temperatura de la madrugada. Este patrón de temperatura se repite aproximadamente entre los meses de mayo a junio, con valores máximos por encima de 30°C entre la una y dos de la tarde, y los valores mínimos en la madrugada.

Se observa una relación directa entre la temperatura ambiente y la del punto 1, que se encuentra a dos centímetros de la superficie; en el resto de los puntos las temperaturas se van modificando dependiendo también de la influencia de la humedad en la base y de la velocidad de transferencia de temperatura a través del espesor.

Se comprobó que entre las 10 y 11 de la mañana las temperaturas en la superficie y el fondo se igualan, lo que también sucede entre 9 y 10 de la noche, donde no se crean las tensiones de combado, porque el gradiente es igual o cercano a cero, sin embargo, pueden presentarse tensiones de fricción entre losa y cimiento. Precisar este momento es importante ya que al evaluar la influencia de una carga impuesta sobre la estructura en este momento se puede descartar la influencia del gradiente de temperatura.

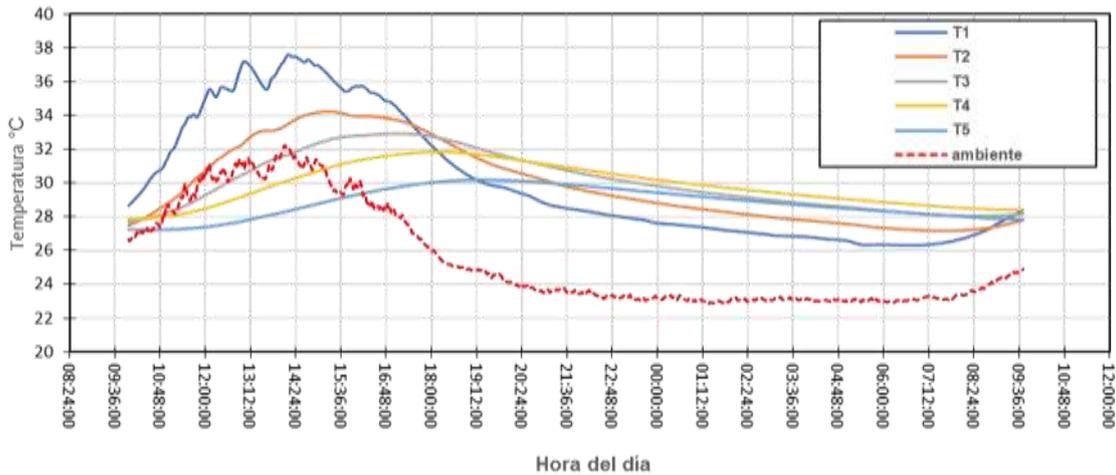


Figura 2.8 Temperatura de la losa de concreto durante las horas del día, a diferentes profundidades en un día típico entre los meses de mayo a junio.

El mayor gradiente de temperatura (11°C) se obtuvo entre la una y dos de la tarde, cuando la superficie se encontraba en 39.5°C y en el fondo en 28.5°C . En este instante se deben registrar las mayores tensiones por combado de la losa, es decir, con una curvatura de la losa de concreto por diferencias de temperatura positiva. Por el contrario, las tensiones de combado por curvatura de la losa de concreto debido a la diferencia de temperatura negativa (nocturno), son muy bajas, ya que cuando la temperatura de la losa en el fondo es mayor (30.9°C), la diferencia entre el fondo y la superficie es de solo 15°C .

En la figura 2.9 se representa el perfil de temperatura a diferentes profundidades en la losa durante el día. La temperatura de la losa, además del ambiente, también es influenciada por la base y por su espesor, de manera que a través de todo el espesor se van produciendo variaciones durante el día. La mayor temperatura en la superficie de la losa (39.5°C) se registró con una temperatura ambiente de 30.7°C , en el momento en que el fondo era de 28.2°C .

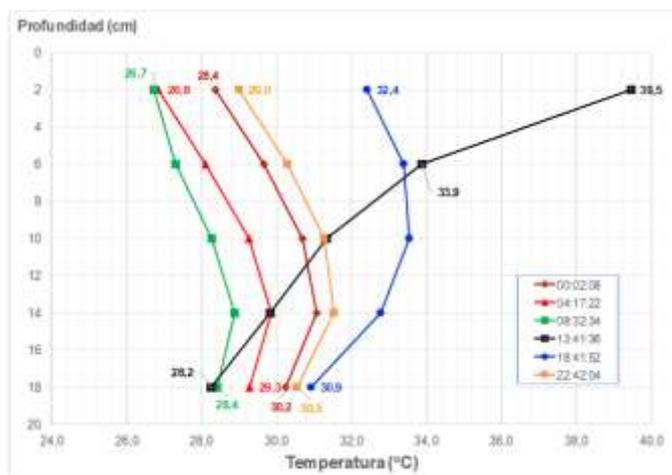


Figura 2.9 Temperatura de la losa de concreto durante las horas del día, y a diferentes profundidades.

La temperatura en el fondo de la losa, medida a los 18 centímetros, no presentó grandes cambios, manteniéndose entre 28.2°C y 30.9°C (diferencia de 2.7°C), lo que evidencia la influencia de las condiciones de humedad en el cemento y la menor influencia del ambiente.

2.7. Estado tensional debido a los gradientes de temperatura

Para evaluar el comportamiento de las tensiones de combado se registraron los gradientes y las deformaciones en un sensor próximo al punto de medición de las temperaturas (coordenadas

3623,2500,20 mm), luego, aplicando la Ley de Hook generalizada se determinaron las tensiones de combado. Obteniéndose una gráfica donde se puede observar el comportamiento de los gradientes y las tensiones representativas de los meses estudiados (figura 2.10).

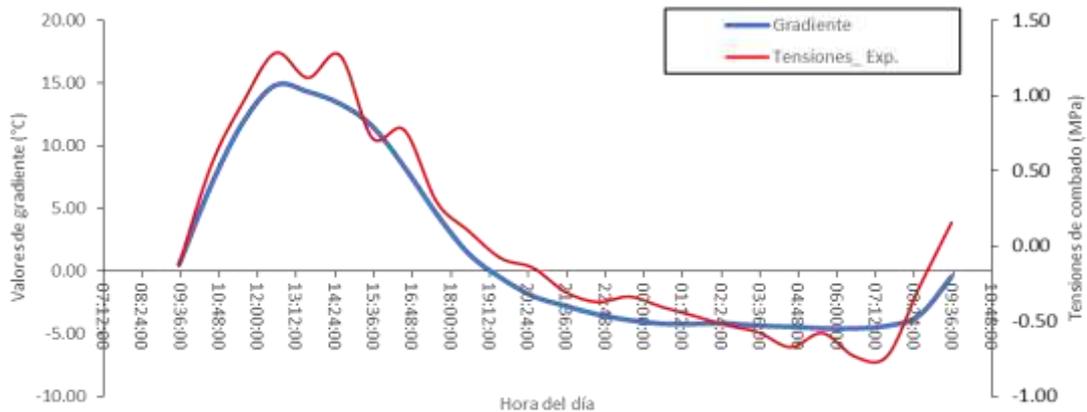


Figura 2.10 Gradientes térmicos y tensiones de combado en la losa de concreto durante las distintas horas del día

1.7 Determinación del estado tensional debido a las cargas impuestas

El estudio de las cargas se desarrolló tratando solo de evaluar el comportamiento de las tensiones producidas por la carga del camión, para ello a partir de los estudios de temperatura se determinó la hora del día donde el gradiente es nulo (9.40 am) para así minimizar los efectos de las tensiones por combado en la losa.

Se evaluaron dos casos; en uno se hace pasar el vehículo pesado a 60cm del borde libre de la losa y en el otro se repite el proceso, pero por el lado que tiene el arcén de concreto. La velocidad de circulación del vehículo fue aproximadamente de 5km/h con el fin de considerar el estudio cuasi estático. El vehículo empleado es un camión modelo VW WORKER 17-22, con una tara de 7.6 ton y una carga neta de material de cantera de 11.27 ton, con un 35% del peso por el eje delantero (eje simple ruedas simples) y el 85% por el trasero (eje simple ruedas dobles).

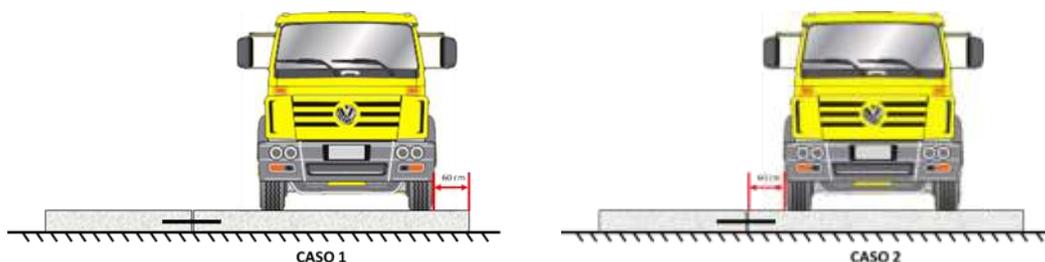


Figura 2.11 Casos de estudio analizados en la prueba de carga

En el instante que transitaba el vehículo por la losa se adquirieron en cada caso las deformaciones de varias galgas extensométricas colocada en la superficie y fondo de la losa, permitiendo así evaluar el efecto que causa la carga en distintos puntos de la losa. En la figura 2.12 se muestran algunos de los resultados de las tensiones obtenidas en la losa durante el día.



Figura 2.12. Tensiones calculadas en la superficie y fondo de la losa durante el día (Caso 1)

CAPÍTULO 3

MODELACION MACRO-MECÁNICA DEL PAVIMENTO DE CONCRETO

3.1 Introducción

Se establecen las consideraciones para modelar numéricamente cada uno de los factores componentes de la relación de tensiones, teniendo en cuenta las particularidades de las invariantes en el proceso de modelación, siguiendo una secuencia lógica. Se creó un modelo en 3D de un sistema de pavimento conformado con dos losas apoyadas sobre un continuo elástico, con el fin de determinar las tensiones que genera el eje de un vehículo cerca del borde de la estructura. También se realizó un modelo numérico axial-simétrico para determinar cuál es el aporte del cemento cuando se utiliza una subbase granular. Además, se reproduce numéricamente en 3D el ensayo para determinar el módulo de rotura del concreto.

Se emplea el Método de los Elementos Finitos (MEF) para la modelación macro-mecánica del pavimento de concreto, utilizando una herramienta de propósito específico para el cálculo de las tensiones (EverFE 2.25) y un software multipropósitos (ABAQUS/CAE, 2014) para la determinación del módulo de conjunto del cemento y la reproducción numérica en 3D del ensayo de módulo de rotura.

3.2 Modelación numérica de las tensiones en el pavimento

Para realizar la modelación numérica se empleó el software EverFE 2.24, herramienta para el análisis de elementos finitos que simula la respuesta de las estructuras de los pavimentos de concreto simple ante las cargas de tráfico y de temperatura. El EverFE es una herramienta utilizada en diferentes investigaciones de pavimentos de concreto, validado por experimentos y resultados de varios autores.

Las simulaciones numéricas con el software permiten replicar numéricamente mediciones experimentales en diversas condiciones de cargas y temperaturas. Los valores de respuesta pueden ser obtenidos en cualquier punto del modelo, de modo que, conociendo la geometría del tramo, así como la ubicación de los sensores, se realiza una simulación numérica para determinar las tensiones y deformaciones en las losas, en los puntos donde se colocaron los instrumentos.

Geometría del modelo: Cada parte componente del tramo experimental fue modelado en 3D aprovechando las posibilidades del software. La geometría se corresponde con la sección del tramo

formado por dos losas con 1.50 y 4.50 m de largo y ancho de carril de 3.50 m, con espesor de 0.25 m; tienen un borde libre y el otro protegido con un arcén de concreto de 1.50 m. Las losas están conectadas con pasadores de acero con una longitud de 450mm y diámetro de 25mm, espaciados a 300mm, para un total de 11 pasadores en la junta transversal y en las juntas longitudinales entre la losa y el arcén se tienen barras de acero de 1000mm de longitud y diámetro de 13mm, espaciados a 900mm. El sistema está apoyado sobre una subrasante natural representada a partir de un semiespacio infinito de suelo, con largo y ancho igual a las losas y de 1.50 m de espesor. Ver figura 3.1.

Modelo de materiales: El modelo constitutivo utilizado por el EverFE, está implementado como medio lineal, elástico e isótropo. La velocidad de aplicación de las cargas y su magnitud, además de la elevada rigidez de la losa, determinan que las tensiones originadas se encuentren por debajo del límite elástico de los materiales, descartando así el fenómeno de plastificación y, por tanto, se caracteriza por la proporcionalidad entre esfuerzos y deformaciones unitarias, donde las constantes de proporcionalidad son el Módulo de Young y la relación de Poisson (E, ν). Las características de los materiales se muestran en la tabla 3.1. En la capa de suelo de cimiento se utiliza el modelo discreto de Winkler, empleando el coeficiente de balasto o módulo de reacción (k). Para evaluar el efecto en losa de la temperatura se establece como variable el coeficiente de dilatación térmica del concreto.

Tabla 3.1. Características de los materiales del tramo experimental considerados en el modelo

CONCRETO	
Módulo de elasticidad(E)	27800 MPa
Coefficiente de Poisson (ν)	0.17
Densidad (γ_c)	2400 kg/m ³
Coefficiente de dilatación térmica	1.1e-005
SUBBASE	
Módulo de elasticidad(E)	120 MPa
Coefficiente de Poisson(ν)	0.35
Densidad seca	1800 kg/m ³

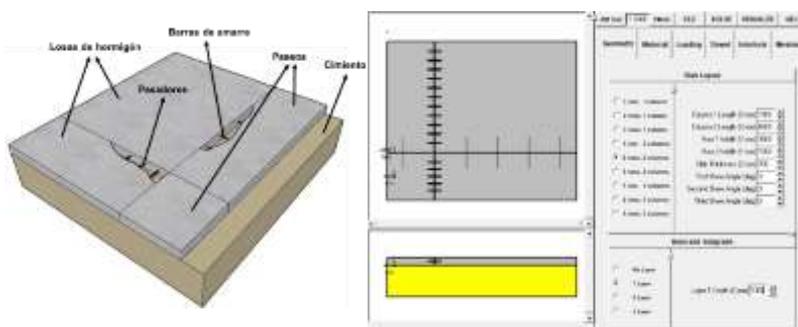


Figura 3.1 Interface con las características geométricas del modelo del experimento

Modelo de cargas: Se asume en el modelo dos estados de carga. Primero, considerando el efecto de la temperatura provocado por un gradiente térmico y segundo, la aplicación de una carga de 135kN causada por un eje simple con ruedas duales. Se utilizó un área equivalente para un par de ruedas



duales, con una presión de contacto de 0,7MPa. Cada rueda produce una huella de 300x180mm y se encuentran separadas a 300mm de centro a centro.

