

Elaboración de un modelo de simulación, por la Metodología de Elementos Discretos, del Ensayo de Tensión Indirecta para la caracterización mecánica de Mezclas Asfálticas.



Trabajo de Grado para optar el título de Magister en Ingeniería de Vías Terrestres en modalidad de Profundización.

Estudiante: Diego Felipe Guerrero Torres

Director: Profesor PhD. Lucio Gerardo Cruz

UNIVERSIDAD DEL CAUCA

Facultad de Ingeniería Civil

Maestría en Ingeniería de Vías Terrestres

Santiago de Cali, septiembre de 2023

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	8
ABSTRACT	9
1 INTRODUCCIÓN	10
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	12
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	12
1.3 ALCANCES	12
1.4 LIMITACIONES	13
1.5 DESCRIPCIÓN METODOLOGÍA DEL TRABAJO	14
1.5.1 ENFOQUE CONCEPTUAL DEL TRABAJO.....	14
1.5.2 DESARROLLO DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN.....	14
2 MARCO TEÓRICO	16
2.1 FUNDAMENTOS DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS	16
2.1.1 INTRODUCCIÓN	16
2.1.2 TIPOS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS.....	17
2.1.3 PROPIEDADES DESEABLES DE MEZCLAS ASFÁLTICAS Y PATOLOGÍAS PRINCIPALES.....	18
2.1.4 REOLOGÍA Y VISCOELASTICIDAD DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS ..	20
2.2 ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA	25
2.2.1 OBJETIVO Y RESUMEN DEL ENSAYO.....	25
2.2.2 EQUIPO REQUERIDO.....	25
2.2.3 ESPECÍMENES DE ENSAYO.....	26
2.2.4 RESUMEN DEL PROCEDIMIENTO	26
2.2.5 CÁLCULOS.....	26
2.2.6 NORMA DE REFERENCIA	27
2.3 MÉTODO DE LOS ELEMENTOS DISCRETOS	27
2.3.1 ASPECTOS GENERALES DEL DEM	27
2.3.2 ECUACIONES DE MOVIMIENTO DEL DEM.....	28
2.3.3 INTEGRACIÓN DE ECUACIONES DE MOVIMIENTO	28
2.3.4 ESTABILIDAD NUMÉRICA Y ESCOGENCIA DEL ESCALÓN DEL TIEMPO.....	29
2.3.5 FUERZAS DE CONTACTO ENTRE PARTÍCULAS	31
2.3.6 MODELACIÓN NUMÉRICA DE LA MEZCLA ASFÁLTICA	32



2.3.7	MODELOS MECÁNICOS PARA CONTACTO NORMAL Y TANGENCIAL	33
2.3.8	SOLUCIÓN DE LA ECUACIÓN DIFERENCIAL DEL MODELO MECÁNICO DE BURGERS.....	35
2.3.9	RELACIÓN ENTRE PARÁMETROS CONSTITUTIVOS DE LOS MATERIALES PARA CONTACTOS ENTRE AGREGADOS Y ELEMENTOS DE CARGA (CONTACTOS ELÁSTICOS NO LINEALES AMORTIGUADOS).....	38
2.3.10	RELACIÓN ENTRE PARÁMETROS CONSTITUTIVOS DE LOS MATERIALES PARA CONTACTO ENTRE PARTÍCULAS DE MASTIC ASFÁLTICO (CONTACTO VISCOELÁSTICO).	42
2.3.11	RELACIÓN ENTRE PARÁMETROS CONSTITUTIVOS DE LOS MATERIALES PARA CONTACTO ENTRE PARTÍCULAS DE AGREGADO Y PLACAS DE CARGA CON MASTIC ASFÁLTICO (CONTACTO SEMI VISCOELÁSTICO).....	42
2.3.12	MODELO CONSTITUTIVO PARA LA SIMULACIÓN DEL AGRIETAMIENTO DEL MATERIAL	43
2.3.13	DISCRETIZACIÓN DEL MODELO.....	46
2.4	ESTADO DEL ARTE REFERENTE AL TEMA DE INVESTIGACIONES APLICADAS A MEZCLAS ASFÁLTICAS Y EL MÉTODO DE ELEMENTOS DISCRETOS	49
2.5	LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN VISUAL BASIC .NET.....	58
3	MODELO COMPUTACIONAL PROPUESTO.....	60
3.1	DIAGRAMAS DE FLUJO EXPLICATIVOS	61
3.2	VARIABLES Y ESTRUCTURAS DE DATOS.....	64
3.2.1	ESTRUCTURAS DE DATOS	64
3.2.2	VECTORES Y MATRICES.....	70
3.2.3	VARIABLES	71
3.3	MÓDULOS, FUNCIONES Y PROCEDIMIENTOS CONSTITUTIVOS DEL MODELO	77
3.4	REFERENCIAS DE LOS PARÁMETROS MECÁNICOS DE ENTRADA PARA EL MODELO.....	82
4	RESULTADOS DE PRUEBAS DE TRACCIÓN INDIRECTA DE LABORATORIO Y CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES ASFÁLTICOS PARA VALIDACIÓN DEL MODELO	87
4.1	MEZCLA DE ALTO MÓDULO MAM-25.....	87
4.2	MEZCLA ASFÁLTICA TIPO MSC-19 ELABORADA CON ASFALTO MODIFICADO CON POLÍMEROS TIPO III.....	88



4.3	MEZCLA ASFÁLTICA TIPO MDC-19, ELABORADA CON CEMENTO ASFÁLTICO CONVENCIONAL.....	89
5	VERIFICACIÓN DEL SOFTWARE, EJECUCIÓN DE SIMULACIONES Y RESULTADOS	91
5.1	DESCRIPCIÓN GENERAL DE LAS SIMULACIONES	91
5.2	DATOS DE ENTRADA.....	92
5.2.1	CONDICIONES DE CARGA	92
5.2.2	DIMENSIONES DE LA PROBETA Y TAMAÑO DE PARTÍCULAS	92
5.2.3	PARÁMETROS DE LOS COMPONENTES DE LA MEZCLA ASFÁLTICA DE ALTO MÓDULO MAM-25	93
5.2.4	PARÁMETROS DE LOS COMPONENTES DE LA MEZCLA ASFÁLTICA TIPO MSC-19 ELABORADA CON ASFALTO MODIFICADO CON POLÍMEROS TIPO III.94	
5.2.5	PARÁMETROS DE LOS COMPONENTES DE LA MEZCLA ASFÁLTICA TIPO MDC-19, ELABORADA CON CEMENTO ASFÁLTICO CONVENCIONAL 60/70. 95	
5.2.6	CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DEL AGREGADO MINERAL CONSTITUTIVO DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS.....	96
5.2.7	CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LAS PLACAS DE CARGA.....	97
5.2.8	COEFICIENTES DE FRICCIÓN CINEMÁTICO ENTRE LOS DIFERENTES MATERIALES CONSTITUTIVOS DE LAS PRUEBAS SIMULADAS.	98
5.3	RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES DEL ENSAYO DE RESISTENCIA A TRACCIÓN INDIRECTA Y COMPARACIÓN CON LOS DATOS EXPERIMENTALES.	98
5.3.1	RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES DE TRACCIÓN INDIRECTA PARA LA MEZCLA ASFÁLTICA DE ALTO MÓDULO MAM-25.	99
5.3.2	RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES DE TRACCIÓN INDIRECTA PARA LA MEZCLA ASFÁLTICA TIPO MSC-19 MODIFICADA.	101
5.3.3	RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES DE TRACCIÓN INDIRECTA PARA LA MEZCLA ASFÁLTICA TIPO MDC-19 ELABORADA CON ASFALTO CONVENCIONAL.	103
5.4	RESUMEN COMPARATIVO ENTRE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES Y SIMULADOS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA	105
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	107
7	BIBLIOGRAFÍA	110
	ANEXOS.....	114



LISTADO DE FIGURAS

Figura 2-1. Diagrama de fases y esquema real constitutivo de las mezclas asfálticas.	16
Figura 2-2. Detalle de Mezcla densa en caliente instalada como capa de refuerzo de una pista de aeropuerto.	17
Figura 2-3. Detalle de Mezcla Asfáltica de Alto Módulo tipo MAM-25, constitutiva de una estructura de pavimento flexible.	18
Figura 2-4. Ahuellamiento real en estructura de pavimento flexible y esquema típico del deterioro.	19
Figura 2-5. Agrietamiento invertido y normal, generado en estructuras de pavimento flexible.	20
Figura 2-6. Agrietamiento térmico en estructuras de pavimento flexible.	20
Figura 2-7. Cantera para explotación de granulares para fabricación de mezclas asfálticas.	21
Figura 2-8. Espectros de comportamiento mecánico de mezclas asfálticas.	23
Figura 2-9. Esquema gráfico explicativo del principio de superposición tiempo - Temperatura.	24
Figura 2-10. Esquema tipo de curva maestra de una mezcla asfáltica.	25
Figura 2-11. Diagrama de flujo general para análisis por DEM.	27
Figura 2-12. Esquema de idealización masa-resorte para la representación dinámica del contacto entre partículas de elementos discretos.	30
Figura 2-13. Fuerza de interacción en el contacto entre elementos discretos (método suave).	31
Figura 2-14. Descomposición de la fuerza de contacto entre partículas, en componentes normal y tangencial.	32
Figura 2-15. Modelos Reológicos Genéricos considerados para el modelamiento mecánico del contacto entre partículas.	33
Figura 2-16. Modelos mesomecánicos para la representación de los contactos normales a compresión entre las partículas de elementos discretos representativos del material de mezcla asfáltica.	34
Figura 2-17. Modelos mesomecánicos para la representación de contactos tangenciales a compresión entre partículas de elementos discretos representativos de la mezcla asfáltica.	35
Figura 2-18. Ley de Coulomb Generalizada.	41
Figura 2-19. Curva de Tensión - Desplazamiento para el Modelo de Fractura Cohesivo Bilineal.	44
Figura 2-20. Condiciones geométricas definidas para el modelo analítico 2D del espécimen de mezcla asfáltica y la banda de carga.	47
Figura 2-21. Propuestas de nivel de detalle de discretización para los especímenes de mezcla asfáltica de diámetro de 101.59 mm y de las bandas de carga respectivas.	48
Figura 2-22. Vista general del entorno de trabajo de Visual Basic Net.	59
Figura 3-1. Diagrama de flujo general del aplicativo de simulación.	61



Figura 3-2. Diagrama de flujo explicativo del algoritmo asociado al proceso de discretización del dominio geométrico del espécimen de material de mezcla asfáltica.	62
Figura 3-3. Diagrama de flujo explicativo del algoritmo asociado al proceso de Simulación del ensayo de Tracción Indirecta.	63
Figura 5-1. Esquema tipo del espécimen de mezcla asfáltica definido en las simulaciones.	93
Figura 5-2. Curva Fuerza vs Deformación y vista deformada del espécimen obtenidas de la simulación número 1 para la Mezcla asfáltica MAM-25.	100
Figura 5-3. Curva Fuerza vs Deformación y vista deformada del espécimen obtenidas de la simulación número 2 para la Mezcla asfáltica MAM-25.	100
Figura 5-4. Curva Fuerza vs Deformación y vista deformada del espécimen obtenidas de la simulación número 3 para la Mezcla asfáltica MAM-25.	100
Figura 5-5. Curva Fuerza vs Deformación y vista deformada del espécimen obtenidas de la simulación número 1 para la Mezcla asfáltica MSC-19 modificada.	102
Figura 5-6. Curva Fuerza vs Deformación y vista deformada del espécimen obtenidas de la simulación número 2 para la Mezcla asfáltica MSC-19 modificada.	102
Figura 5-7. Curva Fuerza vs Deformación y vista deformada del espécimen obtenidas de la simulación número 3 para la Mezcla asfáltica MSC-19 modificada.	102
Figura 5-8. Curva Fuerza vs Deformación y vista deformada del espécimen obtenidas de la simulación número 1 para la Mezcla asfáltica MDC-19.	104
Figura 5-9. Curva Fuerza vs Deformación y vista deformada del espécimen obtenidas de la simulación número 2 para la Mezcla asfáltica MDC-19.	104
Figura 5-10. Curva Fuerza vs Deformación y vista deformada del espécimen obtenidas de la simulación número 3 para la Mezcla asfáltica MDC-19.	104
Figura 5-11. Gráfica de Dispersión de la RTI Simulada Vs RTI Experimental, para los materiales asfálticos considerados en el proceso de validación del modelo computacional.	105