Modelo de las condiciones de borde: El suelo de cemento se representa como un semiespacio infinito, con un dominio de geometría rectangular. Las condiciones de contorno proporcionadas por EverFE son las mínimas requeridas para evitar el movimiento de cuerpos rígidos, pero difieren ligeramente dependiendo de si una capa elástica es considerada como adherida o no. Si es adherida, las losas están restringidas en el plano horizontal x-y por la rigidez a cortante de la base de la losa. El sistema completo está sustentado sobre infinitos soportes elásticos (base Winkler), siempre incorporada por el software bajo la última capa del modelo.

3.2.1 Calibración y validación de los resultados

Los resultados que se obtienen aplicando métodos numéricos son aproximados, por ello deben someterse a un proceso de calibración, proceso compuesto de una calibración matemática y de una calibración física. La calibración matemática garantiza una aproximación adecuada y estabilidad de la solución obtenida, mientras que la calibración física, garantiza que el modelo implementado tenga correspondencia con el fenómeno físico estudiado, para lo cual se necesita de ensayos previos del fenómeno estudiado, a escala real o reducida. Los resultados de las mediciones en el tramo experimental constituyen el modelo físico en este trabajo.

El programa EverFE 2.24 emplea tanto para las losas como para las capas de cemento elementos prismáticos con formulación cuadrática de 20 nodos, para el caso del fondo de la capa de cemento asume un medio discreto de Winkler y para ello emplea elementos cuadrangulares planos de 8 nodos con formulación serendípeta.

No basta con adoptar el tipo de elemento, también es necesario determinar el tamaño adecuado para obtener una buena convergencia con un aceptable costo computacional, aspecto que depende del hardware utilizado. Mallas muy densas implican mejor interpolación numérica, pero una mayor cantidad de elementos en la matriz rigidez, aumentando así número de ecuaciones lineales a solucionar.

Para la selección de la densidad de malla se fue variando el tamaño del elemento respetando las recomendaciones sobre la relación de aspecto^{52,53}. Se varió el tamaño del elemento, utilizando una separación entre nodos desde 50 a 300mm, utilizando como variable de control en cada combinación, la tensión en la fibra más traccionada debajo de la huella ubicada en el borde de la losa. Se obtuvo, además, el tiempo de cálculo y el consumo de memoria de cada una de las variantes. Los resultados se representan en las figuras 3.2a y 3.2b.

En la medida que se refina la malla en la horizontal para la máxima densidad en la vertical se reduce el error hasta un punto donde prácticamente no comienza a variar, encontrándose por debajo del 3% respecto al valor patrón, lo que confirma los criterios de Zienkiewicz & R.L Taylor⁵⁴ respecto al aumento de la densidad de malla, lo que provoca una mayor convergencia hacia la solución hasta un cierto límite donde un aumento en la malla ya no genera cambios en la solución, sin embargo, continua creciendo el tiempo de cálculo. Se decidió que el tamaño de malla a utilizar fuera de 25cm.

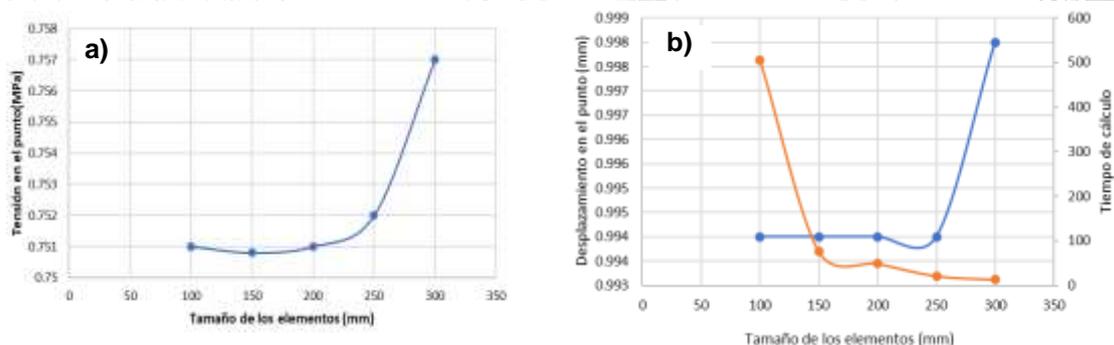


Figura 3.2. a) Variación de las tensiones en función del tamaño de la malla; b) Variación del tiempo de cómputo y desplazamiento en el punto con el incremento en la densidad de malla vertical

Para validar las condiciones preestablecidas en el proceso de calibración matemática, se comparó el modelo numérico, con los resultados del experimento realizado en el tramo de pruebas. Se realizaron dos comparaciones, basadas en las dos pruebas realizadas el tramo a fin de valorar el contraste en los resultados obtenidos.

3.2.2 Validación de las tensiones de combado

EverFE permite la consideración de este importante efecto mediante la especificación de una aproximación bilineal o trilineal a un gradiente no lineal. Los cambios de temperatura se convierten en predeformaciones de elementos equivalentes a través del coeficiente de expansión térmica de la losa, y estas deformaciones se integran numéricamente sobre el volumen del elemento para generar fuerzas nodales equivalentes⁵⁵.

Para validar las tensiones de combado en la losa se replicó la sección del experimento donde están colocados los sensores; sin colocar carga vehicular se fueron variando los gradientes de acuerdo a los resultados de las mediciones horarias de temperatura, determinándose las tensiones de combado en las coordenadas del punto de medición (3623;2500;20). Como criterio de contraste en la validación se tomó el error medio cuadrático (Ecuación 3.1) de las múltiples mediciones

$$\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{Q_{e(i)} - Q_{n(i)}}{Q_{e(i)}} \right)^2}{n_p} \quad \text{Ecuación 3.1}$$

Como se muestra en la figura 3.3, las tensiones calculadas, obtenidas mediante la modelación numérica presentan valores similares a las mediciones del experimento, con un error medio cuadrático porcentual entre las mediciones experimentales y las numéricas del 18.7%, resultado que se consideró adecuado.

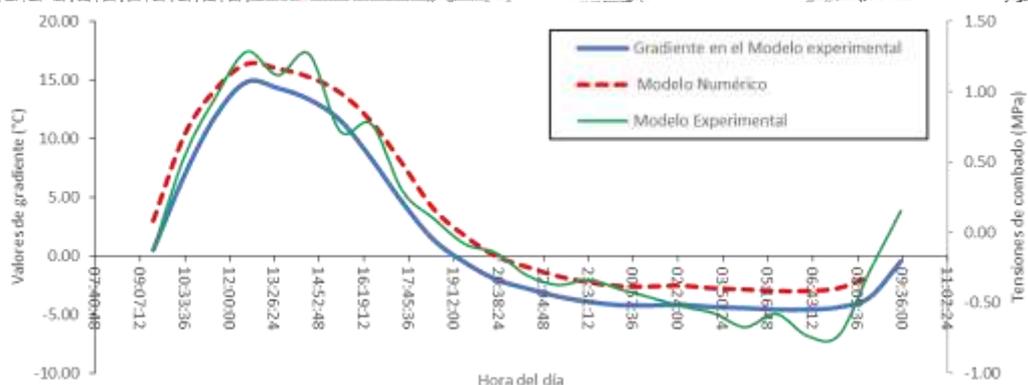
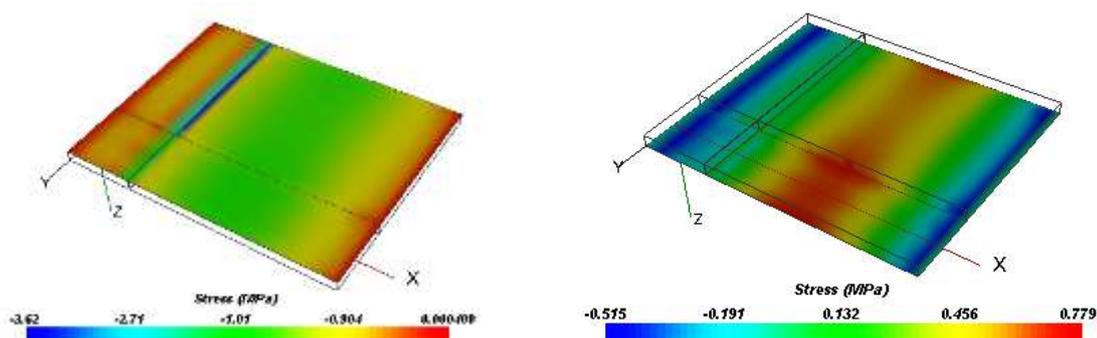


Figura 3.3 Resultado de las simulaciones comparadas con el modelo experimental

La figura 3.4 muestra las tensiones que se crean debido al gradiente máximo, cuando existe una temperatura de 39.5°C en la superficie de la losa y 28.5°C en la parte inferior. Obsérvese que en la parte superior (figura 3.5a) se crean tensiones de compresión en el interior de la losa, en la dirección de X (Sxx) que se van reduciendo hacia los bordes. En la parte inferior de la losa (figura 3.5b), se invierten, ocurriendo tensiones de tracción en el centro que se van reduciendo hacia los bordes.



a). Compresión en la parte superior de la losa b). Tracción en la parte inferior de la losa

Figura 3.4. Tensiones en la losa de concreto por efecto del gradiente máximo de temperatura

a) Validación de las tensiones por carga

Para la validación de las tensiones producidas solo por la carga se coloca en el modelo numérico propuesto la carga del eje trasero del vehículo empleado en el experimento (Figura 3.5). Se realizaron las simulaciones para los dos casos de estudio (sin arcén y con arcén de concreto), analizándose los valores de tensión en las coordenadas donde están ubicados los sensores. La tabla 3.2 muestra estos resultados.

Como se puede observar en los resultados de la tabla 3.2, los errores obtenidos en el modelo numérico, en ambos casos de estudio son cercanos al 10%, lo que puede considerarse un buen resultado desde el punto de vista de aproximación, por lo cual el experimento puede ser replicado mediante el software EverFE, lo que permite que pueda emplearse para otras condiciones en las variables involucradas.

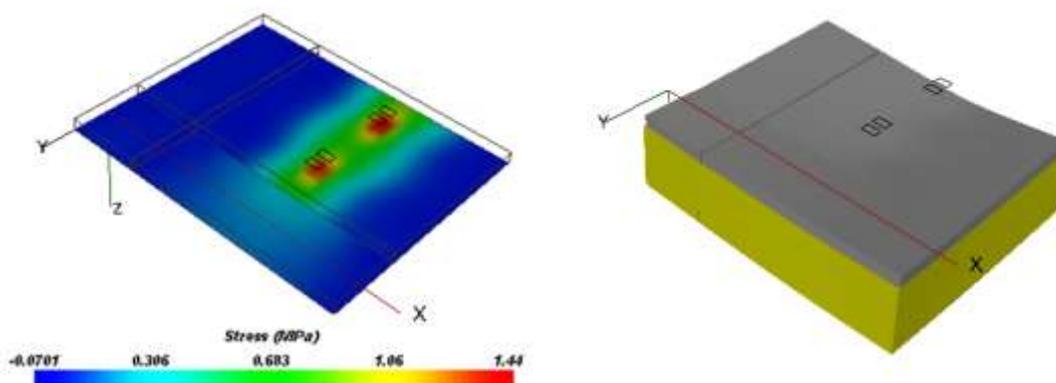


Figura 3.5. Tensiones y deflexiones en el modelo aplicando la carga vehicular

Tabla 3.2 Resultados de la comparación entre el modelo numérico y el experimental

Caso analizado	Marca	Coordenadas relativas (mm)			Tensiones Experimento (MPa)	Tensiones Numérico (MPa)	ER %
		X	Y	Z			
Caso 1	Sx3	3710	3950	200	-0.855	-0.963	7.87
	Sy3	3750	3910	200	-0.458	-0.498	8.83
	Fx3	3623	3550	25	0.912	1.01	10.80
	Fy3	3750	3458	25	0.548	0.619	8.49
Caso 2	Sx1	3710	850	200	-0.364	-0.397	10.01
	Sy1	3750	890	200	-0.015	-0.018	14.03
	Fx1	3623	1050	25	0.581	0.634	11.54
	Fy1	3750	1142	25	0.148	0.158	8.51
ERROR MEDIO CUADRÁTICO (Caso 1)							9.00
ERROR MEDIO CUADRÁTICO (Caso 2)							11.02

3.3 Módulo del conjunto en el cemento aplicando un modelo axial-simétrico

La herramienta numérica empleada en este estudio es el programa computacional (ABAQUS/CAE, 2014) de la compañía Simulia Dassault Systemes Inc. El software constituye una potente interfase gráfica de cálculo y análisis con propósitos generales sobre la base del Método de los Elementos Finitos (MEF). Como antecedentes de su aplicación en el campo de los pavimentos rígidos se puede ejemplificar su uso en los trabajos de varios autores^{55,57,58,59,60, 61}.

En este estudio se modeló el ensayo con placa de carga realizado en el tramo experimental, con el fin de evaluar la influencia del comportamiento mecánico de los materiales componentes de la subrasante y subbase en el módulo resiliente en la superficie. Para la realización del modelo se emplea un modelo axial-simétrico con eje de simetría en el centro de la placa. El modelo se construyó de acuerdo a la teoría de capas elásticas de (Burmister, 1945) siguiendo los criterios del “modelo bicapa con placa rígida de carga”.

El dominio se representa como un semiespacio axial-simétrico de dos capas; la superior correspondiente a una base o subbase de 20 cm de espesor, mientras que la inferior se consideró de espesor infinito. Las dimensiones del dominio se establecieron teniendo en cuenta el criterio de autores

como (Broche, 2005; Cobelo, 2004; Ibañez, 2001; Pérez, 2008) a fin de evitar que la placa cargada no interfiera en el estado tenso-deformacional del medio. Figura 3.6

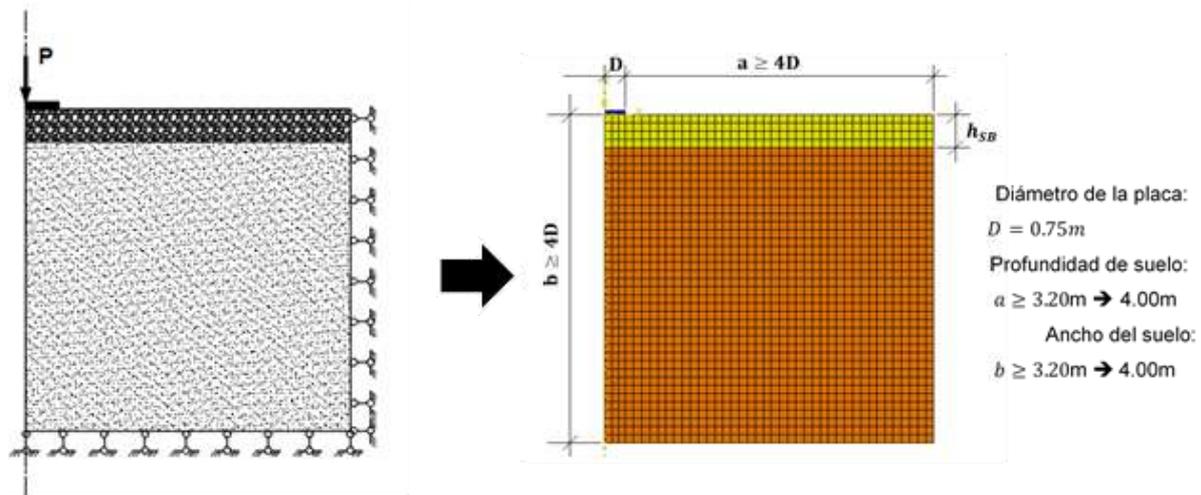


Figura 3.6. Esquema del modelo axial-simétrico.

La carga en el ensayo se aplicó sobre una placa rígida, donde la distribución de presiones no es uniforme y tiende al infinito cuando nos acercamos al borde. Esto se demuestra con la expresión que describe la distribución de presiones para ese caso obtenida por Ullidtz⁶², reflejada también en el libro de Huang⁶³ (figura 3.7). La carga se colocó en un punto de referencia ubicado en el centro de la placa coincidente con el eje de simetría axial y se fue aumentando en forma de rampa con incrementos del 10% del total a aplicar hasta llegar al 100% (0.7 MPa), aproximadamente donde se realizan las mediciones del desplazamiento en dicho punto.

$$q(r) = \frac{qa}{2(a^2 - r^2)^{0.5}} \quad \text{si } r = 0 \therefore q = \frac{q}{2}$$

$$\text{si } r = a \therefore q \rightarrow \infty$$

a: radio de la placa

q: valor medio de la presión.

r: posición del punto en la función

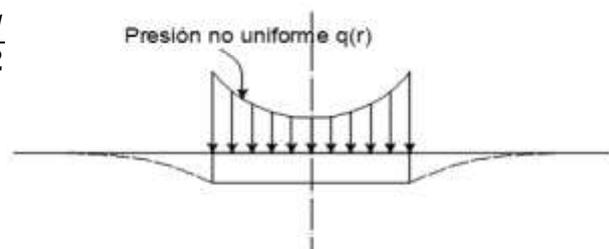


Figura 3.7. Representación del modelo teórico de una placa rígida en el pavimento.

La modelación del material se desarrolló teniendo en cuenta que el módulo en la superficie es un parámetro elástico, tomando un modelo constitutivo lineal elástico con módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson (ν), ambos fueron estimados en función de la clasificación de los suelos de subrasante y subbase a partir de trabajos realizados por (Papagiannakis & Masad, 2008). En la validación del modelo estas propiedades se establecieron según los materiales del ramo experimental. La geometría del dominio fue discretizada con elementos isoparamétrico de 4 nodos con formulación axial simétrica (ABAQUS, 2013), de manera que la mayor densidad de malla se encuentre en las zonas de interés y siguiendo recomendaciones de otros autores^{64,54} referidas a las características que deben cumplir el proceso de mallado de un sólido para evitar errores en la convergencia.

A partir de estudios realizados con anterioridad en estos modelos solo se varió la densidad de malla sin cambiar el tipo de elemento o esquema de integración. Se probaron 10 densidades en la zona de interés, partiendo de una malla gruesa (100 mm) hasta una muy densa (10 mm), en cada caso se extrajo la variable respuesta (desplazamiento en el nodo de control), valores que se contrastaron con la solución analítica de Burmister, para un sistema bicapa con placa rígida ilustrado en el libro de Huang⁶³. Se optó por la densidad de malla del modelo MEF-4 (40 mm), que ofrece un error muy pequeño respecto al “valor de malla más densa” lo que conlleva a una buena aproximación con el mínimo de costo computacional.

3.3.1 Calibración física constitutiva y validación del modelo

El uso de estos valores medios para la modelación computacional al momento de validar la solución experimental trae ciertos errores, ya que las propiedades constitutivas del experimento en realidad no coinciden en la mayoría de los casos con los valores medios. Para ello es que se desarrolla lo que se conoce como calibración física donde se varían las propiedades constitutivas del modelo numérico hasta obtener una respuesta similar a la del experimento, siguiendo la aleatoriedad de las propiedades. En la investigación se realizó un análisis inverso, donde a partir de la ecuación de una superficie de respuesta de un experimento factorial realizado con el valor medio de los módulos de ambas capas y los extremos de sus intervalos de confianza, a fin de obtener la respuesta experimental con las supuestas propiedades constitutivas de las capas. Se empleó el asistente matemático MATLAB R2014b como herramienta para la construcción e interpolación de la superficie de respuesta y obtención de los módulos en el proceso inverso (Figura 3.8).

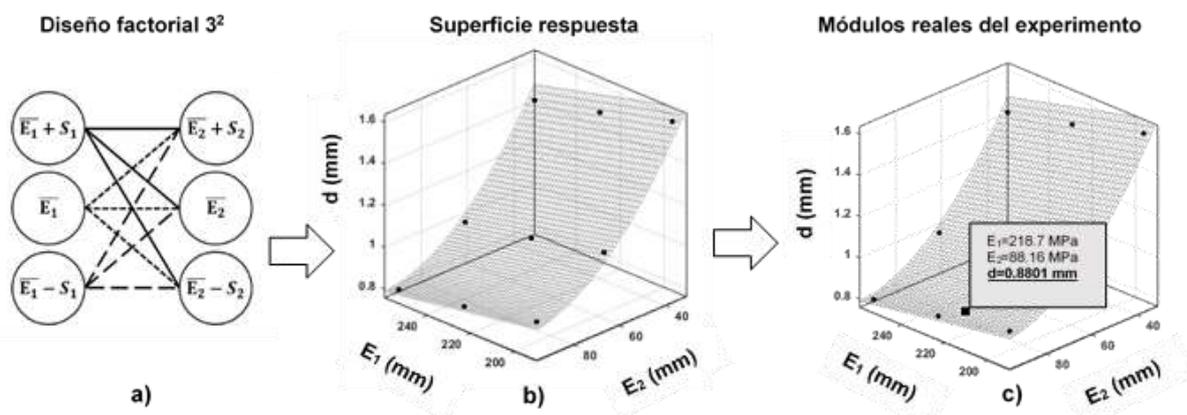


Figura 3.8. Calibración física del ensayo de placa. a) Diseño factorial, b) Superficie respuesta y c) Valores aproximado de los módulos de las capas a partir de la respuesta experimental.

Se comprobó que el modelo calibrado físicamente se comporta de manera similar al ensayo desarrollado en el tramo experimental, por lo que el modelo numérico representa una aproximación fiable de un ensayo estático con placa de carga.

3.4 Modelación numérica del ensayo de módulo de rotura (MR) del concreto

El módulo de rotura del concreto es uno de los parámetros condicionantes en el comportamiento a fatiga de los pavimentos, este se obtiene a través de ensayar a flexión una viga isostática con carga a un medio o a un tercio de la luz (ASTM C78:02). Los resultados del ensayo con carga a un tercio de la luz son los más usados para el diseño de pavimentos.

Modelo geométrico: La modelación computacional del ensayo de flexión en cuatro puntos considera dos elementos: vigas de concreto simple y mecanismos para la transmisión de carga. Las dimensiones de los elementos empleados en el estudio se tomaron en función de unos experimentos realizados en la Universidad de São Pablo (USP), los cuales se emplearon en el proceso de calibración y validación del experimento numérico (figura 3.9). Los detalles del experimento se encuentran en el trabajo desarrollado por Cervo⁶⁵.

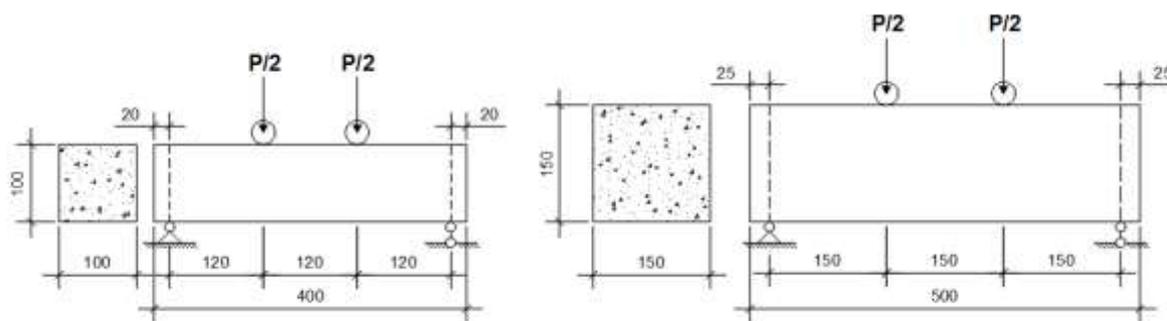


Figura 3.9. Representación geométrica de los ensayos realizados⁶⁵

Modelo de cargas y condiciones de contorno: La carga en el modelo se situó partiendo de las consideraciones establecidas por la norma (cargas puntuales a un 1/3 de la luz). Para lograr que la carga sea transmitida a los cilindros se colocó un punto de referencia en el medio y sobre el punto se le aplicó una restricción del tipo “equation constraint” la cual provoca que la carga que se le suministre al punto de referencia sea transmitida hacia los cilindros metálicos de igual forma. Se incrementa progresivamente por pasos hasta la rotura del material.

Las condiciones de contorno se colocaron tratando de representar físicamente lo que sucede durante el experimento.

- Para simular las condiciones isostáticas de la viga se restringe en uno de los apoyos tres grados de libertad en desplazamiento en la dirección de X, Y y Z respectivamente y el otro solo en la dirección de Z a fin de simular un simple apoyo.
- Con el fin de evitar posibles torsiones en el modelo por concepto de la interacción rodillo-viga se realiza un plano longitudinal de partición donde se restringe la dirección perpendicular a dicho plano, de igual forma se realiza una partición con un plano central realizando el mismo proceso.
- En el caso del rodillo se le restringen las dos direcciones ortogonales a la dirección de aplicación de la carga con el fin de evitar que estos se corran de su posición.

Modelación del concreto: En el proceso de modelación de geomateriales, en particular del concreto, hay que tener en cuenta una serie de aspectos relacionados con su comportamiento bajo diferentes estados tenso-deformacionales. En el caso de la investigación en el ensayo se lleva el concreto hasta

el fallo, por eso para la simulación del concreto en la etapa no lineal ha sido utilizado el Modelo de Daño Plástico^{66,78, 79, 52}. Este modelo se encuentra actualmente implementado en el código ABAQUS/CAE⁶⁷, considera los fenómenos más importantes del concreto basados en los principios teóricos del Modelo de Mohr-Coulomb Modificado. Siendo además creado para estudiar los efectos de daños irreversibles asociados a los mecanismos de fallas, que ocurren en el concreto, fenómeno coincidente con el ensayo tratado (figura 3.10).

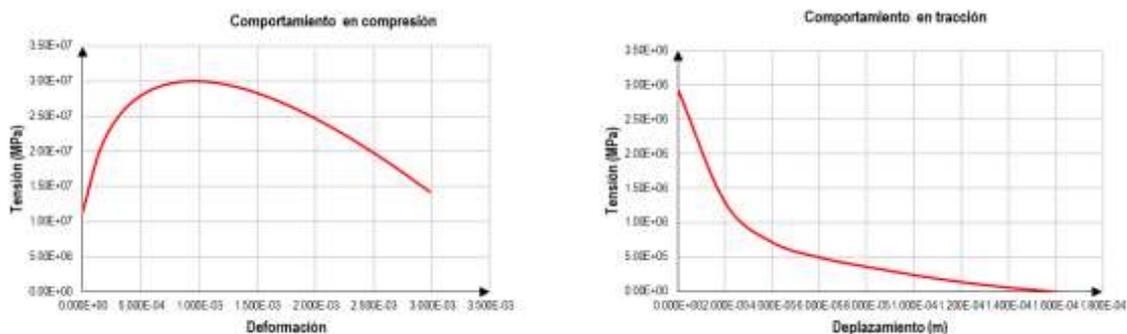


Figura 3.10. Curvas de comportamiento del concreto.

3.4.1 Modelación del transmisor de Cargas

El transmisor de carga fue modelado como un material ficticio con módulo de elasticidad 10 veces mayor que el del concreto para garantizar que cuando sea aplicada la carga este no se deforme y provoque tensiones ajenas a las que se desean para el ensayo.

3.4.2 Calibración matemática

Se hizo estudio para la selección del tipo de elemento finito y al mismo tiempo la densidad de malla más conveniente, capaz de representar con la mayor aproximación el verdadero comportamiento físico de la estructura. Para tal propósito se realizó un diseño multifactorial donde se variaron indistintamente cinco densidades de mallas con los tres tipos de elementos finitos (Figura 3.11).

Los modelos para el estudio fueron sujetos a las mismas condiciones de borde, magnitud de la carga, así como propiedades físicas de los materiales. Independientemente de que la combinación de elemento y densidad sean diferentes. Se tomó como referencia la carga de rotura obtenida en el ensayo experimental y las obtenidas utilizando las diferentes configuraciones, verificando los resultados en el punto de control.

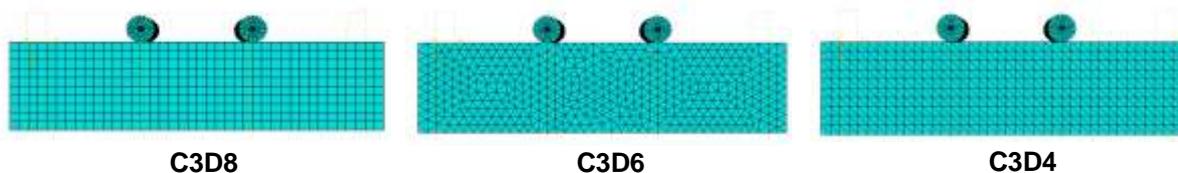


Figura 3.11. Mallado con distintos tipos de elementos finitos.

Cuando se incrementó la densidad de malla en todos los casos el error se redujo, siendo la densidad de 10 mm la de menor error. Eso corrobora lo planteado en el libro de Zienkiewicz & R.L. Taylor⁵⁴,



respecto a que cuando se disminuye la separación entre los nodos la solución numérica tiende a acercarse a la analítica, nombrando este proceso como convergencia numérica. Por otra parte, se puede observar que el elemento C3D4 como plantean en sus trabajos⁵⁴, es el que más rápido converge a la solución, pero a cambio de ello genera un número elevado de elemento que conduce a costo computacional también elevado.

3.4.3 Calibración física y validación de los resultados

En el experimento (V-I) y (V-II) de Cervo⁶⁵ no se contó con una caracterización completa del comportamiento del concreto, pero se tienen datos de la variabilidad del mismo, empleados también, en una pista de ensayo de Universidad de São Pablo^{51,80}. Los resultados de la resistencia media a compresión fueron de 33.15 MPa con un coeficiente de variación del 15% lo que estadísticamente representa una desviación de 4.97MPa (tabla 3.3).