LISTADO DE TABLAS

Tabla 2-1. Propuesta de Discretización Estructurada para los especímenes de mezcla asfáltica y placas de carga.	48
Tabla 2-2. Resumen de la información bibliográfica consultada en referida a la aplicación del Método de Elementos Discretos y Mezclas Asfálticas.	49
Tabla 3-1. Características de la Estructura de datos definida para almacenar los parámetros del Vector de Elementos Discretos Constitutivos.	64
Tabla 3-2. Características de la Estructura de datos definida para almacenar los parámetros granulométricos del material simulado.	66
Tabla 3-3. Características de la Estructura de Datos definida para almacenar los parámetros de los contactos entre Elementos Discretos.	67
Tabla 3-4. Características de la Estructura de Datos definida para almacenar los parámetros de grietas y microgrietas generadas en la simulación.	69



Tabla 3-5. Características de los arreglos definidos para el almacenamiento y manejo de la información del aplicativo.....	70
Tabla 3-6. Relación y descripción de las variables simples principales de ámbito global definidas dentro del código fuente.	71
Tabla 3-7. Descripción de procedimientos y funciones generados dentro de cada módulo de código fuente.	77
Tabla 3-8. Información técnica general y valores de referencia para los principales parámetros mecánicos de entrada del modelo computacional implementado.	83
Tabla 4-1. Parámetros de validación del modelo para mezclas asfálticas tipo MAM-25 elaborada con asfaltos modificados con polímeros.....	88
Tabla 4-2. Parámetros de validación del modelo para mezclas asfálticas tipo MSC-19 elaborada con asfaltos modificado con polímeros.	89
Tabla 4-3. Parámetros de validación del modelo para mezclas asfálticas tipo MDC-19 elaborada con asfalto convencional.....	90
Tabla 5-1. Propiedades mecánicas de la Mezcla MAM-25 (elaborada con asfalto modificado con polímero tipo V) como datos de entrada del modelo.....	94
Tabla 5-2. Propiedades mecánicas de la Mezcla MSC-19 elaborada con asfalto modificado con polímero tipo III, como datos de entrada del modelo.	95
Tabla 5-3. Propiedades mecánicas de la Mezcla MDC-19 elaborada con asfalto convencional, como datos de entrada del modelo.	96
Tabla 5-4. Propiedades mecánicas consideradas para el árido de las mezclas asfálticas.	97
Tabla 5-5. Propiedades mecánicas consideradas para las placas de carga.....	98
Tabla 5-6. Coeficientes de fricción cinemático asumidos para los diferentes contactos entre los materiales.	98
Tabla 5-7. Resultados de Simulaciones para la mezcla tipo MAM-25.....	99
Tabla 5-8. Resultados de Simulaciones para la mezcla asfáltica tipo MSC-19 modificada con polímeros.	101
Tabla 5-9. Resultados de las Simulaciones para la mezcla tipo MDC-19 elaborada con asfalto convencional.	103
Tabla 5-10. Comparación de los resultados del ensayo de RTI simulado y de los valores Experimentales.....	105
Tabla 6-1. Comparación de los resultados de RTI, simulados y experimentales.	108



RESUMEN

Las solicitaciones climáticas extremas, en conjunto con el incremento de los volúmenes de tráfico y de las cargas vehiculares, y aunado a la necesidad de mitigación ambiental asociada a las actividades de construcción, son los nuevos desafíos técnicos a enfrentar por parte de los ingenieros en los proyectos de infraestructura vial. Bajo el marco anterior, el presente trabajo de grado buscó planificar, desarrollar, programar y validar un algoritmo o modelo numérico computacional fundamentado en el método numérico de los Elementos Discretos (en adelante DEM “*Discrete Element Method*”), que simule o represente bajo condiciones de parámetros mecánicos específicos y en entorno bidimensional, el ensayo de tensión indirecta ejecutado sobre probetas cilíndricas de mezclas de concreto asfáltico, tal que permita evaluar y predecir el desempeño y comportamiento mecánico de manera preliminar de este tipo de materiales, como posible beneficio técnico para los proyectos de diseño y construcción de estructuras de pavimentos flexibles.

El programa propuesto, desde el punto de vista lógico y dadas las ventajas computacionales que esto implica, fue escrito y desarrollado empleando para ello el entorno asociado al lenguaje de programación visual basic.net, buscando generar el código fuente y el ambiente de ejecución agradables al usuario y de fácil entendimiento para que cualquier interesado pueda estudiarlo, mejorarlo o replicarlo en un tema complementario. En concordancia a todo lo anterior, se pretendió aproximar la Resistencia a la Tracción Indirecta (RTI) de mezclas asfálticas a partir de relaciones de fuerza de compresión y deformación diametral obtenidas, siguiendo para ello los requerimientos técnicos establecidos para la ejecución del ensayo de laboratorio, estipulados para Colombia por la normativa del Instituto Nacional de Vías, INVÍAS.

Finalmente, y como complemento al presente trabajo de grado, se procedió a adelantar la validación del modelo computacional generado, a partir del desarrollo de un proceso de comparación de los resultados obtenidos por el *software* implementado, con los resultados referidos de datos experimentales característicos para materiales asfálticos fabricados e instalados en la infraestructura vial del sur occidente del país.

Como resultado del proceso de validación del modelo se obtuvo que los valores de RTI simulados se encuentran dentro del orden numérico y de tendencia de los resultados experimentales consultados para los diferentes materiales asfálticos considerados, permitiendo inferir que el modelo matemático y computacional implementado, se acerca de manera razonable a los datos de laboratorio correspondientes.

Palabras clave: Método de Elementos Discretos; Pavimentos Flexibles; Mezclas Asfálticas; Simulaciones Computacionales; Resistencia a Tracción Indirecta.



ABSTRACT

Extreme weather demands, together with the increase in traffic volumes and vehicular loads, coupled with the need for environmental mitigation associated with construction activities, are the new technical challenges to be faced by engineers in road infrastructure projects. Under the above framework, this degree work sought to plan, develop, program and validate an algorithm or computational numerical model based on the Numerical Method of Discrete Elements (hereinafter DEM), which simulates or represents under conditions of specific mechanical parameters in a two-dimensional environment, the indirect tension test carried out on cylindrical specimens of asphalt concrete mixtures, in order to evaluate and predict the performance and mechanical behavior of this type of materials in a preliminary way, as a possible technical benefit for the design and construction projects of flexible pavement structures.

The proposed algorithm or software, from a logical point of view and given the computational advantages that this implies, was written and developed using the environment associated with the visual basic .net programming language, seeking to generate a pleasant source code and easy to understand execution environment to the user, so that anyone interested can study it, improve it or replicate it in a complementary topic. In accordance with all of the above, it was intended to approximate the Indirect Tensile Strength (ITS) of asphalt mixtures from the compression force and diametrical deformation ratios obtained, following the technical requirements established for the execution of the laboratory test, stipulated for Colombia by the regulations of the National Roads Agency (INVÍAS).

Finally, and as a complement to this degree work, the validation of the generated computational model was proceeded, based on the development of a process of comparison of the results obtained by the implemented software, with the referred results of characteristic experimental data for asphalt materials manufactured in installed in the road infrastructure of the local area.

As result of the validation process of the model, it was obtained that the simulated RTI values are within the numerical order and trend of the experimental results consulted for the different asphalt materials considered, allowing to infer that the mathematical and computational model implemented, is reasonably close to the corresponding laboratory data.

Key Words: DEM; Flexible Pavements; Asphalt Mixes; Computational Simulations; Indirect Tensile Strength.



1 INTRODUCCIÓN

La simulación mecánica computacional de materiales adheridos como las mezclas asfálticas y las rocas, los suelos cohesivos y también de los suelos de estructura granular, ha sido por décadas un tópico importante como trabajo de investigación en la ingeniería geotécnica y de pavimentos. Comúnmente, la mecánica del medio continuo clásica ha sido usada para idealizar este tipo de materiales, por medio de procedimientos de solución numérica como el Método de los Elementos Finitos, el Método de las Diferencias Finitas, u otros similares, representando y prediciendo de esta forma su comportamiento mecánico (Santasusana, 2012). De acuerdo con lo anterior, comúnmente los modelos mecánicos de naturaleza continua se ocupan primordialmente del modelado matemático del fenómeno analizado, sin prestar mayor relevancia al significado físico fundamental del fenómeno físico analizado. Bajo dicho marco, la aproximación continua considera tres suposiciones básicas, completamente independientes, siendo una idealización de los materiales para la representación de su comportamiento mecánico. Dichas suposiciones son:

- Continuidad.
- Homogeneidad.
- Isotropía.

Bajo ciertas condiciones de servicio, solicitaciones de carga y de comportamiento, los materiales considerados idealmente continuamente adheridos, tal como el concreto hidráulico, el concreto asfáltico, los suelos finos o las rocas, llegan a perder internamente su propiedad cohesiva, por lo cual su comportamiento mecánico será por lo tanto inherentemente discontinuo, heterogéneo y característicamente anisótropo.

Sin embargo, considerando la idealización continua de un material, autores como (ARDIÇ, 2006) refiere que las técnicas numéricas como el FEM ("*Finite Element Method*") o sus similares, permiten el análisis de fenómenos con naturaleza discontinua, tal como el agrietamiento en mezclas asfálticas, rocas o suelos, por medio de modelos de deterioro, pero en procesos más complejos como pérdidas de adherencia de materiales, fresado de mezclas asfálticas o trituración de rocas, este tipo de modelos no son los apropiados. Lo anterior es debido a que la naturaleza continua hace las relaciones constitutivas complejas, requiriendo de un número excesivo de parámetros para modelar de forma más confiable su comportamiento ingenieril.

Bajo el marco de referencia anteriormente descrito, se ha demostrado en la literatura técnica especializada correspondiente, que los procedimientos basados en modelos de naturaleza discreta son más adecuados para la simulación mecánica de problemas con discontinuidades múltiples.

Los métodos numéricos de naturaleza discreta más frecuentemente utilizados para la simulación de materiales ingenieriles, son el DEM y el método de la Dinámica Molecular (MD "*Molecular Dynamics*"). Ambos métodos numéricos abarcan un gran espectro de comportamientos constitutivos de materiales, leyes de contacto y geometrías de tipo arbitrarias. El Método de Elementos Discretos es un procedimiento de aproximación numérico de naturaleza discreta, con creciente aceptación en la ingeniería geotécnica y vial, para el modelamiento y análisis mecánico de rocas, concreto hidráulico, suelos y



mezclas asfálticas. Sin embargo, de acuerdo con lo indagado en la revisión del estado del arte, actualmente muchos de sus aspectos teóricos están en proceso de investigación más profunda, para validar su aplicabilidad. El DEM tiene la ventaja de permitir el uso de diferentes leyes de comportamiento, de características lineales o no lineales, dependiendo de la naturaleza del proceso que será simulado. Esto permite el estudio de diferentes problemas en varias escalas, y aun el modelamiento del comportamiento de las partículas a su tamaño real.

Todos los algoritmos numéricos soportados en este trabajo de grado, han sido implementados de manera educacional en un *software* desarrollado en el lenguaje de programación Visual Basic.NET, el cual fue empleado para correr los ejemplos numéricos ejecutados y aquí relacionados.

En síntesis, este documento presenta el desarrollo y soporte técnico pormenorizado del alcance de presente trabajo de grado, el cual visto de manera global, comprende siete (7) Capítulos incluyendo esta Introducción como Capítulo 1, más el aparte de anexos correspondientes.