Partiendo de estos datos, calibró el modelo constitutivo elasto-plástico a partir de generar curvas de daño plástico con el valor medio y los extremos del intervalo de la resistencia a compresión del concreto y con ello determinar la tensión de rotura como variable respuesta.

Con los resultados, mediante un análisis inverso se estima la posible resistencia a compresión del experimento y con ello construir las posibles curvas que describen su comportamiento en la etapa elasto-plástica.

Tabla 3.3 Resultado de las simulaciones realizadas a partir de la resistencia compresión

Característica del concreto	$f'c_{m-\sigma}$	$f'c_m$	$f'c_{m+\sigma}$
Resistencia a compresión (MPa)	28.18	33.15	38.18
Módulo de rotura (MPa)	4.42	4.59	4.89

Se obtuvo del ajuste una ecuación cuadrática que permite con el valor de módulo de rotura del experimento (V-I) (4.8 MPa) obtener como resultado el intervalo de confianza de la resistencia a compresión.

$$M_r = 0.0027(f'c)^2 - 0.1312(f'c) + 5.9896 = 4.8MPa \quad \text{solución} \rightarrow \begin{pmatrix} 36.5322MPa \\ 12.0604MPa \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

El experimento (V-I) se estima que haya tenido una resistencia de 36.5 MPa. Para validar el análisis se generaron sus curvas correspondientes en compresión y tracción y se simuló el ensayo (V-I) con esas condiciones comparándolo con los resultados obtenidos en el experimento real, además con esas mismas condiciones se simuló también el ensayo (V-II), el cual tiene como particularidad que cambia el tamaño de la probeta.

En la tabla 3.4 los valores ya calibrados ofrecen errores aceptables, ya que en el caso más lejano cuando se cambia la dimensión de la probeta, los errores están en el orden del 5 %. Partiendo de estos resultados se da por validado el modelo numérico para representar el ensayo de la investigación.

Tabla 3.4. Validación de los resultados contrastados con los dos experimentos

Módulo de rotura (MPa)			Con simulación simple		Con simulación calibrada	
Experimental	simulación simple	simulación calibrada	Error absoluto (MPa)	Error Relativo (%)	Error absoluto (MPa)	Error Relativo (%)
Probetas 100x100x400 mm (V-I)						
4.80	4.59	4.81	0.21	4.38	0.01	0.21
probetas 150x150x500 mm (V-II)						
4.87	4.27	4.62	0.6	12.50	0.25	5.21

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS PARAMÉTRICO PARA LA DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE EJES ADMISIBLES POR FATIGA DE LA LOSA DE CONCRETO

4.1. Introducción

El procedimiento de diseño propuesto, al igual que el método de la PCA, se basa en calcular la sumatoria de daño que producen las solicitaciones consumidoras del potencial de fatiga en la losa, durante un periodo de tiempo determinado. El porcentaje de fatiga de cada solicitación se calcula como la relación entre las repeticiones esperadas y las admisibles.

El número de repeticiones admisibles en la losa es dependiente de la relación entre la tensión de trabajo de la losa de concreto y de su resistencia a flexo-tracción. En la tensión de trabajo (σ_i) de la losa influye la carga que recibe, su geometría y los materiales que componen el sistema.

Se incluye en el procedimiento como se puede estimar el aporte de resistencia que se obtiene con el uso de subbase granular y la utilización de la confiabilidad como variable en el diseño, a través de un modelo matemático probabilístico. Además, se analiza como considerar el módulo de rotura (M_R) del concreto, a partir de su resistencia a compresión, utilizando técnica de simulación estocástica.

Tensiones de trabajo para el cálculo de fatiga

El carácter heterogéneo y aleatorio de los parámetros que intervienen en las tensiones que se producen en la losa ha conllevado a utilizar modelos de comportamiento en condiciones específicas de trabajo para poder determinar el valor de estas tensiones.

Geometría de la losa.

En la geometría se tuvieron en cuenta dos factores, el espesor y la rectangularidad de las losas. El espesor de losa usualmente varía entre 120 y 200mm. La rectangularidad se establece como la relación entre el largo (l) y el ancho de losa (l_c). En un estudio factorial se varió el ancho de carril desde 3,0 a 3,75m y longitud de losa de 3 a 6m, obteniéndose en cada caso las tensiones de tracción en el punto crítico. Los resultados se muestran en la figura 1.15. Las condiciones invariantes del experimento fueron: Resistencia a compresión del concreto ($f'_c=30$ MPa), Espesor de losa de 200mm, Módulo resiliente del cemento $E = 50$ MPa y carga por eje simple de 100kN con presión de contacto de 0,7MPa.

En la figura 4.1 las tensiones van decreciendo en la medida que aumenta la rectangularidad, sin embargo, las diferencias no superan el 5% de error, lo que puede considerarse un efecto de bajo impacto y permite tomar dimensiones fijas dentro del intervalo estudiado.

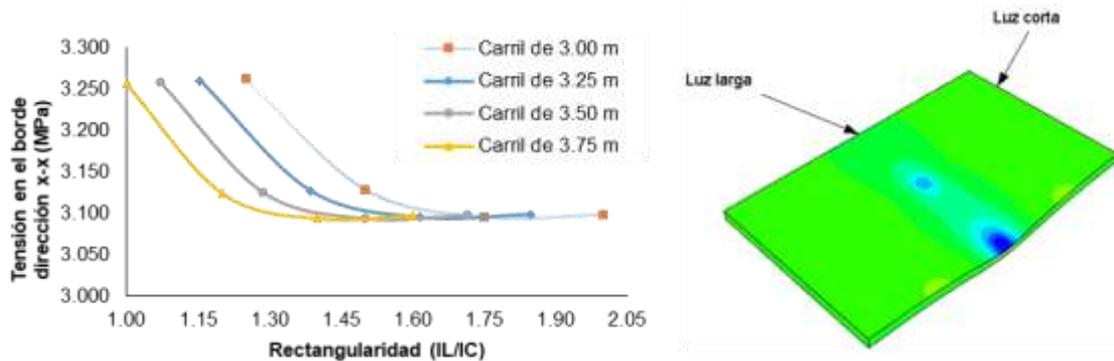


Figura 0.1. Variación de las tensiones según la rectangularidad de la losa.

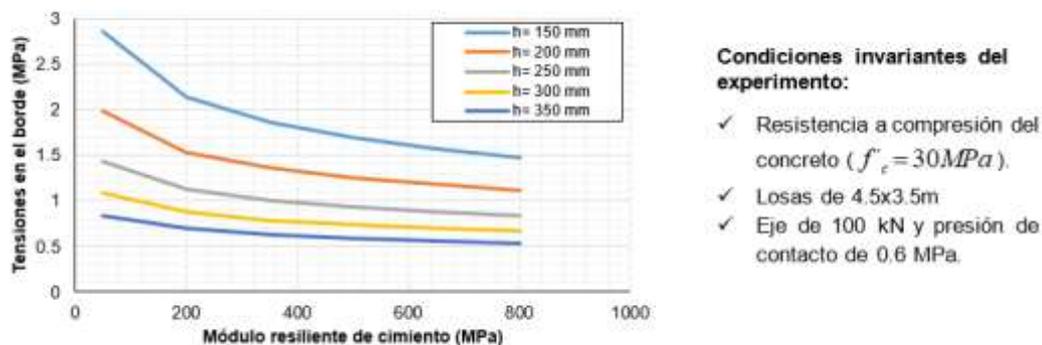
4.1.1. Materiales del sistema

- **Resistencia a compresión del concreto hidráulico**

El concreto para pavimentos rígidos puede tener una resistencia a compresión (f'_c) a los 28 días, entre 20 y 50MPa. En una prueba de significancia, el parámetro resistencia a compresión a los 28 días presentó un p-valor mayor a 0,05, por lo cual no es estadísticamente significativo, para un nivel de confianza del 95,0%. Se tomó entonces como resistencia a compresión (f'_c) a los 28 días un valor fijo de 30MPa ($E=26000$ MPa, $\nu=0.17$).

- **Calidad del cimientó**

El Módulo Resiliente en el cimientó del pavimento de concreto se halla entre 50-800MPa, si se considera la utilización de material de subbase o de base. En las pruebas se comprobó que a calidades altas del cimientó (por encima de 350 MPa), se observa que este influye poco en las tensiones, corroborando lo referido por autores e instituciones (AS3600⁶⁸, Austroads⁶⁹, León⁷⁰, Yoder & Witczak⁷¹). Cuando se utiliza un material granular, encima de la subrasante, aunque no se persigue un fin estructural, sin embargo, se mejora ligeramente el comportamiento del sistema.



Condiciones invariantes del experimento:

- ✓ Resistencia a compresión del concreto ($f'_c = 30MPa$).
- ✓ Losas de 4.5x3.5m
- ✓ Eje de 100 kN y presión de contacto de 0.6 MPa.

Figura 0.2 Influencia en las tensiones del Módulo Resiliente del cimientó y del espesor de losa.



- **Empleo de subbase granular no aglomerada**

Para estimar el módulo de superficie en el cimiento, cuando se emplea una subbase granular como mejoramiento de la subrasante natural, se realiza un estudio multifactorial general que combina indistintamente las resistencias de la subrasante y la calidad y el espesor de la subbase utilizada. La calidad del suelo de subrasante se varió desde 20 hasta 160MPa (CBR de 2-16%). Para la subbase se emplearon calidades entre 160 y 500MPa (CBR de 16-50%). Los espesores de subbase utilizados son de 15, 20, 25 y 30cm, para un total de 320 simulaciones numéricas. Los módulos y coeficientes de Poisson se han tomado de la AASHTO⁷²

Se construyó, tomando el resultado de las diferentes simulaciones, un modelo de regresión múltiple que permite estimar el módulo de soporte efectivo del cimiento a partir de conocer la calidad de las capas subyacentes. El modelo obtenido responde a la siguiente ecuación matemática:

$$E_{superficie} = -34.2483 + 1.24472 \cdot E_{sr} + 0.121038 \cdot E_{sb} + 0.122114 \cdot h_{sb} \quad (0.1)$$

Donde las variables independientes son: los módulos de la subrasante (E_{sr}) y de subbase (E_{sb}) y el espesor de subbase (h_{sb}). Se obtuvo un coeficiente de determinación R-cuadrado de 98.23%, realizándose previamente una prueba de significancia de cada uno de los parámetros, donde el p-valor es menor que 0,05, por lo que todos los parámetros del modelo son estadísticamente significativos para una probabilidad del 95%.

4.2. Análisis del tráfico.

Las cargas que fueron aplicadas en el modelo son: un eje simple de 100kN y un eje tándem 180kN, colocados ambos en borde de la losa. Estas condiciones específicas son corregidas por factores de equivalencia que tienen en cuenta el efecto del peso del eje y su posición en el pavimento.

- **Factor de ajuste por efecto del peso del eje (f_p):** Se determina a partir de la relación entre la tensión que ocasiona un eje de determinado peso (σ_i) y la originada por el eje referencia (σ_e). Para definir esta relación primero se demostró que la tensión solo es afectada significativamente por el efecto de la carga, se realizó entonces un estudio factorial 3^3 combinando espesores y calidades de los materiales del sistema (resistencia a compresión del concreto y módulo resiliente en el suelo) teniendo como variable de respuesta la relación de tensiones entre un eje de 82kN y 100kN.

Ajuste de las tensiones teniendo en cuenta la posición de la carga: Los ejes de los vehículos se mueven con la parte exterior de sus ruedas sobre una franja aproximadamente de 60cm de ancho respecto al borde. En el método de diseño de la PCA se asume el 6% de camiones circulando dentro de esta franja, por lo que se emplea un factor de reducción de las tensiones en el borde teniendo en cuenta la distancia y la probabilidad ($f_d = 0.896$).

En un estudio dentro de la investigación se determinó la probabilidad de ocurrencia de los vehículos pesados que circulan dentro la franja, haciendo determinaciones en tres vías de dos carriles, que presentan el mismo ancho de carril. En cada muestra se midieron las distancias en que circula cada vehículo desde el borde, determinándose con ello la frecuencia dentro de la sección transversal. Los resultados se muestran en la figura 4.3.

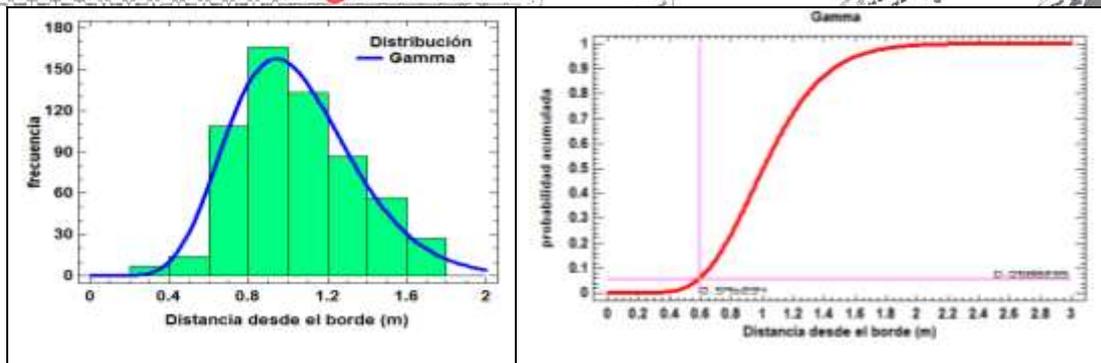


Figura 0.3 Histograma de frecuencias y frecuencias acumuladas de la posición de los camiones desde el borde de la calzada como resultado de mediciones en tres vías de dos carriles

Como se observa en el gráfico de frecuencia acumulada, para la distancia de 60cm desde el borde, la probabilidad de camiones dentro de la franja es de 5.96%, resultado que confirma los valores de la norma de la **PCA**⁷³. El coeficiente de reducción de tensiones por la posición de la carga es $f_p=0.890$.

Tensiones equivalentes

Como resultado de la modelación del pavimento de concreto simple, se obtuvieron las tensiones que se originan en los bordes de la losa, con y sin paseo de concreto, aplicando una carga de un eje simple con ruedas duales de 100kN y en un segundo caso un eje tándem de 90kN sobre el borde del pavimento. Mediante un experimento multifactorial general, combinando espesores de losas entre 12 y 35cm, con módulo resiliente del cemento entre 20-500MPa, se construyeron tablas para ejes simples y tándem que permiten determinar las tensiones equivalentes en las losas, con y sin arcenes de concreto.

4.3. Estudios sobre la relación entre el módulo de rotura y resistencia a compresión del concreto mediante simulación estocástica

La simulación computacional del ensayo de flexión permitió el estudio de la relación entre la resistencia a compresión y el módulo de rotura del concreto. Con el propósito de establecer dicha relación se combinó la generación sintética de tres poblaciones de resistencias a compresión de 20, 25 y 30MPa. Se obtiene la relación matemática entre módulo de rotura y resistencia a compresión teniendo en cuenta inicialmente las variables de entrada deterministas y luego estocásticas, para finalmente realizar los ajustes numéricos y estadísticos a fin de obtener una ecuación para el uso en la práctica profesional.

La resistencia del concreto en carreteras a los 28 días de curado, según Anguas, López, & Martínez⁷⁴, Kraemer & Val⁸¹, Mallick & El-Korchi⁷⁵, se encuentra entre 25 y 50MPa. La variable de respuesta se toma como la capacidad de carga de la viga definida a partir de la carga (P) que provoca el momento de rotura, igual al momento de fisuración. Se generaron para cada resistencia las propiedades elasto-plásticas (curvas de comportamiento en compresión y en tracción), usando las ecuaciones y modelos teóricos, para simular el ensayo de flexión en vigas de (100x100x400 mm). En la figura 4.4 se representa el comportamiento numérico del ensayo de flexión pura, lo que evidencia el crecimiento de los valores de carga límite con el incremento de la resistencia.

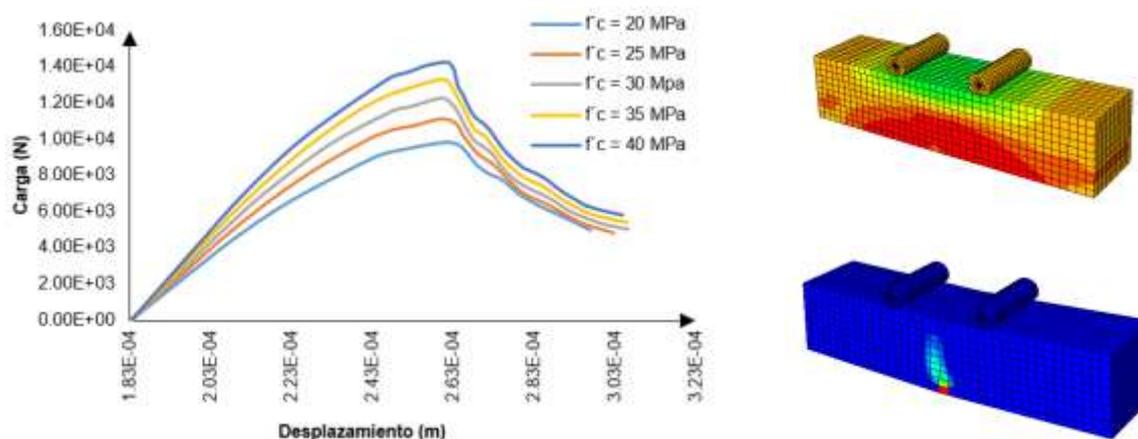


Figura 0.4 Comportamiento numérico del ensayo de flexión con la resistencia a compresión.

- **Influencia de las dimensiones del espécimen**

Existe diferencia entre el módulo de rotura en una viga y el de una losa de pavimento; por lo que se varió el tamaño de las vigas en 2 niveles, variando su luz libre entre 400-500mm. Según los conceptos de fractura a mayor el tamaño de un espécimen para la misma sección transversal se liberará más energía de fractura, por tanto, menor resistencia; también aumenta la deflexión.

- **Relación entre módulos de roturas y resistencia a compresión**

En el estudio se tomó como referencia la expresión más empleada por la bibliografía:

$$M_R = a_1 \sqrt{f'c} \quad (0.2)$$

Donde: $f'c$ es la Resistencia a compresión del concreto a los 28 días, M_R es el Módulo de rotura y a_1 el coeficiente experimental.

El coeficiente experimental se determina mediante simulación numérica del ensayo a flexión, realizado en dos etapas: un análisis determinista y otro análisis pseudo-estocástico.

a) Análisis determinista

Se generaron en el concreto las propiedades elásticas y sus respectivas curvas de comportamiento, para resistencias a compresión de 20, 25, 30, 35 y 40 MPa. Como variable de control se tomó la carga última con la que posteriormente se determinaron los módulos de rotura.

Se realizó una regresión no lineal empleando la expresión 3.2 como referencia. Los resultados se ajustan a una función potencial con un coeficiente de regresión $R^2 = 0,9918$ y un error medio absoluto de 0,03439. El modelo matemático ajustado es:

$$M_R = 0.6824 \sqrt{f'c} \quad (0.3)$$

Las propiedades físico-mecánicas de los concretos tienen cierta aleatoriedad caracterizada estadísticamente por distribuciones de probabilidad lo cual, no ofrece un resultado absoluto. Por ello es conveniente realizar un análisis estocástico para determinar el coeficiente a_1 .

b) Análisis estocástico



Este análisis se realizó con datos experimentales de ensayos a compresión a los 28 días realizados en probetas de 20, 25 y 30MPa, con datos de un período de cinco años. Se analizaron múltiples lotes agrupando los que tuvieran igual número de muestras, se filtró y caracterizó estadísticamente las poblaciones, utilizando una distribución normal.

Se generaron muestras sintéticas empleando generadores de números aleatorios, tomando como base la función densidad de cada población, que fueron comprobados y validados para el experimento. Los datos generados posteriormente fueron remuestreados empleando el muestreo aleatorio simple con el fin de reducir el número de simulaciones. Finalmente, a cada valor se les generaron las propiedades elasto-plásticas empleando el mismo procedimiento descrito. Se obtuvo un valor del coeficiente $a_1=0.6772$ con un ajuste del 98.57% ($R^2=0.9857$).

4.4. Modelo probabilístico para la determinación del número de repeticiones permisibles por fatiga en un pavimento de concreto simple

La gran variabilidad que se observa entre los modelos de fatiga obtenidos por diferentes autores, implica que adoptar una determinada ley puede llevar a un diseño no adecuado en determinadas condiciones. Con la información de diferentes leyes desarrolladas por distintos autores, obtenidas en pruebas en laboratorio con vigas o en tramos experimentales, se confeccionó un modelo probabilístico. Titus-Glover, Mallela, Darter, Voigt, & Waalkes⁷⁶, crearon un modelo probabilístico para el software StreetPave12⁷⁷.

Para obtener los coeficientes del modelo se realizó un análisis de supervivencia, que consiste en un conjunto de técnicas que permiten estudiar la variable tiempo hasta que ocurre un evento y su dependencia de otras posibles variables descriptivas. Tomando como referencia las investigaciones desarrolladas por (Parker Jr, Barker, Gunkel, & Odom, 1979), (Titus-Glover et al., 2005) y (Salsilli Murua, 1991), que permite determinar el número de repeticiones hasta el fallo, y que introduce el concepto de confiabilidad en el diseño.

En el estudio se evalúa la variable tiempo en función del número de repeticiones ya que ambas tienen relación directa. Se le dan dos status a cada caso, fallo (1) y no fallo (0), este último considerado como valor censurado en el estudio. Del análisis de las distribuciones, mediante el uso de gráficos teóricos de probabilidad (figura 1.19), que representa la función de densidad teórica linealizada, se comprobó que la función de densidad que brinda el mejor ajuste es la Normal, por tanto, se seleccionó para construir las curvas de supervivencia acumuladas.

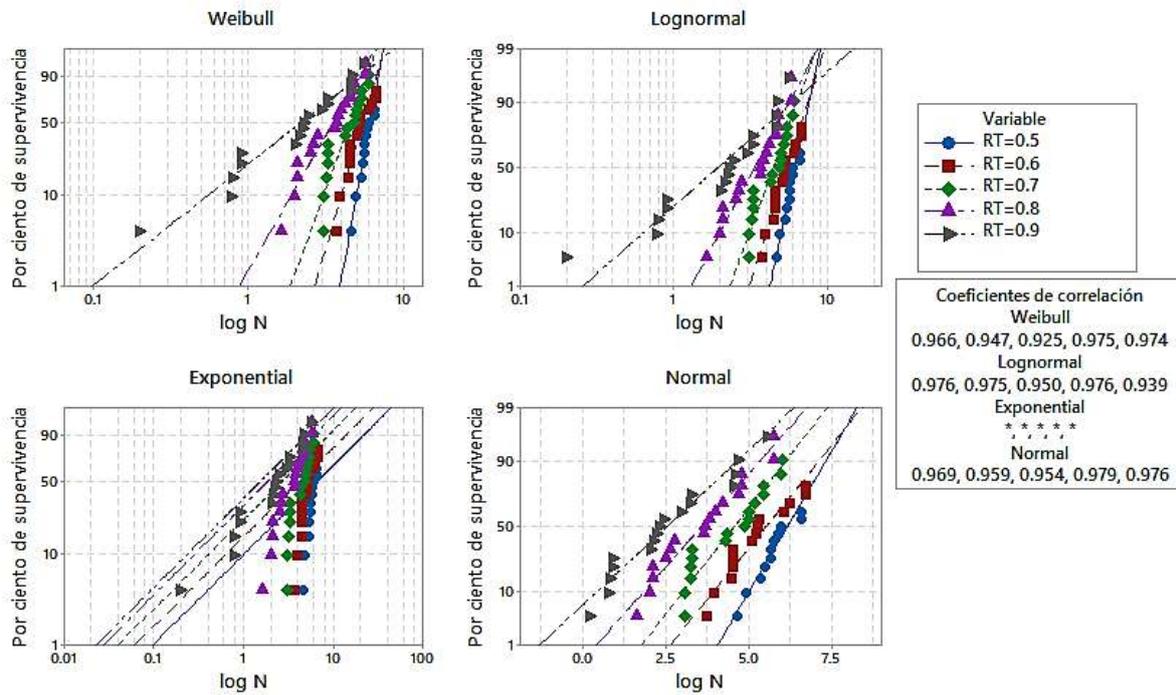


Figura 0.5 Resultados de las funciones teóricas linealizadas con sus respectivas medidas de ajuste.

Con la obtención de las curvas de número de repeticiones contra el porcentaje de supervivencia acumulado, en cada relación de esfuerzo, se puede construir la superficie respuesta $\zeta(RT, S, \log N)$, denominándose S a la probabilidad de fallo. Luego de estimar los coeficientes y realizar las transformaciones necesarias, el modelo probabilístico queda de la siguiente forma:

$$\log N_f = \left[\frac{-RT^{-10.08} \cdot \log(S)}{0.0108} \right]^{0.205} \quad (0.4)$$

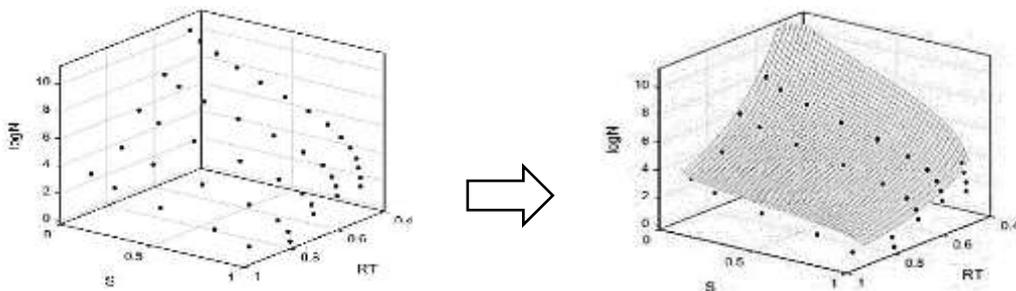


Figura 0.6 Superficie respuesta resultante de combinar relación de esfuerzo, número de repeticiones de carga y probabilidad de fallo.

En la validación se verificó la familia de curvas, derivadas de la expresión obtenida y el modelo propuesto es capaz de predecir el mismo número de repeticiones que el modelo de la PCA cuando la probabilidad es del 80% en un intervalo de relación de tensiones entre 0.55 y 0.8.



CAPÍTULO 5

DESARROLLO DE TECNOLOGÍAS DE AVANZADA PARA LA MODELACIÓN MICRO-MECÁNICA DE PAVIMENTOS RÍGIDOS.

5.1. Introducción

El desarrollo de la mecánica computacional no ha estado ajena al desarrollo de la modelación micromecánica de los concretos de cemento portland o asfálticos. En este sentido se pueden encaminar los estudios en dos direcciones generales para modelar el comportamiento tensión-deformación del concreto (base cementicia o asfáltica) para pavimentos: la modelación continua (macroscópico) y un enfoque micromecánico (continuo o discreto). Los enfoques de modelación continua (macroscópico) combinados con las técnicas experimentales para calibrar y validar los modelos numéricos (lo que garantiza la fiabilidad de los modelos numéricos), ya han sido ilustrados en los capítulos anteriores. Como ya se demostró en estas investigaciones, con este enfoque se han efectuado readecuaciones al método de diseño de pavimentos rígidos de la PCA.

El futuro de la mecánica computacional de pavimentos flexibles y rígidos debe estar orientada al desarrollo de métodos de diseño empírico-mecanicistas, donde se combinen técnicas de modelación micromecánica (continuas o discretas) con técnicas experimentales para lograr esta finalidad. Esta combinación garantiza un acercamiento a la naturaleza discreta y micromecánica de los concretos, su naturaleza estocástica, modelación multi-escala a nivel de detalle morfológico y garantiza una disminución de los costes de investigación, lo que conduce al desarrollo de nuevos métodos de diseño o al perfeccionamiento de los existentes, evidenciando la necesidad de desarrollar tecnologías de avanzada para su modelación.

5.2. Aspectos generales de modelación micro-mecánica de concretos de matriz cementicia empleado en pavimentos rígidos.

Los esfuerzos realizados en temas de modelación micro-mecánica del concreto para pavimentos, en las últimas décadas se pueden resumir de la siguiente manera:

- Para construir la microestructura digital de la mezcla de concreto, se han utilizado dos tipos de enfoques: los modelos hechos por el usuario y los modelos basados en captura y procesamiento de imágenes. Algunos de los ejemplos de los modelos creados por el usuario son:
 - a) los sólidos distribuidos y conformados aleatoriamente⁹⁵⁻⁹⁶
 - b) partículas elípticas generalmente rodeadas por aglutinante^{95,97}
 - c) estructura de granos orientada aleatoriamente, construida utilizando un enfoque de diagrama de Voronoi^{95, 98,99}.
 - d) modelos basados en la captura y procesamientos de imágenes, construidos a partir de las imágenes de la mezcla de concreto para pavimentos, que se pueden capturar desde una cámara digital^{95,100}, un escáner^{95,101}, o Tomógrafo de rayos X^{95,102,103}
- Para simular las interacciones en las microestructuras del concreto, se han desarrollado diferentes modelos mecánicos que incluyen:



- a) los modelos elásticos^{95,96}
 - b) los modelos visco-elásticos lineales y no lineales,
 - c) los modelos basados en teoría de daño y
 - d) los modelos visco-elasto-plástico,
- Los modelos de elementos finitos desarrollados se han utilizado para:
 - a) predecir comportamiento (rigidez) del concreto
 - b) investigar la distribución de deformaciones localizadas^{95,102-104}
 - c) estimar la anisotropía en el comportamiento (rigidez)^{95,100} y simular comportamientos de daño.