El Capítulo 1 remarca la introducción del trabajo de grado, de igual forma refiere el objetivo general y los objetivos específicos del estudio, además incluye un numeral que define y acota el alcance del trabajo de grado, remarca las limitaciones identificadas en el desarrollo del mismo y explica el desarrollo metodológico proyectado y realizado durante el periodo de su ejecución.

Todo el marco teórico necesario para el desarrollo del trabajo se encuentra referido en el Capítulo 2, en donde se presenta una breve descripción conceptual sobre el comportamiento reológico de mezclas asfálticas, se explica la metodología de realización del ensayo de tracción indirecta sobre materiales bituminosos estandarizado para Colombia, y se extrae el fundamento teórico y la descripción ligera del Método de los Elementos Discretos. De igual forma se reseña el estado del arte indagado en relación con el tema desarrollado en el trabajo de grado y se da una breve explicación técnica del lenguaje de programación considerado para el desarrollo del algoritmo lógico del *software* desarrollado.

La explicación conceptual en detalle del algoritmo constitutivo de la aplicación desarrollada y del modelo computacional implementado en el presente trabajo de grado, se presenta en el Capítulo 3.

Toda la relación de los resultados consultados en referencia a las pruebas experimentales del ensayo de tracción indirecta ejecutados sobre mezclas asfálticas fabricadas para su uso en la ciudad de Cali y en el departamento del Cauca, información secundaria empleada y considerada para la verificación numérica del *software* generado en el presente trabajo, es presentados en el Capítulo 4. Se incluye de igual forma, una explicación técnica de los diferentes parámetros técnicos extraídos y de interés para el trabajo.

En el Capítulo 5 se expone la descripción general de las simulaciones realizadas como soporte para el presente estudio, aunado a lo anterior se registran los datos de entrada considerados para alimentar el modelo computacional implementado, y se relacionan los resultados obtenidos de las simulaciones numéricas ejecutadas.



El Capítulo 6 abarca las conclusiones generales y específicas definidas como resultado del trabajo de grado desarrollado, adicionalmente define todas las recomendaciones identificadas y consideradas de trascendental importancia sobre el tema tratado en este proyecto educacional. En complemento, las pautas y consideraciones sobre futuras líneas de investigación asociadas con el tema objeto de este trabajo, son relacionadas en este mismo Capítulo.

En el Capítulo 7 del documento se registra la relación de toda la bibliografía técnica consultada a lo largo del periodo de elaboración del trabajo de grado.

Finalmente se presenta el compendio de anexos y de información soporte complementaria como sustento del referido trabajo.

1.1 OBJETIVO GENERAL

El objetivo principal del presente trabajo de grado correspondió a implementar un modelo computacional que simule el ensayo de tracción indirecta sobre especímenes de mezclas asfálticas, tal que permita evaluar y predecir el desempeño y comportamiento mecánico de estos materiales de manera preliminar, como beneficio técnico para diseño y construcción de pavimentos flexibles.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Conceptualizar teóricamente el método numérico de los Elementos Discretos y del fenómeno mecánico a representar en desarrollo del trabajo de grado propuesto.
- Programar en lenguaje Visual Basic .Net, un *software* básico de modelación por medio del método numérico de los Elementos Discretos, para simular el ensayo de tracción indirecta sobre mezclas asfálticas.
- Ejecutar la prueba del modelo computacional desarrollado y hacer la validación de los resultados a partir de datos experimentales recopilados de información secundaria.

1.3 ALCANCES

El alcance del trabajo de grado propuesto correspondió a desarrollar un modelo computacional empleando para ello la metodología numérica DEM, tal que permita a través de una abstracción bidimensional, simular el ensayo de tracción indirecta ejecutado sobre especímenes de mezclas asfálticas en condición seca, logrando estimar el comportamiento en servicio bajo estas condiciones a partir de resultados de relaciones de fuerzas aplicadas y deformaciones diametrales obtenidas de dicho modelo.

Todo el fundamento teórico físico y matemático aplicado dentro del modelo computacional implementado, es desarrollado, explicado y referenciado de manera detallada y precisa dentro del presente informe, con la finalidad de que sea de fácil entendimiento para el lector.

El trabajo intelectual realizado para la estructuración del algoritmo del modelo en Elementos Discretos propuesto, fue desarrollado pensando en generar condiciones de simpleza computacional, facilidad de procesamiento de información de entrada y de los



resultados, algo de estética de las interfaces de interacción y fácil uso por parte de los usuarios de la aplicación

Las condiciones de simulación analíticas del modelo computacional propuesto, serán consistentes con los requerimientos experimentales especificados en Colombia, a través del artículo INV E786-13 de las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras del Instituto Nacional de Vías.

Bajo el marco anterior, el desarrollo conceptual del presente trabajo de investigación, pretendió indirectamente evaluar la eficacia y eficiencia de un programa computacional estructurado bajo un modelo numérico fundamentado en el DEM, aplicado a la evaluación de la resistencia a tracción indirecta de mezclas asfálticas. En concordancia con lo anterior, se buscó evaluar la aplicabilidad de este método numérico en el estudio y proyección del comportamiento de este tipo de materiales, en el enfoque de la Ingeniería de Pavimentos.

Dentro del comportamiento mecánico de todos los materiales constitutivos del modelo computacional implementado, no se consideraron los efectos del agua dentro de su respuesta tensional correspondiente ni en su modelo de daño implementado, quedando por tanto por fuera del alcance respectivo del trabajo de grado.

Para la simulación numérica y evaluación tensional representada, el material asfáltico de las probetas fue disgregado por sus principales componentes volumétricos, para lo cual, los agregados y el mastic asfáltico (agregado fino, más el filler mineral, más el cemento asfáltico), tuvieron un comportamiento mecánico y reológico específico para el análisis. La misma situación se hizo para la representación numérica de las placas de carga encargadas de transmitir la fuerza al espécimen. Tanto los agregados minerales de la mezcla asfáltica como las placas de transmisión de carga, típicamente fueron modelados mecánicamente de manera elástica, mientras que el mastic asfáltico, fue considerado de comportamiento viscoelástico.

De igual forma, el modelo computacional involucró la consideración mecánica de un modelo de agrietamiento del material asfáltico con el cual se pudo simular la generación y evolución de las grietas del espécimen numérico, a causa de la separación entre los materiales constitutivos adheridos del material bituminoso.

1.4 LIMITACIONES

Dentro de las limitaciones tanto de tipo técnico como de orden metodológico, se identificaron los tópicos relacionados a continuación que no fueron incluidos dentro del alcance del presente trabajo de grado a nivel de profundización y que se considera que no presentan mayor incidencia en los resultados obtenidos, a saber:

- Dentro del modelo computacional desarrollado, se restringió la densidad de discretización y tamaño de los elementos discretos constitutivos a niveles adecuados y lógicos para su aplicabilidad, dado el alto costo informático que lo anterior implica expresado en tiempos de ejecución de las simulaciones y requerimiento de espacio de almacenamiento. En tal sentido, el *software* fue proyectado para ser ejecutado en computadores con especificaciones técnicas de mediana categoría a superior.



- En referencia al mismo criterio anterior, de buscar eficiencia computacional y tiempos razonables de análisis, el modelo numérico formulado para el presente estudio, fue considerado bajo un entorno únicamente bidimensional.
- Aunado a lo anterior, el modelo desarrollado es una abstracción espacial en comparación del ensayo real ejecutado en laboratorio sobre los testigos del material asfáltico.
- Dentro de la caracterización de las mezclas asfálticas consideradas para la validación del modelo computacional desarrollado, no fue posible encontrar resultados referentes a ensayos de definición de parámetros del modelo de agrietamiento considerado en el presente trabajo de grado, teniendo en cuenta la condición especial de este tipo de pruebas, que son enfocadas para adelantar trabajos de investigaciones, y desde luego que no son exigidos por las especificaciones de construcción de índole nacional.

1.5 DESCRIPCIÓN METODOLOGÍA DEL TRABAJO

1.5.1 ENFOQUE CONCEPTUAL DEL TRABAJO

El desarrollo conceptual que se presenta en este estudio, pretende indirectamente evaluar la eficacia y eficiencia de un programa computacional estructurado, desarrollado e implementado bajo un modelo numérico fundamentado en el DEM, aplicado a la evaluación de la respuesta mecánica obtenida por la aplicación de una carga diametral monótonica sobre especímenes cilíndricos de materiales asfálticos. Lo anterior con enfoque en la valoración cuantitativa y cualitativa de su Resistencia a Tracción Indirecta expresada por la relación fuerza de compresión aplicada vs la deformación diametral soportada, bajo condiciones controladas de ejecución del ensayo representado. Para lo anterior, se asumieron comportamientos mecánicos representativos de los materiales constitutivos del espécimen de material asfáltico. En concordancia con lo anterior, se buscó evaluar la aplicabilidad de este método numérico en el estudio y proyección del comportamiento de este tipo de materiales bituminosos, en el enfoque de la Ingeniería de Pavimentos.

1.5.2 DESARROLLO DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

La estrategia diseñada para dar desarrollo y solución al trabajo, se presenta de forma conceptual y explicativa en el presente numeral. Bajo el marco procedimental ejecutado durante el periodo de desarrollo y bajo la mira de una escala macro de visualización, el proceso metodológico se dividió en tres partes principales, tal como se describe a continuación:

ETAPA DE ESTUDIO TEÓRICO

Esta primera etapa consistió en la recolección de información técnica general y en el estudio del estado del arte para todas las ramas de conocimiento implicadas dentro de la formulación del trabajo de grado propuesto. Esta etapa del proyecto principalmente buscó profundizar los conceptos teóricos referentes al estudio del comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas empleadas en el diseño y construcción de estructuras de pavimentos flexibles en Colombia, además se investigó todo lo relevante al Método Numérico de los Elementos Discretos y su fundamento teórico. Además, se realizó una investigación bibliográfica correspondiente y se indagó sobre las diversas aplicaciones



que se conocen del método numérico estudiado en el campo de la Ingeniería Vial y la Geotécnica.

De igual forma y en el marco de las tareas dispuestas para la etapa de planeación del modelo numérico y computacional, se buscó analizar de manera detallada la norma de ensayo INV E-786-13, el cual es el documento regente que estipula el INVÍAS para la ejecución de manera estandarizada el ensayo de laboratorio respectivo para la “*Determinación de la Resistencia a la Tensión Indirecta (RTI) de las Mezclas Asfálticas*”.

ETAPA DE PROGRAMACIÓN, DESARROLLO Y VERIFICACIÓN DEL MODELO PROPUESTO

Durante esta segunda fase del proceso de desarrollo del trabajo de grado planteado, se proyectó el estudio avanzado del lenguaje de programación definido para la estructuración del modelo o algoritmo mecánico asociado, que corresponde al lenguaje Visual Basic .Net. De manera paralela, se adelantó un estudio teórico minucioso sobre los diferentes modelos mecánicos y comportamiento reológicos y de daño, con la finalidad de tener todas las herramientas concretas y suficientes para la escogencia más adecuada posible, de los patrones de respuesta tensional de los diferentes materiales constitutivos.

El desarrollo de esta etapa del proyecto involucró como productos resultantes, la conceptualización lógica, numérica y grafica correspondiente para el modelo computacional propuesto, aunado a la ejecución de manera sistemática y en paralelo de todas las pruebas de integridad sistemática de cada uno de los módulos, procedimientos y funciones del programa computacional concebido.

ETAPA DE EJECUCIÓN DEL MODELO Y VALIDACIÓN DE RESULTADOS

Esta etapa del estudio correspondió a la parte final del trabajo de grado, donde se adelantaron todas las ejecuciones del *software* asociado y la recopilación de los resultados arrojados para todas las simulaciones consideradas, en conjunto con el procesamiento de la información de salida entregada por el modelo computacional y su componente gráfico. Con esta información se procedió a adelantar la verificación, teniendo como referencia resultados de pruebas de tracción indirecta ejecutadas sobre mezclas de alto módulo, mezclas modificadas con polímeros y mezclas convencionales, fabricadas para la instalación en proyectos de infraestructura en la ciudad de Cali o en el sur del departamento del Cauca.

Es de tener en cuenta que, durante el desarrollo de la Etapa Final de Ejecución de dicho modelo, se detectaron errores o deficiencias en la programación lógica del algoritmo considerado, por lo cual fue necesario realizar conjuntamente actividades de revisión, corrección y re-estructuración paralela del código fuente desarrollado, tal que se permitiera solventar dichas deficiencias o de mejorar ciertas insatisfacciones computacionales consideradas.



2 MARCO TEÓRICO

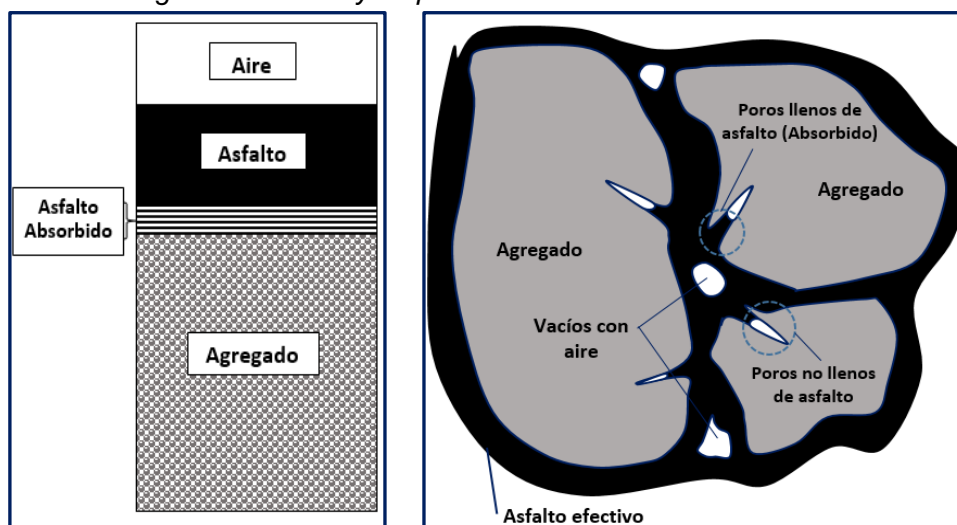
2.1 FUNDAMENTOS DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

2.1.1 INTRODUCCIÓN

Las mezclas asfálticas empleadas para la construcción de estructuras de pavimento en la infraestructura vial, se constituyen de agregados minerales más el ligante asfáltico y vacíos con aire, con la incorporación eventualmente de aditivos químicos con la finalidad de mejorar ciertas propiedades del conjunto, de acuerdo a las particularidades del proyecto. Las mezclas asfálticas deben ser capaces de resistir deformaciones y agrietamientos, ser durables en el tiempo, resistir los efectos nocivos generado por el contacto con agua, proporcionar una buena superficie de rodadura para los vehículos, sin embargo, deben ser económicas, fácil de fabricar y de instalar en la vía.

Dentro de las mezclas asfálticas empleadas normalmente, los agregados típicamente constituyen entre el 70% al 85% en volumen. Los ligantes asfálticos, que típicamente comprenden entre el 5% al 15% en volumen dependiendo del tipo de mezcla, son una mixtura de compuestos hidrocarbonados de diferentes pesos moleculares normalmente provenientes de la destilación del crudo de petróleo. Considerándose que la estructura granular del árido constitutivo de las mezclas asfálticas es porosa, cierta proporción del material bituminoso es absorbido por dichos poros del granular, por consiguiente, parte del árido y del asfalto comparten un espacio dentro de la mezcla asfáltica (comúnmente conocido como asfalto absorbido). La consideración de la absorción de ligante permite subdividir el volumen del asfalto dentro de la mezcla, en volumen de asfalto efectivo, que forma la película de ligante que demarca y adhiere las partículas del agregado, y en volumen de asfalto absorbido por los poros del agredo. La Figura 2-1 expone de manera general, el diagrama de fases utilizado para describir las propiedades volumétricas y gravimétricas de una mezcla asfáltica compactada y el esquema de ilustración real dentro de la mezcla asfáltica.

Figura 2-1. Diagrama de fases y esquema real constitutivo de las mezclas asfálticas.



Tanto las proporciones de los materiales constitutivos de las mezclas asfálticas, sus condiciones de fabricación, como las propiedades químicas, físicas y mecánicas de los mismos componentes, debe ser analizados y definidos en detalle, toda vez que tienen una influencia directa tanto en el comportamiento y desempeño en servicio de las estructuras de pavimentos que conforman, como en la durabilidad de la misma. Se debe tener en cuenta que las propiedades de las mezclas asfálticas también varían a lo largo del tiempo debido a la alteración química y física que genera el envejecimiento del cemento asfáltico por efecto de la fabricación e instalación de la mezcla asfáltica, además de los efectos climáticos durante la operación del pavimento (Arenas Lozano, 2003). La Figura 2-2 muestra el detalle de una mezcla asfáltica densa en caliente instalada como capa de rodadura de una pista de aeropuerto.

Figura 2-2. Detalle de Mezcla densa en caliente instalada como capa de refuerzo de una pista de aeropuerto.



2.1.2 TIPOS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

En la actualidad se han definidos diversas clasificaciones de las mezclas asfálticas, de acuerdo con las características y particularidades de tipo físicas, mecánicas y reológicas de todos sus materiales constitutivos.

Bajo lo anterior, de acuerdo con las características de la estructura granular del material árido, las mezclas asfálticas pueden ser clasificadas como:

- mastic asfáltico.
- morteros asfálticos.
- macadam asfáltico.
- concretos asfálticos.

En función de la temperatura de fabricación e instalación, las mezclas asfálticas se pueden categorizar en:

- mezclas frías.
- mezclas tibias.
- semi tibias.

- mezclas en caliente.

En función del porcentaje de vacíos con aire que componen las mezclas asfálticas, estas se pueden clasificar en:

- porosas (más del 20%)
- abiertas (del 12% al 18%).
- semidensas (6% al 12%)
- densas (menos del 6%), ver Figura 2-2.

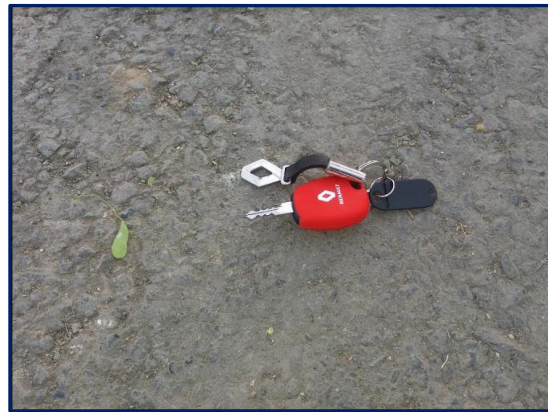
De igual manera, considerando la distribución granulométrica del árido, las mezclas asfálticas se pueden clasificar en:

- continuas.
- discontinuas.

Dependiendo de las características físico-químicas del ligante asfáltico, se pueden catalogar en:

- mezclas de alto módulo, tal como se muestra en la Figura 2-3.
- mezclas convencionales.
- mezclas asfalto-caucho.

Figura 2-3. Detalle de Mezcla Asfáltica de Alto Módulo tipo MAM-25, constitutiva de una estructura de pavimento flexible.



2.1.3 PROPIEDADES DESEABLES DE MEZCLAS ASFÁLTICAS Y PATOLOGÍAS PRINCIPALES

Con la finalidad de lograr un óptimo desempeño del pavimento, se debe de seleccionar de manera adecuada el tipo y la distribución granulométrica del árido constitutivo, el tipo y cantidad del ligante asfáltico y de los aditivos químicos necesarios para las condiciones particulares del proyecto. En concordancia con lo anterior, las propiedades relevantes más deseables en una mezcla asfáltica empleada en la construcción de estructuras de pavimento, son las relacionadas y descritas a continuación (Garnica *et al.*, 2005):

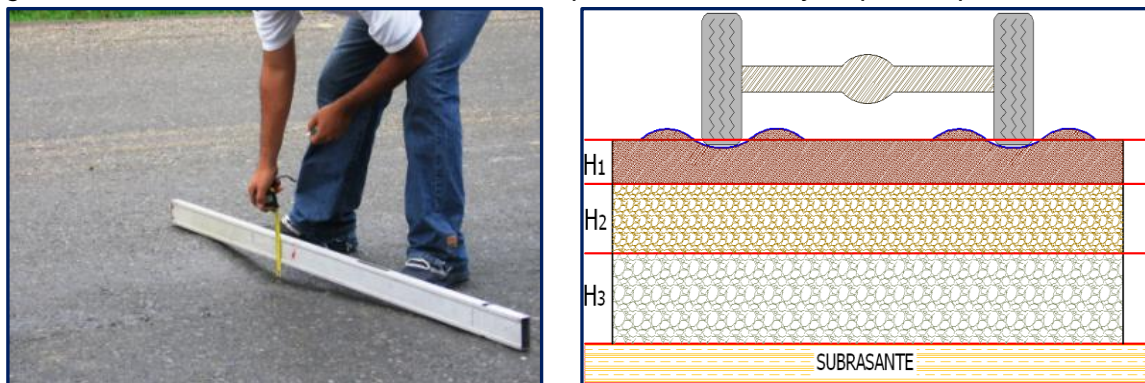
- Estabilidad: capacidad de la mezcla a soportar deformaciones plásticas debido a las cargas vehiculares.

- **Durabilidad:** deberá resistir el envejecimiento del asfalto, la desintegración del agregado y el desprendimiento de la película de asfalto, ante las solicitaciones del clima y de las cargas.
- **Flexibilidad:** capacidad de la mezcla a deformarse sin sufrir fisuraciones.
- **Resistencia a la fatiga:** habilidad de la mezcla a soportar cargas repetidas.
- **Resistencia al agrietamiento por bajas temperaturas en condiciones extremas de servicio.**
- **Resistencia al daño por humedad e impermeabilidad:** adecuada adherencia del asfalto con el agregado sin generar la oxidación del asfalto.
- **Resistencia al deslizamiento:** capacidad de la mezcla para mantener una adecuada adherencia entre el neumático y la superficie de rodadura del pavimento.
- **Trabajabilidad:** el material debe ser de fácil colocación y compactación.

En una estructura de pavimento flexible en servicio, las capas asfálticas constitutivas están sujetas a diversas solicitaciones que afectan su condición estructural y funcional. Estas solicitaciones se generan principalmente a causa del tráfico vehicular y el clima y contribuyen en diferente medida al deterioro de las mezclas y a la aparición de patologías sobre estas. Dentro de las patologías principales de orden estructural asociadas a los pavimentos flexibles y relacionadas directamente con las mezclas asfálticas, son las descritas a continuación (Mintransporte & Invías, 2008):

- **Ahuellamiento o deformaciones plásticas:** depresión longitudinal sobre las roderas del tráfico debido a la compresión y/o movimiento lateral, en una o más de las capas que componen la estructura del pavimento, generado por las cargas de los vehículos. La Figura 2-4 muestra el detalle de campo e ilustrativo de este tipo de deterioro.

Figura 2-4. Ahuellamiento real en estructura de pavimento flexible y esquema típico del deterioro.



- **Agrietamiento por fatiga:** resultado de la aplicación de un esfuerzo de tensión mayor a la resistencia a la tensión ofrecida por la mezcla asfáltica. Puede ser agrietamiento normal (piel de cocodrilo) o agrietamiento longitudinal (agrietamiento inverso). La Figura 2-5 muestra el detalle en campo de este tipo de patologías.

Figura 2-5. Agrietamiento invertido y normal, generado en estructuras de pavimento flexible.



- Agrietamiento térmico: se atribuye a la deformación por tensión inducida en la mezcla asfáltica, por disminución de la temperatura del material hasta un nivel crítico. Típicamente, se caracteriza por fisuras de distribución transversal (perpendiculares al tránsito) que muestran un patrón de separación sistemáticamente uniforme.