El objetivo de esta etapa de la investigación es progresar en el desarrollo de tecnologías de avanzada para la modelación micromecánica de concretos para pavimentos, aprovechando los métodos numéricos y modelos constitutivos desarrollados las etapas anteriores de macro-modelación, como continuidad a los estudios de adecuación de los métodos de diseño de pavimentos rígidos.

Se ha vuelto cada vez más evidente en los estudios micro-mecánicos que las simplificaciones excesivas de la forma de partícula (áridos y otros elementos componentes de las mezclas) no pueden proporcionar predicciones cuantitativas y adecuadas sobre el comportamiento de los materiales, por lo que una mejor consideración de la forma realista de las partículas se ha convertido en una tendencia actual. Con este fin, se han propuesto varias formas no circulares para aproximar la forma real de las partículas, que van desde grupos de discos o esferas, polígonos, elipses y elipsoides hasta súper-cuádricas, cilindros y poliedros o esfero-poliedros^{14,48}. Aunque han ayudado a obtener diversas mejoras en la comprensión del comportamiento micro-mecánico, estos enfoques siguen siendo aproximaciones demasiado simplificadas para proporcionar una descripción precisa de la forma real de las partículas. Las simulaciones numéricas basadas en estas consideraciones simplificadas quedan muy lejos de proporcionar predicciones cuantitativas sobre el comportamiento real de los materiales. Por estas razones existe la necesidad de desarrollar enfoques sistemáticos^{14,48,49,50} para representar efectivamente las características geométricas realistas de las partículas granulares (áridos y material constituyente de las mezclas de concreto) antes de la incorporación en la modelación numérica.

Para avanzar en esta temática se hace necesario desarrollar: 1) técnicas de generación virtual de partículas reales individuales 3D, con la finalidad de disponer de un repositorio virtual de partículas, y 2) técnicas de empaquetamiento de partículas, que dispongan de las potencialidades de generar medios con partículas reales 3D virtuales considerando la aleatoriedad del medio y la morfología de las partículas. Para desarrollar el primer punto es necesario hacer uso sistémico de las formulaciones de los descriptores de Fourier¹⁰⁵⁻¹³¹ y otras técnicas^{47,49,50} que puedan acoplarse a las técnicas estocásticas de empaquetamiento de partículas. En el segundo caso se hace necesario disponer de una técnica de empaquetamiento de partículas que sea genérica¹⁴ y que posibilite empaquetar partículas virtuales 3D obtenidas a través de los descriptores de Fourier¹⁰⁵⁻¹³¹ y otras teorías^{47,49,50} propiciando empaquetamientos que respeten la estocasticidad del medio y sus competentes.

5.3. Modelación micromecánica de concretos de matriz cementicia empleados en pavimentos.



Durante más de 10 años se han efectuado investigaciones^{14,29-40,46-47,54,49-50} en el desarrollo de tecnologías de avanzada para la modelación micro-mecánica de materiales. En estos estudios se han aprovechado los desarrollos teóricos que antecedieron¹⁰⁵⁻¹³¹ y se han desarrollado otras^{14,2940,46-47,48,49,50} que mejoran algunos aspectos y deficiencias, dando un salto de desarrollo en temas de modelación micro-mecánica. En estos estudios se han introducido algunos conceptos nuevos y determinaciones importantes como:

- *Combinación de la modelación numérica micro-mecánica y la experimentación:* Realización de estudios que partan del concepto de combinar la modelación numérica y la experimentación como patrón de calibración y validación de los modelos numéricos con la finalidad de disminuir los costos de las investigaciones para el desarrollo o mejora de los métodos de diseño de pavimentos.
- *Estocasticidad y aleatoriedad del medio:* Lograr la aleatoriedad o estocasticidad de la morfología y geométrica de las partículas, de la posición, distribución y orientación de las mismas en el concreto de cemento portland.
- *Modelación multi-escala con descripción a nivel de detalle:* Emplear conceptos de modelación multi-escala basada en la descripción de las partículas a nivel de detalle (modelación de los áridos gruesos y matriz, o modelación de los áridos gruesos, finos, filler y material cementicio. El nivel de detalle del modelo micro-mecánico depende de la capacidad de computo disponible y del objetivo de la investigación.
- *Modelación constitutiva micro-mecánica de los componentes del concreto para pavimentos:* Empleo de diferentes modelos constitutivos de avanzada establecidos para modelación macro-mecánica convencional en la descripción del comportamiento de los componentes individuales de los concretos para pavimentos con enfoque micro-mecánico. Desarrollo de nuevos modelos constitutivos micromecánicos discretos para el método de los elementos discretos y la determinación de las relaciones constitutivas macro-mecánicas convencionales con las micro-mecánicas.
- *Modelación micro-mecánica continua o discreta:* Solución del problema micromecánico utilizando métodos basados en mecánica del medio continuo (Elementos Finitos, Elementos de contorno, etc.) o discretos (Elementos discretos, etc.).
- *Modelación estocástica:* Empleo del concepto de modelación estocástica con métodos numéricos (continuos o discretos) desde el punto de vista de la concepción geométrica de medio y de los parámetros constitutivos que representan el comportamiento del material. Se desecha la modelación numérica determinística por la estocástica, lo que implica la corrida de múltiples modelos numéricos para disponer de una respuesta del comportamiento del concreto para pavimentos.

Como continuidad de los trabajos de etapas anteriores la visión de trabajo ha estado dirigida a contribuir al desarrollo de las tecnologías de modelación micro-mecánica para el estudio y comprensión del comportamiento de los concretos para pavimentos, cuya finalidad es utilizar estas novedosas



tecnologías numéricas para adecuar los métodos de diseño mediante conceptos de modelación micromecánica. Esta parte del trabajo se ha centrado en el desarrollo de:

- Realización de estudios experimentales de avanzada para la caracterización micro-mecánica de los elementos constituyentes de los concretos para pavimentos.
- Tecnologías de avanzada para la generación virtual de partículas reales individuales (árido grueso, fino, filler y material cementicio) empleando concepto de estocasticidad, aleatoriedad y modelación multi-escala con descripción a nivel de detalle.
- Técnicas de caracterización geométrica y morfológica de las partículas individuales virtuales reales (árido grueso, fino, filler y cementante) y su validación de similitud con las partículas reales que conforman las mezclas de concretos para pavimentos.
- Técnicas de generación o empaquetamiento de partículas incluida partículas virtuales reales para pavimentos (árido grueso, fino, filler y cementante) empleando concepto de estocasticidad, aleatoriedad y modelación multi-escala con descripción a nivel de detalle.
- Técnicas de evaluación de la calidad de los empaquetamientos micromecánicos que describan las mezclas de concreto para pavimentos y su similitud con el medio físico real.
- Desarrollo de técnicas de modelación policristalina (regulares no regulares) de materiales reales con esta microestructura (estructuras de rocas con las que se obtienen los áridos).
- Empleo de conceptos de modelación continua (elementos finitos, etc.) micro-mecánica de pavimentos rígidos (modelación a escala de ensayos mecánicos).
- Desarrollo del método de los elementos discretos para modelación micro-mecánica y su aplicación a la modelación de pavimentos rígidos (modelación a escala de ensayos) empleando conceptos de modelación multi-escala con descripción a nivel de detalle.
- Aplicación y validación de las tecnologías desarrolladas en el estudio de comportamiento micromecánico de pavimentos rígidos, para el desarrollo de los métodos de diseño.

5.3.1. Generación virtual de partículas reales individuales

Los desarrollos alcanzados en esta temática primeramente se centraron en la utilización de tecnologías desarrolladas por otros autores¹⁰⁵⁻¹³¹, las cuales fueron evolucionando en el tiempo y mejorando algunos aspectos y deficiencias, aunque todas las problemáticas no están resueltas en toda su totalidad para la modelación virtual de los áridos (gruesos y finos) usados en concretos de pavimentos. Paralelamente se comenzó a desarrollar tecnologías propias de avanzada para la generación virtual de partículas reales individuales^{36-40,46-47,49,50} que solucionaran las problemáticas existentes en la modelación geométrica y morfológica de las partículas individuales de los elementos constituyentes de los concretos para pavimentos.

Dentro de las técnicas más significativas de modelación virtual de partículas individuales reales desarrolladas por otros autores¹⁰⁵⁻¹³¹ están:

- Descriptores de Fourier



- Descriptores de Fourier y campos aleatorios
- Método de armónicos esféricos
- Método de armónicos esféricos con invariantes en rotación

Por su parte los avances más significativos en la temática son los desarrollos propios que se han establecido en las investigaciones ^{36-40,46-47,49,50}, más actuales:

- Generación aleatoria de partículas individuales virtuales reales.
- Reconstrucción de partículas individuales virtuales reales.
- Validación pura para generación aleatoria de partículas individuales virtuales reales.
- Validación pura para reconstrucción aleatoria de partículas individuales virtuales reales.
- Técnicas de comparación para generación aleatoria de partículas individuales virtuales reales.
- Técnicas de comparación para reconstrucción aleatoria de partículas individuales virtuales reales.

Como resultados de las investigaciones^{15-18,41-46,96-104} se ha vuelto cada vez más claro que las simplificaciones geométricas y morfologías de los elementos constituyentes de los concretos para pavimentos no describen adecuadamente el comportamiento mecánico de estos materiales. Estas simplificaciones excesivas de la forma de las partículas en la modelación de los concretos para pavimentos, no pueden proporcionar predicciones cuantitativas y precisas sobre el comportamiento de los materiales, y una mejor consideración de la forma realista de las partículas granulares se ha convertido en una tendencia actual¹⁸⁻⁵⁰.

En algunas investigaciones se ha presentado un método novedoso de generación aleatoria de partículas individuales reales¹²⁷ las cuales pueden ser usadas en modelación de concretos para pavimentos. Basándose en el concepto de descriptores de Fourier para granos de arena estos investigadores han propuesto otros métodos¹²⁴. En este caso, primero son generados aleatoriamente tres contornos 2D de secciones transversal ortogonales para una partícula virtual real y luego desarrollan una técnica de transformación para construir la superficie 3D externa de la partícula para que coincida con estas secciones transversales preestablecidas en un inicio. El método propuesto^{124,127} está basado en transformaciones geométricas de volúmenes en revolución, donde se examina por aplicación a la generación de seis arenas reportadas en la literatura utilizando los espectros de Fourier disponibles para estas arenas, que puede ser aplicada para la modelación de otros áridos siempre que se cuenten con los estudios experimentales que definan los parámetros geométricos y morfológicos necesarios incluidos la aleatoriedad y caracterización estadística necesaria. La técnica desarrollada¹²⁷ puede describir con una buena aproximación la forma real de las partículas a partir de los contornos 2D de dichas partículas. A pesar de esto, este método presenta tres inconvenientes notables: (i) la técnica de extrapolación no conduce a una distribución isotrópica de irregularidades en la forma; (ii) no pudo reproducir las formas de áridos con caras planas en su morfología geométrica que caracterizan muchas partículas granulares; y (iii) los tres contornos 2D elegidos pueden ser muy arbitrarios y afectar la morfología del 3D generado de una manera poco realista.



Para resolver estos problemas, los autores¹²⁹ proponen un método estadístico novedoso para generar partículas 3D virtuales individuales con formas realísticamente complejas pero controlables. En este método se combinan la teoría de campos aleatorios para topología esférica con un método basado en descriptores de forma de Fourier para la generación de partícula virtual individual, y se desarrollan soluciones rigurosas para resolver las dificultades matemáticas que surgen de la vinculación de los dos (combinación de campos aleatorios y descriptores de Fourier). Los resultados obtenidos con esta formulación mejoran algunas incongruencias con la realidad.

Otro tipo de método para la generación de partículas granulares están basados en el análisis de armónicos esféricos. Estos trabajan directamente en el espacio tridimensional a partir de datos de partículas reales obtenidos principalmente mediante el uso de escáneres de partículas 3D y las imágenes que estos generan, las cuales son procesadas digitalmente para la eliminación de ruidos, segmentación y binarización. En esta investigación¹²⁹ se desarrolló un procedimiento matemático llamado análisis de función armónica esférica para caracterizar la micro-morfología de partículas y determinar los efectos meso de manera discreta. Este método tiene fuertes propiedades matemáticas con respecto a la ortogonalidad y la invariancia rotatoria. En ese estudio fue utilizado para caracterizar y reconstruir la micro-morfología de partículas en un espacio tridimensional. La aplicabilidad y precisión del método se evaluaron mediante la comparación de propiedades geométricas básicas como el volumen y la superficie. Los resultados muestran que las características micro-morfológicas de las partículas reproducidas se vuelven más y más fácilmente distinguibles a medida que aumenta el número de orden reproducido de la función armónica esférica, y el error puede reducirse por debajo del 5% cuando el número de orden llega a 10. Este nivel de precisión es lo suficientemente nítido para distinguir las características de las partículas individuales reales. El método de armónicos esféricos utiliza originalmente una representación radial, que está restringida a superficies en forma de estrella. Esta limitación se resolvió mediante la introducción de parámetros de superficie¹⁰⁵. La parametrización de la superficie descompone la superficie de una partícula individual virtual 3D en tres direcciones ortogonales.

En otra investigación¹³¹ se describe un nuevo enfoque basado en el análisis armónico esférico (SH) invariante en rotación, usando la parametrización de la superficie. El núcleo de este método es construir características morfológicas de las partículas en varias escalas de longitud y superponerlas juntas para formar la morfología general. Este método utiliza cuatro factores SH invariantes de rotación para construir matrices de coeficientes SH. Cuantificando la forma de las partículas en forma, redondez y compacidad para establecer el vínculo entre los factores SH y los parámetros de forma tradicionales. Se encuentra que los factores SH controlan eficazmente las características de las partículas a diferentes escalas. Este método tiene un gran potencial para facilitar la investigación sobre micro-mecánica de los áridos utilizados en concretos para pavimentos considerando muchos de los efectos de la forma y morfología de las partículas.

Existe un grupo de tecnologías numéricas propia que mejoran las prestaciones para la modelación virtual de partículas reales^{36-40,46,47,49,50}. Una descripción general y resumida de cada una de estas técnicas se describe a continuación. La técnica de *generación aleatoria* de partícula individual virtual,



es un procedimiento que permite reproducir aleatoriamente los puntos del contorno de una partícula virtual real (sea 2D o 3D) usando como información los datos estocásticos y aleatorios de una muestra de partículas reales estudiadas por cualquiera de las técnicas experimentales adecuadas para este caso. La finalidad de los métodos de generación aleatoria es lograr reproducciones que se asemejen bastante a las partículas y con esta establecer un repositorio de partículas virtuales que respondan a las características geométricas y morfológicas deseadas. La *reconstrucción de una partícula* es un procedimiento mediante el cual, dado un conjunto de puntos del contorno de una partícula (sea 2D o 3D), se estiman las coordenadas de los puntos restantes. Las *técnicas de validación* se enfocan en el desarrollo de un procedimiento a partir del cual se determina que dicho método está apto para usarse ya que satisface en una medida aceptable el propósito para el cual se diseñó, en este caso la generación de partículas individuales virtuales reales. La *validación pura* es un procedimiento de validación de un método que debe tener un valor intrínseco. Es decir, que en sí mismo garantiza la validez del método independientemente de otros métodos diseñados con propósitos similares. Las comparaciones es un proceso a partir del cual se contrastan varios métodos atendiendo a uno o varios criterios de comparación. De esta manera, se puede saber los puntos fuertes y débiles de dichos métodos según cada criterio seleccionado. Puede ser considerado como un caso de validación ya que, si la comparación de un nuevo método con otros ya establecidos resulta ser favorable para este, entonces, al ser válidos los establecidos, se considerará validado el nuevo.