Figura 2-6. Agrietamiento térmico en estructuras de pavimento flexible.



2.1.4 REOLOGÍA Y VISCOELASTICIDAD DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

Tal como se ha comentado con anterioridad, la respuesta mecánica de las mezclas asfálticas se ve influenciada directamente por las propiedades particulares de sus componentes, la dosificación de los mismos y la respectiva interacción entre ellos.

La oxidación y envejecimiento, la viscoelasticidad y la susceptibilidad térmica, son las características del ligante bituminoso que más influyen en el comportamiento de la mezcla asfáltica. Para el asfalto, las condiciones de tiempo de carga y temperatura del material se relacionan de tal manera que el comportamiento del asfalto a muy altas temperaturas es correspondiente al comportamiento del betún a largas duraciones de aplicación de carga, actuando como un líquido viscoso en este caso. Para la condición opuesta, temperaturas muy bajas o aplicación de cargas de muy corta duración, el ligante

responde típicamente como un material sólido de tipo elástico. De igual forma, las propiedades químicas de los ligantes asfálticos influyen directamente en su comportamiento reológico, que a su vez influye directamente en el comportamiento del pavimento en servicio. Dado lo anterior, autores como (Garnica Anguas *et al.*, 2002), expresan que la particularización química de un material bituminoso genera condiciones adecuadas para que la mezcla asfáltica presente tendencia a un mecanismo de falla en particular.

En condiciones prácticas de servicio, los ligantes asfálticos exhiben un comportamiento de fluido newtoniano (proporcionalidad entre esfuerzo cortante y la velocidad de deformación) en las temperaturas de mezclado durante la fabricación del concreto asfáltico en planta (160°-170° C). Sin embargo a las temperaturas normales de servicio, el asfalto expone un comportamiento no newtoniano, donde la viscosidad del ligante es función de la velocidad de deformación que experimenta (Papagiannakis & Masad, 2008). Por lo anterior, lo recomendando es asociar el comportamiento no newtoniano empleando modelos viscoelásticos lineales, lo cual indica que las propiedades mecánicas del material cambian como una función de la frecuencia o velocidad de aplicación de carga y de la temperatura.

En otro aspecto, el árido constitutivo de la mezcla asfáltica (ya sea de origen natural, procesado o sintético), tiene la función principal de generar un esqueleto mineral para soportar las cargas impuestas por el tráfico vehicular. Los agregados naturales generalmente son extraídos de grandes formaciones de roca a través de excavaciones de tipo abiertas (canteras) como lo expuesto en la Figura 2-7, o recopilado de playas de préstamo. Típicamente se reduce la roca extraída a tamaños adecuadamente utilizables por medio de trituración mecánica. Mientras que los agregados artificiales o sintéticos son a menudo el subproducto de otras industrias manufactureras, tal como el caso de las escorias de alto horno, vidrio o elementos de acero reciclado.

Figura 2-7. Cantera para explotación de granulares para fabricación de mezclas asfálticas.



Bajo el marco anterior, y para garantizar un adecuado desempeño de las estructuras de pavimento dentro de la infraestructura vial, los agregados pétreos deben presentar adecuadas características respecto a condiciones de:

- Resistencia.
- Durabilidad.
- Forma.
- Distribución del conjunto.
- Textura superficial.
- Porosidad.
- Afinidad con el agua.
- Adherencia con el asfalto.

Los agregados de alta dureza interna, de textura rugosa y de forma cúbica, generan mejor respuesta ante las cargas que los áridos blandos, redondeados y de textura lisa. En una masa de material granular que soporta esfuerzos, se generan planos por donde las partículas se cizallan entre sí, pudiendo generar deformaciones internas dentro del conjunto de áridos. Por lo anterior, la resistencia al corte de los agregados cumple un rol trascendental en la respuesta de las mezclas asfálticas que constituyen (Garnica *et al.*, 2005).

En aquellos casos donde se identifica que, para una mezcla asfáltica determinada, los ligantes asfálticos normales no brindarían adecuadas condiciones de respuesta ante las sollicitaciones impuestas por el clima o el tránsito, o no presentan una adherencia óptima con el agregado mineral constitutivo, se hace necesario incluir aditivos que modifiquen las propiedades reológicas, químicas y/o físicas del ligante. Autores como (Papagiannakis & Masad, 2008) y (Arenas Lozano, 2003), refieren que los principales agentes modificadores empleados en la fabricación de mezclas asfálticas para pavimentos vehiculares y aeropuertos, son listados a continuación:

- Polímeros Termoestables.
- Polímeros Elastoméricos.
- Polímeros Termoplásticos.
- Extensores.
- Fibras.
- Modificadores Antistripping.
- Asfaltos Naturales.
- Llenantes minerales.

En Colombia, el (Mintransporte & Invías, 2022) regula el uso de aditivos modificadores de asfalto para proyectos de infraestructura vial que requieran mezclas especiales de acuerdo a las características particulares de servicio, reglamentándose así la fabricación e instalación de mezclas asfálticas de alto módulo, mezclas asfálticas drenantes, mezclas asfálticas de alta exigencia (para climas cálidos y elevados índices de tránsito), mezclas antirreflectivas de grietas del tipo arena-asfalto o riegos en caliente para membranas de absorción de esfuerzos.

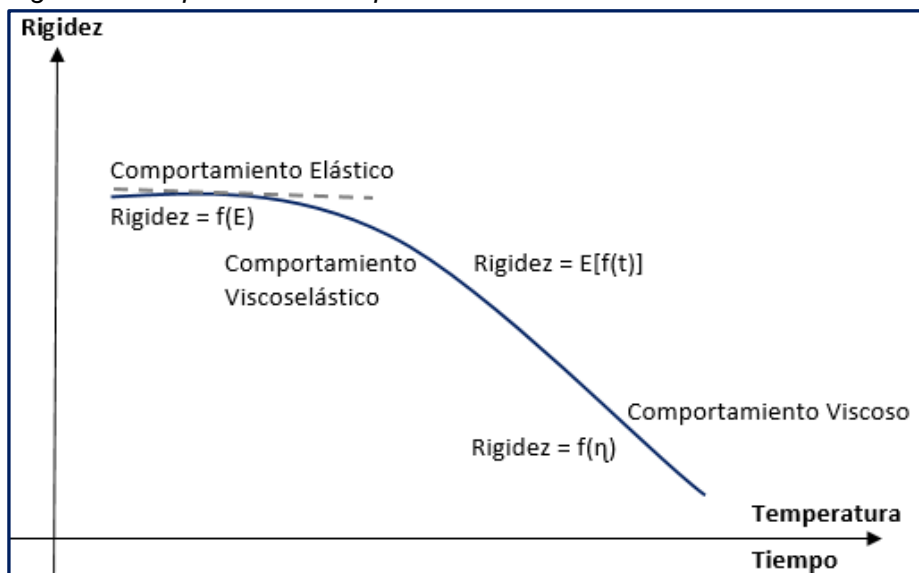
Típicamente y en referencia al comportamiento mecánico de las mezclas bituminosas, las capas asfálticas muy deformables son susceptibles a presentar ahuellamiento y



exudación, mientras que aquellas que son muy rígidas, tienen susceptibilidad a presentar agrietamientos por fatiga y agrietamientos térmicos. Por lo cual, una alternativa de manejo a lo anterior, es el empleo de mezclas asfálticas modificadas con polímeros, cuyo aditivo modificador deberá ser seleccionado según la condición particular de servicio del proyecto.

Como producto de la integración de los comportamientos de los materiales constitutivos y su respectiva interacción, aunado a las condiciones particulares de fabricación y de servicio, (Garnica *et al.*, 2005) refiere que las mezclas asfálticas presentan un comportamiento visco-elasto-plástico, tal como se esquematiza en la Figura 2-8. En primera instancia, el mastic asfáltico (conformado por el betún más el llenante mineral) tiene un comportamiento viscoelástico o viscoso. De igual forma, el material granular tiene un comportamiento típicamente elastoplástico. En correspondencia, se refiere por tanto que las mezclas asfálticas exhiben un comportamiento visco-elástico-plástico, sesgándose su comportamiento de acuerdo a las características de la sollicitación expresada en temperatura del material como en la frecuencia de la carga actuante.

Figura 2-8. Espectros de comportamiento mecánico de mezclas asfálticas.



Referencia: adaptada de (Garnica *et al.*, 2005, p. 12)

Consecuente con lo previamente referido, los parámetros inherentes a las mezclas asfálticas y que tienen mayor incidencia dentro de la respuesta mecánica del material, son los referidos a continuación:

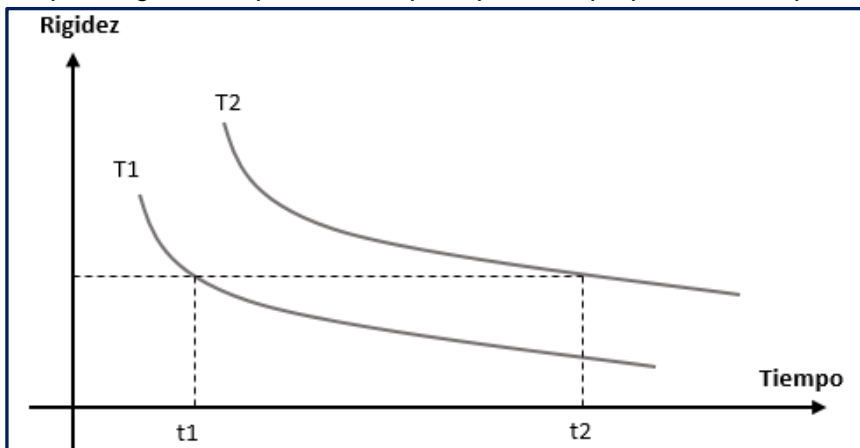
- Distribución granulométrica del agregado.
- Dureza, forma y textura del agregado mineral.
- Proporción de finos dentro del árido.
- Naturaleza química y física del cemento asfáltico.
- Proporción de asfalto dentro de la mezcla.
- Porcentaje de vacíos dentro de la mezcla asfáltica.



En el ámbito de comportamiento viscoelástico de las mezclas asfálticas, las propiedades mecánicas del material son función del tiempo de aplicación de carga y/o de la temperatura del mismo. (Papagiannakis & Masad, 2008) refiere que la mayoría de los cementos asfálticos son considerados de comportamiento termoreológicamente simple, esto refiere que el efecto del tiempo de aplicación de las cargas sobre las propiedades mecánicas del material, puede ser correspondiente con el efecto de la temperatura del material.

De la misma forma, el efecto de la temperatura sobre las propiedades mecánicas del material, puede ser descrito por el efecto del tiempo de aplicación de las cargas. Así y explicado bajo un contexto mecánico, la rigidez del material asfáltico para una temperatura $T1$ y un tiempo de carga $t1$, puede equipararse con una rigidez a una temperatura $T2$ y un tiempo de carga $t2$, donde $t1$ es menor que $t2$ y $T1$ es mayor que $T2$, tal como se aprecia en la Figura 2-9. La anterior situación y propiedad relevante desde el punto de vista reológico, denominada en la literatura especializada como principio de superposición tiempo-temperatura, es un tópico importante para obtener las propiedades viscoelásticas (módulo dinámico, ángulo de fase, *creep* y módulo de relajación) del material, en un amplio rango de temperaturas de trabajo y tiempos de aplicación de cargas (o frecuencias).