La formulación de la *generación aleatoria de partículas individuales virtuales reales*^{36-40,46,47,49,50} tienen como objetivo inicial reproducir virtualmente contornos 2D realistas de una partícula real. La idea parte de considerar que para lograr una reproducción 2D suficientemente simple y suficientemente realista, basta considerar lo que se denomina puntos esenciales del contorno. Básicamente, los puntos esenciales de un contorno 2D son aquellos que permiten caracterizar la macro forma de un contorno. Estos son los puntos que delimitan lo que se llama cadenas pseudo-monótonas (CMs) de radios, que no son más que conjuntos de radios dispuestos en forma consecutiva cuyas longitudes son crecientes o decrecientes. Cada geometría de partículas individual real tiene un número de puntos esenciales que depende de la complejidad geométrica que se estudie la cual debe ser estudiada por vía experimental. La premisa detrás del método es que una partícula real cuenta generalmente con un número relativamente pequeño pero representativo de CMs. Esto significa que se necesitan pocos puntos esenciales de un contorno para reproducir aceptablemente el contorno de una partícula. Teniendo ya una macro forma realista, lo siguiente es rellenar las CMs con puntos que determinarían el micro-morfología o forma de la partícula. De esta forma, se puede estudiar, además características más específicas como la rugosidad, la textura, etc. El nivel de detalles de reproducción realista de la partícula será la que defina el número mínimo de puntos esenciales. En esta formulación primero se deben generar, en base a la información real recogida, las amplitudes de las CMs así como la razón entre los radios extremos de cada una de ellas. Con esto, quedan determinados los puntos esenciales del contorno. Luego teniendo ya la macro-morfología del contorno, se pasa al rellenado de las CMs que no es más que el proceso de determinación de todos los radios interiores de cada CMs. Con los puntos



esenciales del contorno, así como el relleno de las CMs, se tiene ya el contorno completamente determinado.

Para lograr lo anterior se hace uso de técnica de extremos locales de análisis matemático, reducción al absurdo (lógica formal), observación experimental, inferencia estadística. Este método se puede separar en tres enfoques distintos de acuerdo al grado de participación del usuario en la supervisión de los valores que tomarán los distintos parámetros definidos. Los tres enfoques serían: 1) Generación completamente aleatoria, 2) Generación completamente supervisada y 3) Generación semi-supervisada. El resumen hecho aplica a todos ellos solo diferenciándose en la forma en que se dan las entradas al algoritmo. Es decir, si las entradas son todas inferidas estadísticamente, no hay supervisión humana por lo que el método sería completamente aleatorio. Luego, si el usuario participa parcialmente en la asignación de las entradas sería semi-supervisado. Finalmente, si el usuario asigna todos los parámetros posibles como entradas del algoritmo, el método sería completamente supervisado ^{36-40,46,47,49,50}.

En la extensión de este método ^{36-40,46,47,49,50} al caso 3D, la idea sería una generación 3D que comienza por generar al menos dos contornos siguiendo las bases de la formulación 2D. Luego estos contornos se pueden considerar como cortes ortogonales de la partícula a generar. Evidentemente, se hacen las normalizaciones para que ambos cortes encajen y puedan ser proyecciones de una misma partícula. El próximo paso sería rellenar la partícula con los demás puntos aparte de los cortes ortogonales ya obtenidos. Para esto, se deben definir las coordenadas angulares a las cuales hay que calcularles sus respectivos radios (serían las coordenadas angulares asociadas a los cortes transversales respecto a un mismo eje central de la partícula a generar). Para lograr lo anterior se usa una función de distribución que genere, en cada iteración, el radio para una cierta coordenada angular. Esta función tiene como parámetros datos asociados a varios de los puntos cercanos (angularmente hablando) al punto que se va a generar. Es decir, la generación de cada punto tomará como referencias información de puntos cercanos y no la del más alejado (función de proximidad de base radial), pues no se considera que los puntos más alejados sean estadísticamente significativos con este propósito. En esta formulación se usan técnicas de inferencia estadística y de aprendizaje automático ^{36-40,46,47,49,50}.

Otro método ^{36-40,46,47,49,50} de desarrollo propio es denominado *método de generación de los vecinos más cercanos* basado en estructuras geodésicas. El objetivo de este método es reproducir aleatoriamente partículas 3D consistentes con muestras de partículas previamente estudiadas experimentalmente. La base de este método es partir de las coordenadas angulares de la estructura geodésica. Luego, asignarle un radio unitario a una coordenada angular random. Después, se generan los radios asociados a los cinco o seis puntos adyacentes al primero (cinco o seis suponiendo que se parte del icosaedro regular, aunque se usan también otras geometrías de referencias). El proceso de generación se basa en una función de aprendizaje automático, o una función de distribución ^{36-40,46,47,49,50}.

La premisa del *método de reconstrucción* ^{36-40,46,47,49,50} toman como base los métodos de generación aleatoria, y con ellos se usa una o varias funciones ($f(r)$) que predicen los valores de los radios cercanos a un conjunto de radios que se tienen. Aunque, en el caso de la generación aleatoria, los



radios que se tienen no son reales, sino que son también generados aleatoriamente de acuerdo a otros criterios. En el caso de la reconstrucción se usa la función $f(r)$ para estimar los valores de los radios cercanos a los radios reales con los que se cuentan. En resumen, para cada generación de un nuevo radio, se usa siempre al menos parte de la información real que se tiene para evitar errores producto de una mala estimación parcial. Por ejemplo, si para generar un radio (r_k), los n radios más cercanos ($r_i, i \in \{1, 2, \dots, n\}$) que se tienen fueron reconstruidos, entonces no se deben usar solo los valores de $r_i, i \in \{1, 2, \dots, n\}$ para generar el valor de r_k . Esto se debe a que los valores de r_i están sujetos a un error de estimación por lo que toma solo a ellos como pivotes en la determinación de r_k porque puede aumentar el error. Por tanto, siempre se toma como referencia parte de los datos reales, aunque estén más alejados pues es la información que se dispone que no posee errores. En este caso se hace uso de funciones de base radial con delimitación de peso en función de la distancia del punto objeto de estudio en cada instante. En este sentido, la función $f(r)$ se reformula respecto a la usada en la generación aleatoria, pues está pensada para generar no solo los puntos más cercanos sino puntos que puedan estar alejados también.

El método de validación pura para la generación aleatoria denominado *método de validación por compatibilidad con la probabilidad esperada de generación*, es una tecnología que son de desarrollo propio^{36-40,46,47,49,50}. Teniendo en cuenta que los métodos de generación aleatoria van a estar asociados a funciones de distribución, se tiene la posibilidad de calcular una función de distribución acumulada para cada familia de partícula. Esto permite que se generen partículas con menor o mayor probabilidad que una partícula específica generada. Es decir, para una partícula generada se puede calcular el umbral límite entre las partículas más probables. Entonces, para saber si el método de generación aleatoria está siendo consistente con la realidad, debe suceder que partículas reales seleccionadas aleatoriamente se correspondan con las probabilidades predichas por el método de generación. Es decir, que la probabilidad de que se genere una partícula o un tipo de partículas específicas de acuerdo al método de generación, sea similar a la probabilidad de encontrar, en la práctica ese mismo tipo de partículas al hacer muestreos aleatorios. Todo esto viene unido a un análisis de consistencia, lo que significa que deben analizarse varias muestras. Esta técnica es completamente novedosa, sin embargo, emplea importantes conceptos teóricos que se establecieron^{36-40,46,47,49,50} como funciones de distribución acumulada y de densidad de probabilidad, conceptos de teoría de la medida, análisis de consistencia, sensibilidad y robustez.

La *validación pura* para reconstrucción individual de partículas denominada *Método basado en los índices de validación por restricciones integrada y parcial*^{36-40,46,47,49,50} tiene como objetivo determinar si un método de reconstrucción de una partícula es o no válido y cuál es la medida de su validez. La premisa del método es el volumen de información que se tiene de la partícula que se quiere reconstruir. Además, define una medida de similitud adecuada entre dos partículas p_1 y p_2 (S_{p_1, p_2}). Entonces, la idea es que, dado un cierto volumen (V) de información que se tenga de una partícula p (geometría y morfología), se establece un umbral (U_V) para el cual, si se denomina por p a la partícula reconstruida a p_r , entonces debe ocurrir que $S_{p, p_r} \geq U_V$ para que el método de reconstrucción sea validado respecto



al volumen de información (V) considerado. Sin embargo, hay dos elementos importantes a considerar en esta formulación básica. En primer lugar, U_V se considera como una función con variable V ya que a mayor volumen de información que se tenga, el método debería reconstruir de manera más precisa. Esto significa que a mayor V deberá corresponder un mayor valor de U_V . Formalmente hablando, U_V es una función monótona creciente. Lo segundo es que la restricción de validación puede generalizarse a la desigualdad $S_{p,p_r} \geq U_V \forall V \in D$ donde D (donde existen diferentes alternativas para lógralo^{36-40,46,47,49,50} es el dominio de definición de V . Luego, a la restricción $S_{p,p_r} \geq U_V \forall V \in D$ se le denomina restricción de validación integrada. Asimismo, $S_{p,p_r} \geq U_V \forall V \in d: d \subset D$ sería una restricción de validación parcial que solo garantiza validez para el dominio d . Esta técnica es muy novedosa, pero incluyen: elementos básicos de estructuras algebraicas, funciones de distancias, funciones de normalización entre otras ^{36-40,46,47,49,50}.

Las técnicas de comparación para generación aleatoria de partículas virtuales reales, denominado índice de comparación de métodos de generación aleatoria basado en el vector característico de forma es una de las más novedosas ^{36-40,46,47,49,50}. La formulación descriptiva de esta técnicas es definir uno o varios descriptores de formas geométricas o morfología basados en algunos de los ya conocidos como: 1) Esfericidad, 2) Relación isoperimétrica, 3) Energía de Willmore, 4) Rugosidad, 5) Angularidad, 6) Aplastamiento, 7) Elongación, 8) Relación aspecto, 9) Redondez, etc. Los nuevos descriptores deben ser más completos; se fundamentan adecuadamente ^{25-29,42-43,83,84}. El objetivo de estas técnicas es calcular los umbrales inferiores y superiores en los que se mueven los indicadores definidos para partículas reales. Luego, se calculan los valores de dichos indicadores para un conjunto de partículas virtuales generadas aleatoriamente. Entonces, el método para el cual los indicadores de las partículas reales están más próximos de los indicadores para las partículas generadas aleatoriamente resultará beneficiado en la comparación. Aquí se define también el vector característico de forma o morfología, cuyas componentes sean los valores de todos los índices definidos. De esta forma, se puede generalizar la comparación al establecer similitudes entre las partículas generadas y las reales usando como índice de medida a un operador cuyas variables sean todas las componentes del “vector de forma” definido. Estas técnicas incluyen elementos de algebra y geometría analítica ^{36-40,46,47,49,50}.

Dentro comparación de métodos de reconstrucción de partículas individuales virtuales se encuentra la técnica de comparación de métodos de reconstrucción basado en un nuevo índice de similitud de partículas ^{36-40,46,47,49,50}. Este método se apoya en el cálculo del índice de similitud entre pares de partículas. Esto se hace actualmente de varias formas ^{36-40,46,47,49,50}, partiendo de orientar primero las partículas a comparar, por ejemplo, haciendo coincidir los ejes principales. En la investigación se detectaron ^{36-40,46,47,49,50} algunos problemas en las formas de determinación de similitud de partículas. Por lo cual se fundamentaron las vías correctas de establecer el índice de similitud ^{36-40,46,47,49,50}. Se logró establecer una medida del nuevo índice de similitud que básicamente parte de un algoritmo que encuentra, dada una partícula en una orientación arbitraria, cual es la rotación a la que debe someterse una nueva partícula para que pueda considerarse igualmente orientada respecto a la primera ^{36-40,46,47,49,50}. De este enfoque se define el nuevo índice de similitud que es una medida de distancia en la



que se consideran como componentes análogos, a los radios asociados a las mismas coordenadas angulares de las partículas ya orientadas. La fundamentación de la comparación entre dos métodos de reconstrucción se basa en calcular, dada una partícula real, y su reconstrucción establecida por información parcial, lograr un índice de similitud marcado entre ambas. Por tanto, a mayor índice de similitud entre una partícula real y su reconstrucción, mejor evaluado quedará el método de reconstrucción. Evidentemente, quedó definido ^{36-40,46,47,49,50} un operador para calcular una medida de similitud generalizada para cada método, pues se analizan muestras de partículas teniéndose varios índices de similitud para cada método de reconstrucción. En esta técnica se hace uso de elementos de geometría analítica, medida y optimización ^{36-40,46,47,49,50}.

5.3.2. Generación o empaquetamiento de partículas enfocados a modelación micromecánica de concretos para pavimentos.

La formulación del algoritmo de empaquetamiento de partículas para la modelación micro-mecánica de concretos para pavimentos esta soportada en una técnica de avance frontal. El problema principal consiste en obtener de una manera eficiente conjuntos de partículas que conformen un empaquetamiento y respete la aleatoriedad de la micromecánica de los concretos usados en pavimentos. Para lograr esto, es de especial importancia poder trasladar (sin rotar) una partícula de modo que esté en contacto (o no) con otras dos, en el caso 2D, o con otras tres, en el caso 3D, debido a que así se puede obtener una densidad local adecuada, en caso de precisarla. El frente de avance es un grupo de partículas en los bordes de un sistema de partículas durante la generación. Este proceso se repite cíclicamente sin propiciar colisiones o superposiciones entre partículas virtuales reales y de este modo se logra describir la morfología interna del concreto para pavimentos. Dentro de esta área o volumen (estructura contenedora que delimita la micromecánica del concreto) delimitada por ellas, se encuentran otras partículas previamente colocadas. Las partículas nuevas son colocadas en contacto (o no) con las partículas externas del frente. El empaquetamiento comienza con un conjunto de dos partículas en cualquier posición, o una partícula en contacto (o no) con las paredes que definen el dominio o región que delimita la micromecánica del material, partículas que componen el frente de avance inicial. Entonces se genera una nueva partícula, o bien se escoge de un repertorio de partículas (generadas empleando cualquier tecnología de generación de partículas virtuales individuales reales) que serán añadidas al empaquetamiento que describe la micromecánica del concreto. La nueva partícula se coloca en una posición en la que está en contacto (o no) con otras partículas del frente de avance, actualizándose de este modo el conjunto del frente de avance, continuando el proceso cíclicamente hasta lograr el llenado del medio a generar. El Pseudocódigo (figura 3.1) resume los pasos básicos de la generación de un algoritmo de avance frontal.