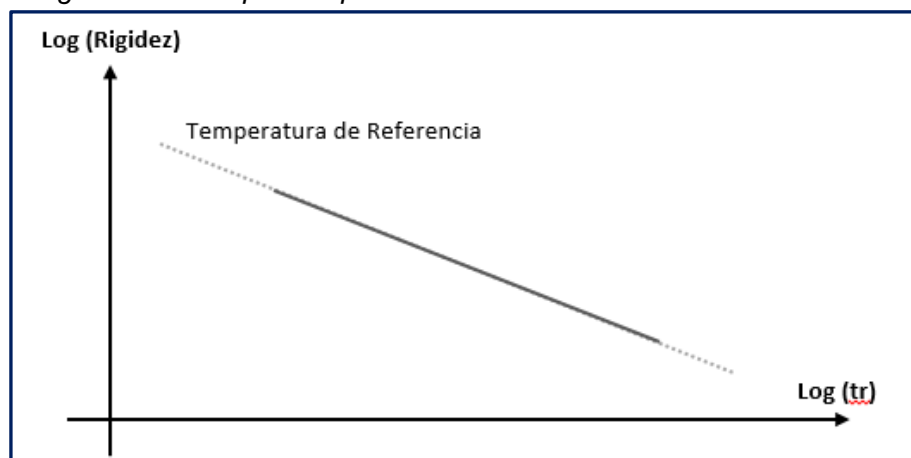
Figura 2-9. Esquema gráfico explicativo del principio de superposición tiempo - Temperatura.



Referencia: adaptada de (Papagiannakis & Masad, 2008, p. 119)

De manera correspondiente, a partir del principio de superposición tiempo – temperatura, es posible construir la curva maestra de una mezcla asfáltica, que (Papagiannakis & Masad, 2008) define como una gráfica empleada para describir las propiedades viscoelásticas en una temperatura de referencia sobre un amplio espectro de tiempo o frecuencias de carga, con lo cual es posible estimar la propiedades de respuesta mecánica sobre un amplio rango de temperaturas y tiempos de carga. La Figura 2-10 expone una curva maestra típica para una mezcla de concreto asfáltico, comúnmente empleado en proyectos de infraestructura vial. Dicha curva maestra es comúnmente empleada en escenarios de diseño estructural de pavimentos flexibles o como parámetro de verificación en procesos de control de construcción en obra.

Figura 2-10. Esquema tipo de curva maestra de una mezcla asfáltica.



Referencia: adaptada de (Papagiannakis & Masad, 2008, p. 120)

2.2 ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA

En Colombia, el Instituto Nacional de Vías a través del artículo INV E-786 asociado a las Normas de Ensayos de Materiales para Carreteras versión 2013, estandariza el procedimiento de muestreo y de ejecución del ensayo requerido para la Determinación de la Resistencia a la Tensión Indirecta (RTI) de las Mezclas Asfálticas, tanto de probetas fabricadas en laboratorio, como para núcleos extraídos de capas de pavimento.

2.2.1 OBJETIVO Y RESUMEN DEL ENSAYO

Tal como se especifica en (Ministerio de Transporte, 2013), la resistencia a tracción indirecta para mezclas asfálticas se evalúa mediante la aplicación de una sollicitación de carga a través del plano diametral de una probeta cilíndrica, considerándose condiciones controladas de velocidad de deformación y temperatura del material en el laboratorio.

La resistencia a la tensión indirecta se puede emplear como indicativo de la calidad relativa de las mezclas asfálticas en conjunto con los ensayos para su diseño, y para estimar su potencial de agrietamiento y de ahuellamiento, y para evaluar el potencial de daño por humedad.

2.2.2 EQUIPO REQUERIDO

Un equipo típico empleado para la ejecución del ensayo consta básicamente de los siguientes aditamentos:

- Dispositivo de carga: Un gato con carga y un anillo dinamométrico, o una máquina servo hidráulica con una celda de carga electrónica, capaz de aplicar cargas de compresión con una velocidad de deformación controlada, mientras mide tanto la carga como la deformación.
- Bandas de carga: Con una superficie cóncava con un radio de curvatura igual al radio nominal del espécimen de ensayo. Para especímenes con diámetro nominal de 101.6 mm, el ancho de las bandas deberá ser 12.70 +/- 0.3 mm, mientras que para probetas con 150 mm de diámetro nominal, el ancho de las bandas será de 19.05 +/- 0.3 mm.



- Sistema de control de temperatura: Baño de aire o de agua, que permita mantener los especímenes a la temperatura de ensayo especificada $\pm 1.0^{\circ}\text{C}$.
- Termómetro: de rango adecuado y con subdivisiones legibles a 0.1°C , u otro dispositivo termostático de igual o superior exactitud, precisión y sensibilidad.
- Elementos misceláneos: Cinta, regla o juego de calibradores, para medir la altura de las probetas.

2.2.3 ESPECÍMENES DE ENSAYO

Los especímenes de laboratorio se pueden moldear con un diámetro nominal de 101.6 mm cuya altura debe ser, como mínimo, 50.8 mm, mientras que, si el diámetro nominal es de 150 mm, la altura mínima debe ser 75 mm. Se especifica por norma que el ensayo deberá considerar un mínimo de tres probetas para cada tipo de mezcla estudiada.

Para el caso de núcleos, estos deben ser lisos, con caras paralelas, y cumplir los mismos requisitos de diámetro y altura exigidos para los especímenes moldeados en el laboratorio excepto que se permite una altura mínima de 38 mm cuando el diámetro es de 101.6 mm. Se debe considerar que la norma en referencia estipula que los núcleos también se deberán ensayar por triplicado.

2.2.4 RESUMEN DEL PROCEDIMIENTO

Se inicia determinando la altura del espécimen, con una aproximación a 1.0 mm. Para núcleos, el diámetro se mide en la mitad de su altura, tomando cuatro lecturas a separaciones de 90° y determinando el promedio con aproximación a 1.0 mm.

Se lleva el espécimen a la temperatura de ensayo $\pm 1.0^{\circ}\text{C}$, por alguno de los procedimientos regulados (baño de aire o baño de agua). La temperatura de ensayo recomendada es de 25°C .

Se coloca el espécimen sobre la banda de carga inferior y se desciende de manera lenta la banda de carga superior hasta que haga un contacto leve con el espécimen. Se verifica que las bandas de carga se encuentren paralelas y centradas sobre el plano diametral vertical.

Se aplica sobre la probeta una carga vertical de compresión hasta alcanzar la carga máxima y se anota el valor de esta. La velocidad de deformación deberá ser de 50 ± 5 mm/min.

2.2.5 CÁLCULOS

La resistencia a la tensión indirecta del espécimen, se calcula con la siguiente expresión:

$$RTI = \frac{2000 * P}{\pi * t * D}$$

Dónde: RTI es la resistencia a la tensión indirecta en kPa.

P: Carga máxima en N.

T: Altura del espécimen inmediatamente antes del ensayo en mm.

D: Diámetro del espécimen justo antes del ensayo en mm.



2.2.6 NORMA DE REFERENCIA

ASTM D 6931 – 12.

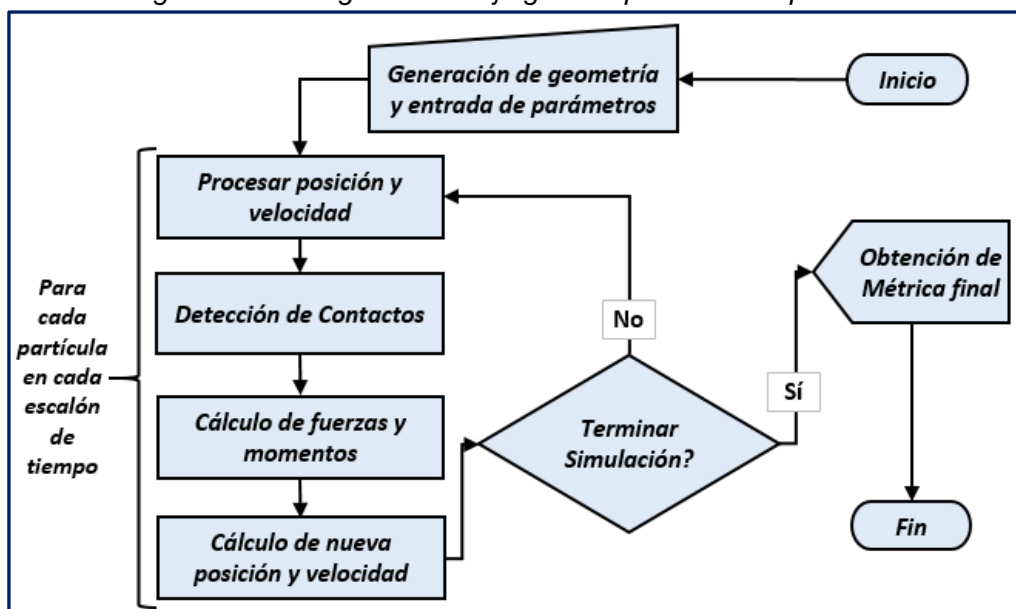
2.3 MÉTODO DE LOS ELEMENTOS DISCRETOS

2.3.1 ASPECTOS GENERALES DEL DEM

Peter A. Cundall en el año de 1971, desarrolló el método general denominado Método de los Elementos Distintos, con el objetivo de simular el comportamiento mecánico de sistemas de partículas, aplicándolo al estudio de fracturas en Mecánica de Rocas y de Muros de Mampostería. Posteriormente en el año de 1979 y como primera aproximación propuesta en la literatura (Cundall & Strack, 1979), aplicaron el método para modelar cuerpos sólidos y granulares por medio de ensamblajes de partículas discretas dentro del campo de la Geomecánica. En dicho esquema de trabajo del método propuesto por Cundall y Strack, las partículas discretas fueron modeladas como discos en 2D y esferas en 3D, sin embargo, (Barbosa & Ghaboussi, 1992) y (Matuttis *et al.*, 2000), propusieron formas poligonales de elementos discretos, con la finalidad de reproducir análisis más representativos y reales. Hasta el día de hoy, y con el desarrollo y avance de los computadores, el método se ha desarrollado de forma acelerada y ha adquirido nuevos enfoques que dan la posibilidad de estudiar un gran número de fenómenos y problemas de la naturaleza y de la ingeniería en general.

En términos generales, el DEM representa el comportamiento mecánico de un sistema formado por un conjunto de partículas, típicamente dispuestas de forma aleatoria. Cada partícula o elemento discreto tiene su movimiento independiente, y las partículas interactúan entre sí debido a contactos entre ellas. Básicamente, el algoritmo del DEM desde el punto de vista lógico, se basa en tres procesos básicos: i) Detección de contactos entre partículas, ii) Cálculo de fuerzas y momentos, iii) Integración de ecuaciones de movimiento para el cálculo de la posición y velocidad de cada partícula. La Figura 2-11 esquematiza el flujo de trabajo típico del Método de Elementos Discretos.

Figura 2-11. Diagrama de flujo general para análisis por DEM.



2.3.2 ECUACIONES DE MOVIMIENTO DEL DEM

El movimiento traslacional y rotacional de las partículas en análisis de modelos simulados por Elementos Discretos, está en función de las fuerzas y momentos resultantes actuando sobre cada uno de dichos cuerpos, y básicamente es descrito por medio de las ecuaciones de Newton – Euler de dinámica de cuerpos rígidos. En modelaciones 2D, cada partícula tiene 3 grados de libertad independientes, 2 traslaciones y 1 rotación. Así, para cualquier i -ésimo elemento discreto de un modelo simulado, de forma vectorial se tiene que:

$$F_i = m_i * (\ddot{u}_i - g)$$

$$T_i = I_i * \frac{dw_i}{dt}$$

Donde u_i es el desplazamiento del centro de gravedad de la partícula en el marco de un sistema coordenadas fijo, g es la aceleración de la gravedad, w_i es la velocidad angular, m_i es la masa del elemento discreto, I_i el momento de inercia, F_i la fuerza resultante, y T_i el momento resultante alrededor del eje central.

El vector F_i corresponde a la suma de todas las fuerzas aplicadas externamente a la partícula i -ésima, y el vector T_i refiere al momento resultante aplicado el i -ésimo elemento. Se considera que la masa de las partículas es distribuida uniformemente a través de su área.

2.3.3 INTEGRACIÓN DE ECUACIONES DE MOVIMIENTO

Para los métodos de simulación basados en medios discontinuos como el DEM, autores como (Labra Gonzalez, 2012) y (Lee, 2006) recomiendan el uso de esquemas de integración explícitos, toda vez que representa un bajo costo computacional, facilidad lógica y óptima precisión en sus cálculos. Así las cosas, las ecuaciones de movimiento anteriormente relacionadas, correspondientes a ecuaciones diferenciales de segundo orden, que son integradas numéricamente de forma explícita a lo largo del tiempo usando el Esquema de Integración de *Verlet de Velocidad*. Dicho algoritmo fue seleccionado para la integración de las ecuaciones de movimiento (tanto rotación como traslación de las partículas) en el presente trabajo de grado.

En cada escalón de tiempo, el estado de las partículas es actualizado, a partir de la Segunda Ley de Newton, usando dicho esquema explícito. Así, son usadas para definir la próxima condición de posición y de velocidad, la posición actual, la velocidad actual, la masa y las fuerzas externas, todo lo anterior, independientemente de las otras partículas o elementos. Consecuentemente, al inicio de un escalón dado t , la posición es actualizada a partir de la velocidad y aceleración previa. La aceleración actual es calculada a partir de la suma vectorial de las fuerzas externas. La velocidad actual es calculada a partir de la posición previa y del promedio de la aceleración previa y la actual.

El algoritmo de cálculo del esquema de integración de tiempo de *Verlet*, referido al movimiento traslacional de una partícula i -ésima, en el t -ésimo escalón de tiempo, es referido en los siguientes pasos:

1. $v_i \left(t + \frac{1}{2} \Delta t \right) = v(t) + \frac{1}{2} a(t) * \Delta t$



$$2. \quad x_i(t + \Delta t) = x(t) + v \left(t + \frac{1}{2} \Delta t \right) * \Delta t$$

$$3. \quad a_i(t + \Delta t) = \frac{F_i}{m_i} \quad \text{Obtenido a partir de las interacciones con otras partículas.}$$

$$4. \quad v_i(t + \Delta t) = v \left(t + \frac{1}{2} \Delta t \right) + \frac{1}{2} a \left(t + \frac{1}{2} \Delta t \right) * \Delta t$$

Dónde: x_i , v_i , a_i , corresponden a la posición, la velocidad y la aceleración traslacional de la partícula en análisis.

De igual forma, el algoritmo del esquema de integración de tiempo, referido al movimiento rotacional de una partícula i -ésima, en el t -ésimo escalón de tiempo, es referido en los siguientes pasos:

$$1. \quad w_i \left(t + \frac{1}{2} \Delta t \right) = w(t) + \frac{1}{2} \dot{w}(t) * \Delta t$$

$$2. \quad \theta_i(t + \Delta t) = \theta(t) + w \left(t + \frac{1}{2} \Delta t \right) * \Delta t$$

$$3. \quad \dot{w}_i(t + \Delta t) = \frac{T_i}{I_i} \quad \text{Obtenido a partir de las interacciones con otras partículas.}$$

$$4. \quad w_i(t + \Delta t) = w \left(t + \frac{1}{2} \Delta t \right) + \frac{1}{2} \dot{w} \left(t + \frac{1}{2} \Delta t \right) * \Delta t$$

Dónde: θ_i , w_i , \dot{w}_i , corresponden al ángulo de orientación, la velocidad angular y la aceleración angular referido al movimiento rotacional de la partícula en análisis. Se debe resaltar que el análisis rotacional no siempre es necesario de ejecutar, pues depende de la naturaleza y del nivel de confiabilidad deseado para el problema simulado.

2.3.4 ESTABILIDAD NUMÉRICA Y ESCOGENCIA DEL ESCALÓN DEL TIEMPO.

La integración explícita en el tiempo para la solución de las ecuaciones diferenciales que gobiernan el comportamiento de las partículas en el DEM, conduce a una alta eficiencia computacional y esto permite la solución de grandes modelos en este tipo de análisis numérico. Sin embargo, la desventaja conocida del esquema de integración explícita es su estabilidad numérica condicional que impone la limitación en la magnitud del escalón de tiempo $\Delta t \leq \Delta t_{cr}$. Autores como (Cundall & Strack, 1979), precisaron que una de las ideas fundamentales del DEM, es que el escalón de tiempo debe ser lo suficientemente pequeño, tal que en un simple paso del análisis del modelo, los efectos de una partícula no se propaguen más allá que sus partículas vecinas próximas.

Una estimación práctica común de este escalón de tiempo crítico, se basa en el periodo natural de un sistema masa-resorte imaginario (Labra Gonzalez, 2012). Bajo este contexto, los datos deben ser capaces de viajar más rápido a través del dominio que las mismas partículas. Lo anterior, explicado en el marco particular del DEM, implica que, dada una partícula con una velocidad suficiente, esta puede llegar a saltar otra partícula dentro del escalón de tiempo. Así, la detección de las interacciones y sus respectivos efectos, sería más lento que el movimiento de las partículas, conduciendo a un comportamiento impredecible y erróneo del modelo estudiado.

Consecuentemente, Δt_{cr} corresponde a un escalón de tiempo crítico determinado por la frecuencia natural más alta del sistema o del modelo ($w_{máx}$), de acuerdo con la siguiente expresión matemática:



$$\Delta t_{cr} = \frac{2}{w_{m\acute{a}x}}$$

Si existe amortiguamiento, el incremento de tiempo crítico es dado por la siguiente expresión:

$$\Delta t_{cr} = \frac{2}{w_{m\acute{a}x}} \left(\sqrt{1 + \xi^2} - \xi \right)$$

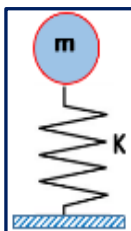
Donde ξ es la fracción del amortiguamiento crítico correspondiente a la frecuencia más alta $w_{m\acute{a}x}$. El cálculo exacto de la frecuencia más alta $w_{m\acute{a}x}$ podría requerir la solución de un problema de valor propio (eigenvalor), definido para el sistema completo de partículas rígidas conectadas dentro del modelo simulado. Así, la frecuencia máxima es estimada como la máxima de las frecuencias naturales (w_i) de los sistemas masa - resorte, definido para todas las partículas con un grado de libertad traslacional y rotacional.

$$w_{m\acute{a}x} = \text{Max} (w_i)$$

Y la frecuencia natural para cada sistema masa – resorte (representando el contacto entre partículas) esquematizado en la Figura 2-12, es definido como:

$$w_i = \sqrt{\frac{k}{m_i}}$$

Figura 2-12. Esquema de idealización masa-resorte para la representación dinámica del contacto entre partículas de elementos discretos.



Donde k corresponde a la rigidez del resorte y m_i a la masa de la partícula i . El caso idealizado y para efectos de su programación y evaluación, se refiere a un sistema de partículas, constituido por una masa mínima, interactuando elásticamente con una rigidez máxima, asociada a un valor de traslapo máximo tolerable. Dado lo anterior, es posible reescribir el escalón de tiempo crítico de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\Delta t_{cr} = \text{Min } 2 * \left(\sqrt{\frac{m_i}{k}} \right)$$

El escalón de tiempo efectivo empleado para la simulación, es considerado como una fracción del escalón de tiempo crítico, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\Delta t = \beta * \Delta t_{cr}$$

Con $0 \leq \beta \leq 1.0$. El valor de β ha sido estudiado por diferentes autores, para lo cual (Labra Gonzalez, 2012) refiere y recomienda valores cercanos de β alrededor a 0.17 para simulaciones en 3D, y de 0.3 para el caso de simulaciones en 2D. Sin embargo, para el

presente estudio y dados los resultados obtenidos durante las pruebas de integridad realizadas al *software* desarrollado, conservadoramente se consideró β de 0.20 como valor óptimo.

2.3.5 FUERZAS DE CONTACTO ENTRE PARTÍCULAS

Las fuerzas (de tensión o compresión) y los momentos actuantes sobre cada una de las partículas discretas que conforman el medio simulado, corresponden a las resultantes de la interacción con todos y cada uno de las partículas o elementos vecinos y con las condiciones de contorno aplicadas que rigen el modelo, en donde para cualquier i -ésimo elemento discreto, se tiene de forma vectorial que:

$$F_i = \sum_{c=1}^{N_c} F_i^c + F_i^{ext} + F_i^{damp}$$

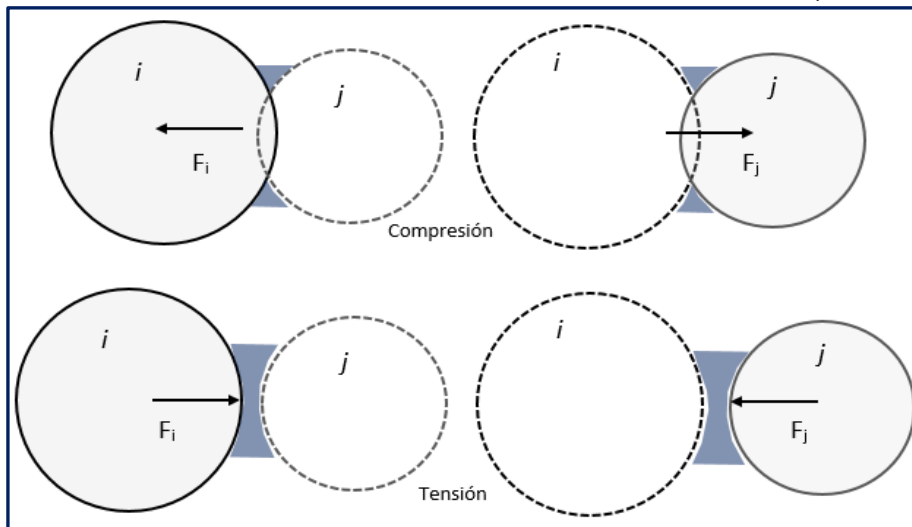
$$T_i = \sum_{c=1}^{N_c} (r_i^c \times F_i^c + q_i^c) + T_i^{ext} + T_i^{damp}$$

Donde F_i^{ext} y T_i^{ext} son fuerzas y momentos debido a las cargas externas, F_i^c corresponde a la fuerza de contacto para la interacción con los elementos vecinos y otros obstáculos, F_i^{damp} y T_i^{damp} son la fuerza y el momento resultantes debido al amortiguamiento del sistema, r_i^c es el vector que conecta el centro de las partículas del i -ésimo elemento con el punto de contacto c , N_c su número de partículas que están en contacto y q_i^c son los torques debido a la torsión no relacionada con las fuerzas tangenciales.

Una vez que se detecta el contacto entre un par de elementos discretos, el algoritmo deberá calcular las fuerzas asociadas en el punto de contacto respectivo. Así, la interacción entre dos cuerpos, partículas i y j tal como se ilustra en la Figura 2-13, puede ser representada por las fuerzas de contacto F_i y F_j , lo cual, en concordancia con la tercera ley de Newton, satisface la siguiente relación:

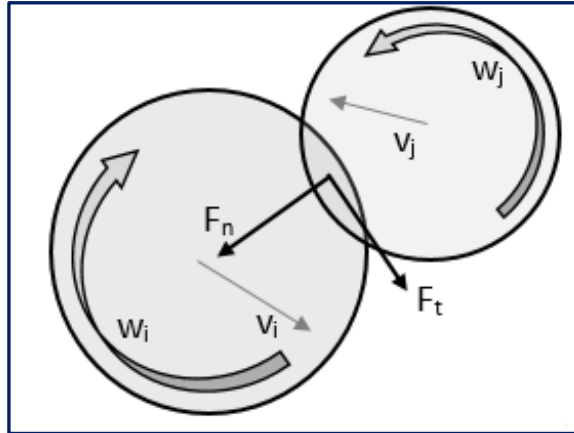
$$F_i = F_j$$

Figura 2-13. Fuerza de interacción en el contacto entre elementos discretos (método suave).



La fuerza $F_i = -F_j$, requerida para representar el contacto correspondiente entre los elementos discretos, se define como la fuerza F , la cual se descompone en sus componentes tanto normal (F_n) como tangencial (F_t), tal como se representa en la Figura 2-14.