Pseudocódigo del Algoritmo de avance Frontal

Inicializar el empaquetamiento (usualmente con dos o tres partículas) en el interior del espacio a generar o en contacto con la superficie que define el medio.

Repetir

- 1) Generar la nueva partícula que se agregará al empaquetamiento.
- 2) Seleccionar un frente activo y determinar la posición en la que esta nueva partícula está en contacto con el frente activo.
- 3) Si en esta posición la nueva partícula no se interseca con ninguna otra y está dentro del dominio geométrico requerido, agregarla al empaquetamiento e ir al paso 1. En caso contrario, marcar el frente como no activo e ir al paso 2.

Hasta que no queden frentes activos.

Figura 5.1. Pseudocódigo para la generación del algoritmo de avance frontal.

La formulación establece una serie de pasos esenciales y su formulación detallada esta establecida². El primero, de inicialización, consiste en crear el frente inicial de avance. El segundo, que se repite sucesivamente hasta el final, consiste en la construcción de una nueva partícula en contacto (o no) con las que forman el frente de avance, actualizándose este constantemente. Existen pasos opcionales, para mejorar el empaquetamiento¹⁴, ya sea para aumentar la Fracción de Volumen o para eliminar posibles inestabilidades físicas. La formulación se sustenta detalladamente en los siguientes aspectos¹⁴.

- *Selección del tipo de partícula a generar* (o combinaciones de tipos de partículas. En concretos para pavimentos se emplean partículas virtuales individuales reales): determina el tipo de partícula que conformará el empaquetamiento. Su selección es arbitraria basado en técnicas de estocasticidad o de Monte Carlo para generar las dimensiones de las partículas¹⁴ y otros elementos de la estocasticidad del medio. Para partículas irregulares reales se toman de un repositorio de partículas virtuales previamente generadas respetando la aleatoriedad de las dimensiones, la forma y morfología¹⁴, incluyendo funciones de distribución (continuo, discretas o empíricas).
- *Establecimiento del conjunto inicial de partículas o frente inicial de avance*: viene dado por la cantidad y posición de las partículas iniciales. Se determina que el conjunto de partículas que se va generando crezca de adentro hacia afuera o de afuera hacia dentro¹⁴.
- *Técnicas de selección del frente de avance*: existen varias alternativas de selección del frente de avance en cuanto a partícula pivote y partículas vecinas del pivote (estas partículas, en las listas que las contienen, se pueden seleccionar a lo ancho, a lo profundo o de manera aleatoria)¹⁴.
- *Construcción de la partícula en contacto exterior con otras*: cada nueva partícula se construye en contacto exterior con las que componen el frente de avance seleccionado, el cual a su vez está constituido por un pivote y una o dos vecinas, según sea el caso 2D o 3D².
- *Detección de intersecciones entre partículas*: para poder agregar una nueva partícula al empaquetamiento es necesario verificar que no se interseque con ninguna otra. En este proceso primeramente se crea una lista de intersecciones potenciales mediante técnicas de "consulta espacial" o "búsqueda de vecindad"¹⁴ (estas técnicas no dependen del tipo de partícula), y

posteriormente se verifica la intersección de la partícula a colocar con cada uno de los elementos de la mencionada lista de intersecciones potenciales¹⁴ (la forma de realizar esta última verificación depende del tipo de partícula).

Una descripción detallada de la formulación de esta técnica de empaquetamiento de avance frontal se ha reportado¹⁴, que al ser una técnica constructiva se combina con otras dinámicas para aprovechar las ventajas de ambas formulaciones.

Dentro de la formulación se detalla la determinación de *Construcción de la partícula en contacto exterior con otras*, haciendo mayor énfasis en las técnicas que más se aplican al caso de partículas de geometría real utilizadas en la modelación micro-mecánica de concretos para pavimentos.

La *construcción de la partícula en contacto* es uno de los pasos más importantes en las técnicas de empaquetamiento. En este caso se establece el método para trasladar una partícula de manera que esté en contacto (o no) con otras dos fijas (en el caso 2D) o con otras tres (caso 3D). La formulación matemática de este proceso queda definida por el *problema 1*:

Sea $p[x] \subseteq \mathbb{R}^n$ una partícula cuyo centro de masas es el punto $x \in \mathbb{R}^n$. *Problema 1*: Sean p_1, \dots, p_n, n partículas fijas de \mathbb{R}^n ($n \in \{2,3\}$), y sea p_{mov} otra que se desea centrar en un punto $x \in \mathbb{R}^n$, sin realizarle rotaciones, de manera que $p_{mov}[x]$ esté en contacto exterior (o no) con las p_i simultáneamente, $i = \overline{1, n}$, sin intersecarse con ninguna.

En todas las instancias del problema anterior en las que p_1, \dots, p_n , y p_{mov} son partículas convexas, se ha comprobado que en el caso general el *Problema 1* tiene dos soluciones, (Figura 5.2, caso de \mathbb{R}^2), en el caso degenerado tiene una solución, y en el caso de no solución no tiene ninguna. A la hipótesis de que el número de soluciones siempre se comporte como en los tres casos anteriores para partículas convexas, se le llamará en lo adelante *conjetura 1*.

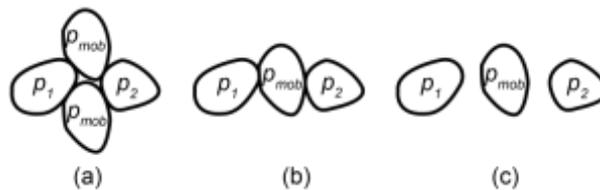


Figura 5.2. Soluciones para el problema de colocar una partícula en contacto con otras.

Para resolver el *problema 1* se han establecido varios métodos¹⁴: *intersección de envolventes*, *la minimización de la función de potencial* y *acercamiento directo* y el *acercamiento binario* (Figura 5.3). El acercamiento directo solo requiere de una función de detección de intersección entre pares de partículas, mientras que el acercamiento binario solo requiere una función de distancia direccional entre pares de partículas². En la modelación micromecánica de concretos se emplean partículas poliédricas y de geometría real. La técnica de acercamiento directo es la más eficiente para generar partículas reales². En el caso de partículas poliédricas se emplea la técnica de acercamiento binario¹⁴.

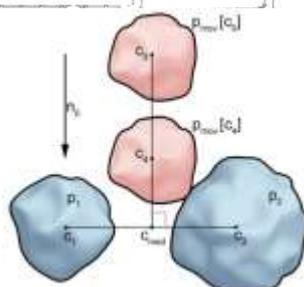


Figura 5.3. Método de acercamiento en 2D.

La aplicación de esta tecnología en la modelación micro-mecánica de concretos de pavimentos se puede ilustrar con su aplicación en la obtención más simplificada de los modelos geométricos y morfológicos de diferentes ensayos de concreto para pavimentos de cemento portland. En este caso se ilustra la modelación morfológica del árido grueso y el resto se identifica como matriz de base cementicia. Hacer una modelación micro-mecánica a un mayor nivel de detalle no sería compleja, pero el costo computacional aumentaría mucho al tratar de describir la geometría de los áridos gruesos, finos, filler y otros elementos. Para ilustrar las potencialidades de las tecnologías de avanzada se muestran los modelos micromecánicos menos complejos, pero esto no demerita la tecnología desarrolladas ya que fueron implementadas computacionalmente con conceptos de modelación multi-escala basado en delimitación de nivel de detalle. En las figuras se ilustran modelos virtuales micro-mecánicos para elementos finitos (Figura 5.4 y 5.5) y elementos discretos (Figura 5.6)



Figura 5.4. Probeta virtual para la modelación micro-mecánica del ensayo a flexión de vigas de concreto de cemento portland



Figura 5.5. Probeta virtual de ensayos de concreto de cemento portland y estudio de propagación de grietas con modelación micromecánica



Figura 5.6. Probeta virtual del ensayo a flexión de vigas de concreto de cemento portland para modelación micro-mecánica con el método de los elementos discretos.

Una modelación numérica micro-mecánica de ensayo de una viga a flexión con el método de los elementos discretos (Figura 5.7) y el de una muestra circular para modelación micromecánica de grietas (Figura 5.8), se ha efectuado para ilustrar la aplicación de esta técnica para el estudio de comportamiento de concretos de cemento portland, a través del módulo de rotura.

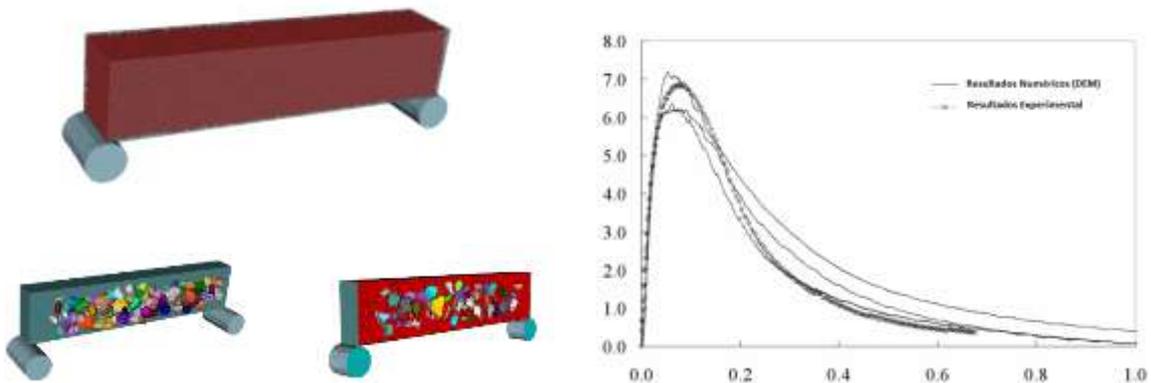


Figura 5.7. Modelación micro-mecánica con método de elementos discretos de una viga de concreto de cemento portland sometida a flexión.

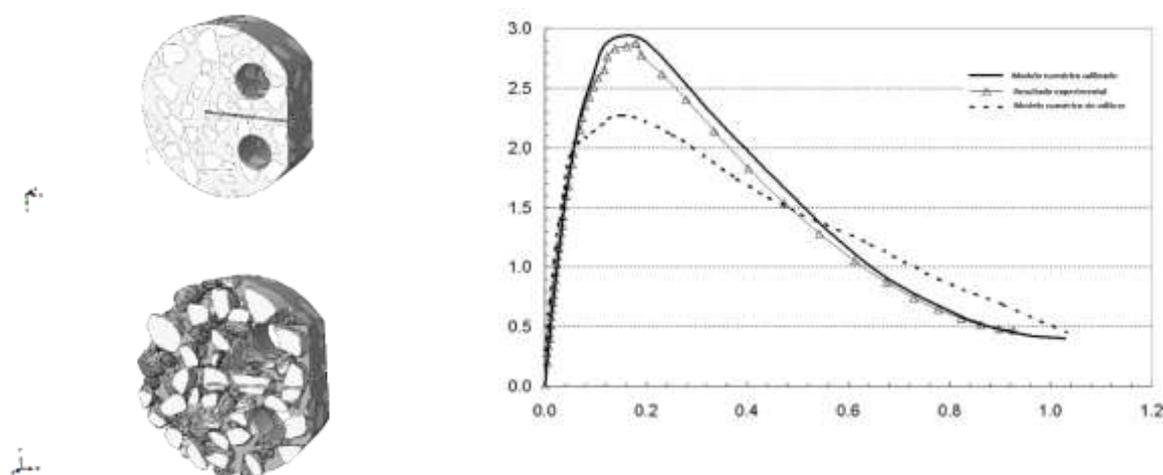


Figura 5.8. Modelación micro-mecánica de grietas en elementos cilíndricos de concreto de cemento portland.

CONCLUSIONES

Con el desarrollo de las tecnologías de avanzada para la modelación micro-mecánica de concretos de cemento portland se establecen las herramientas necesarias para estudiar el comportamiento de los pavimentos rígidos. El trabajo realizado en la primera etapa de la investigación para la adaptación del método de diseño de la PCA mediante una modelación macro-mecánica, empleando el método de los elementos finitos, con el uso de las tecnologías de avanzada desarrolladas mediante modelación micromecánicas permitirá comprender mejor el comportamiento del concreto ante la aplicación de las solicitaciones del tráfico, por ende, establecer leyes del comportamiento de estos materiales en diferentes condiciones ambientales para el diseño empírico-mecanicista.

Como continuidad de las investigaciones de este grupo multidisciplinar se desarrollan nuevos métodos de diseño de pavimentos (flexibles y rígidos) con el uso de tecnologías experimentales y numéricas basadas en conceptos micro-mecánicos.

Para enfrentar este enfoque y superar las limitaciones genéricas de los enfoques analíticos y semi-empíricos o la mecánica del daño continuo, se trabaja en el desarrollo de tecnologías de avanzada que propicien obtener una representación adecuada de la micro-mecánica de los concretos de cemento portland para pavimentos rígidos. Con estas tecnologías es posible la creación de modelos micro-mecánicos (continuo y discreto), basados en métodos numéricos como una alternativa más prometedora que las pruebas de laboratorio. No se trata en este caso de desechar totalmente los estudios experimentales, sino combinar las técnicas numéricas micromecánicas con los estudios



experimentales para disponer de datos reales que permitan calibrar y validar los modelos numéricos y abaratar los costos de investigación en la mejora de los métodos de diseño de pavimentos.

Una de las técnicas que pueden propiciar un avance muy rápido en la modelación de los concretos de cemento portland para pavimentos rígidos son las técnicas de captura y procesamiento de imágenes de materiales a diferentes escalas, como imágenes de cámaras digitales de alta resolución, láser, escáner 3D y tomografía de rayos X, lo que permiten que puedan construirse microestructuras bidimensionales y tridimensionales de estos materiales.

La microestructura virtual de los concretos se genera a partir de la técnica de captura y procesamiento de imágenes y empaquetamiento del medio con técnicas de partículas con su correspondiente validación de la modelación virtual con el medio físico. Disponiendo del medio físico discreto para ser utilizados en modelaciones (continuas o discretas), se pueden efectuar los ensayos a nivel de la microestructura virtual utilizando los modelos numéricos avanzados.

Estos ensayos virtuales ayudarán a los ingenieros a evaluar los efectos de cualquier cambio en las propiedades del material componente sobre el comportamiento de la mezcla de concreto con un número mínimo de pruebas de laboratorio para calibrar los modelos numéricos. Los ensayos virtuales también serán una herramienta eficiente en la comprensión de comportamiento fenomenológico de los materiales de los concretos de pavimentos en la microescala y en la mejora de los modelos constitutivos en la microescala, incluido el desarrollo y mejora de los métodos de diseño.