Figura 2-14. Descomposición de la fuerza de contacto entre partículas, en componentes normal y tangencial.



Así, vectorialmente, la fuerza F se puede descomponer de acuerdo con lo presentado en la siguiente expresión:

$$F = F_n + F_t = f_n n + F_t$$

Donde n es el vector unitario normal a la superficie de la partícula en el punto de contacto (esto implica que su dirección va a lo largo de la línea que conecta los centros de las dos partículas en contacto) y dirigida hacia el centro de la partícula i en el caso de contacto de compresión, y dirigida hacia fuera de la partícula i en el caso de interacción a tracción entre las partículas.

$$n = \frac{x_j - x_i}{\|x_j - x_i\|}$$

Las fuerzas de contacto F_n y F_t son obtenidas usando un modelo reológico constitutivo formulado por el contacto entre los dos elementos. La suma de todas las fuerzas y momentos actuando sobre cada partícula o elemento discreto, representa la fuerza resultante de la partícula. En la aproximación suave del método de los elementos discretos, la cual es asumida para el desarrollo del presente estudio, las partículas de elementos discretos se consideran no deformables. En consecuencia, para la condición de compresión entre partículas, se genera traslapeo entre los elementos en el punto de contacto entre sí, empleándose una ley de contacto para estimar las fuerzas de interacción a partir del desplazamiento relativo entre ellas.

2.3.6 MODELACIÓN NUMÉRICA DE LA MEZCLA ASFÁLTICA

Para la simulación del comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica, en referencia a análisis numéricos en elementos discretos, se disgregará el material desde el punto de vista de escala mesoscópica, en componentes representativos que corresponde a agregados minerales (gravas y arenas), típicamente aplicando un comportamiento

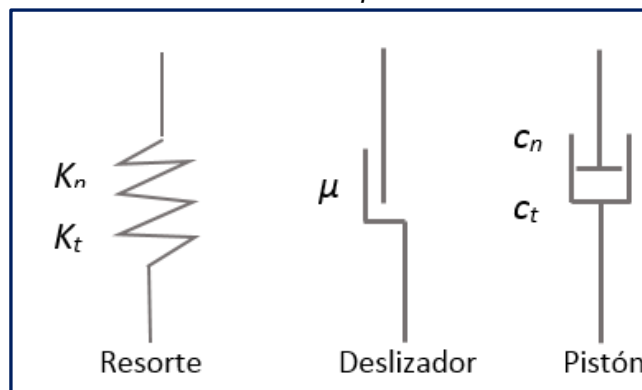
elástico, el mastic asfáltico (cemento asfáltico, arenas muy finas y llenante mineral) representado por un comportamiento viscoelástico, y los vacíos con aire. La anterior aproximación micro particular, es recomendada por diferentes autores como (Zhang *et al.*, 2018) y (Ding *et al.*, 2018), refiriendo buenos resultados en sus correspondientes investigaciones.

Es de tener en cuenta que la escala mesoscópica refiere a la escala de longitud comprendida del orden de 10^{-4} m o algunos cientos de micrómetros, en la que las dislocaciones, las discontinuidades, los límites de grano y otros elementos micro estructurales de un cuerpo, ya afectan su desempeño mecánico, despreciando el comportamiento de los átomos constitutivos del material y las interacciones entre ellos (Rieth & Schommers, 2005).

En correspondencia de lo anterior, para los análisis de elementos discretos, los modelos constitutivos requeridos para el cálculo de las fuerzas de contacto, especialmente a compresión, se pueden caracterizar por la combinación de diferentes modelos físicos, tal como resortes, pistones, elementos fricción y deslizadores, conectados indistintamente entre sí, según la formulación requerida y la respuesta pretendida del material específico a simular.

De forma genérica, la interface de contacto bajo sollicitación a compresión entre los elementos discretos considerada para el desarrollo del presente estudio, se definirá entonces por la combinación de las rigideces tanto normal como tangencial, k_n y k_t , respectivamente para los elementos resorte, el coeficiente de fricción de Coulomb μ para el elementos tipo deslizador, y por los correspondientes coeficientes de amortiguamiento de contacto c_n y c_t para el elemento muelle o elemento pistón, tal como se relaciona en la Figura 2-15.

Figura 2-15. Modelos Reológicos Genéricos considerados para el modelamiento mecánico del contacto entre partículas.



2.3.7 MODELOS MECÁNICOS PARA CONTACTO NORMAL Y TANGENCIAL

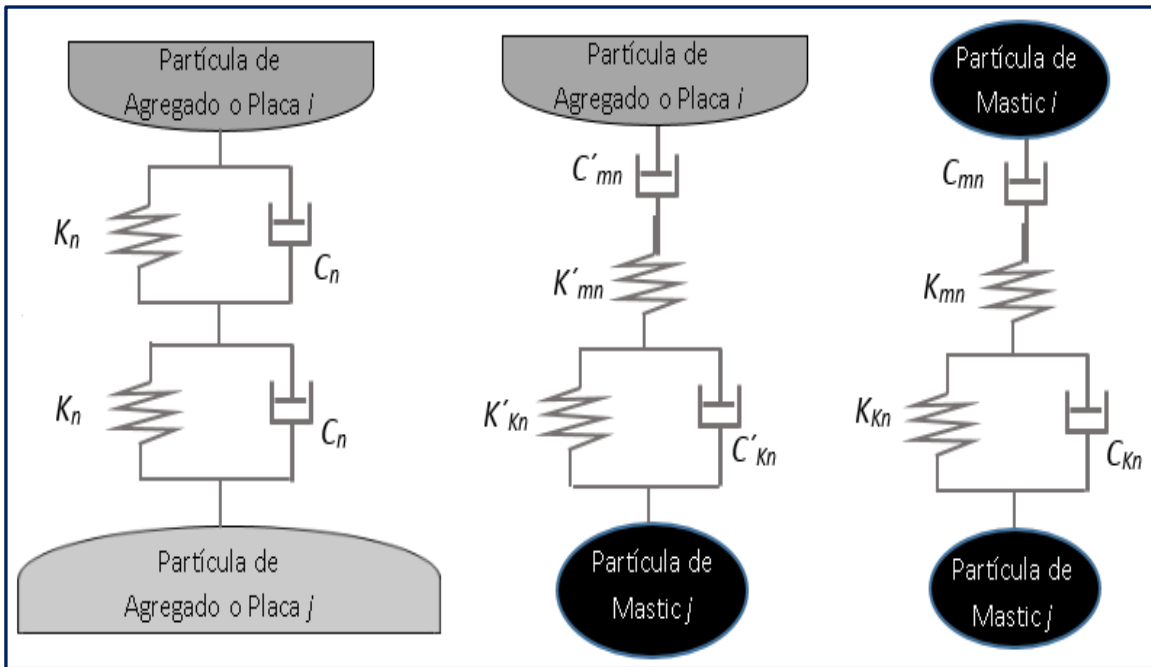
El comportamiento de los contactos entre partículas, tanto en dirección normal como en dirección transversal, dependerá de la tipología de las partículas que se superponen, de acuerdo al fraccionamiento computacional constitutivo asumido para el material de mezcla asfáltica. Así, si el contacto a compresión se genera entre dos partículas de agregado mineral (gravas o arenas gruesas que representan la fase discontinua de las mezclas asfálticas) o elementos que representan la placa de carga, tanto el contacto

normal como tangencial será considerado elástico no lineal con amortiguamiento para disipación de energía, siendo representado mecánicamente por un modelo de Maxwell, referente a un resorte y un pistón en paralelo (Labra Gonzalez, 2012).

Sin embargo, si el contacto a compresión entre dos partículas involucra elementos discretos de mastic asfáltico (considerado como la fase continua de las mezclas asfálticas), el contacto normal y tangencial a compresión será considerado mecánicamente de modo viscoelástico, representándose en tanto por un modelo mecánico combinado (modelo de Burgers), tal como recomiendan autores como (Ding *et al.*, 2018) y (Zhang *et al.*, 2018).

La Figura 2-16 muestra la representación mesomecánica considerada para las posibles configuraciones de contactos normales a compresión entre las diversas tipologías de partículas de elementos discretos en la que será discretizada la mezcla asfáltica en el presente trabajo.

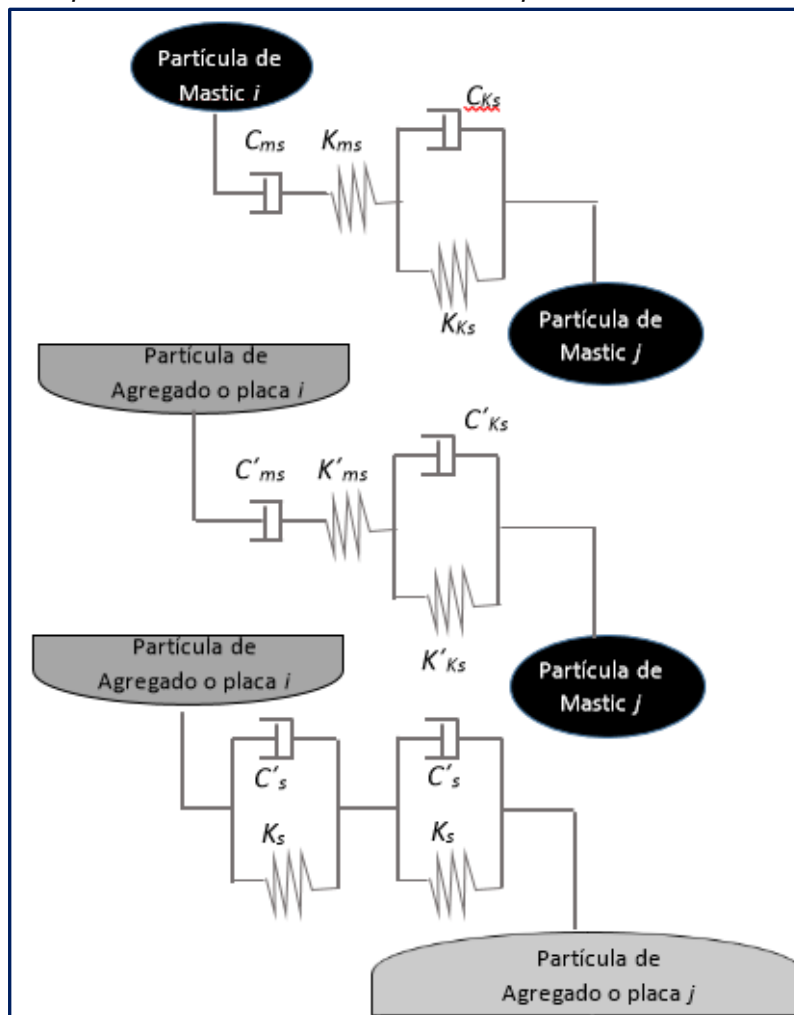
Figura 2-16. Modelos mesomecánicos para la representación de los contactos normales a compresión entre las partículas de elementos discretos representativos del material de mezcla asfáltica.



Referencia: adaptada de (Ding *et al.*, 2018, p. 208)

El modelo combinado o modelo de Burgers, que representa el comportamiento viscoelástico de un material, se modela por medio de la conexión en serie de un elemento resorte y un elemento pistón en paralelo (modelo de Maxwell), aunado a un elemento resorte y un elemento pistón en serie (modelo de Kelvin Voigt). En complemento, la Figura 2-17 muestra la representación mesomecánica considerada para los contactos tangenciales entre las diversas tipologías de partículas de los elementos discretos en que será discretizada la mezcla asfáltica.

Figura 2-17. Modelos mesomecánicos para la representación de contactos tangenciales a compresión entre partículas de elementos discretos representativos de la mezcla asfáltica.



Referencia: adaptada de (Ding *et al.*, 2018, p. 208)

2.3.8 SOLUCIÓN DE LA ECUACIÓN DIFERENCIAL DEL MODELO MECÁNICO DE BURGERS

Autores como (Lee, 2006), (Dondi *et al.*, 2014) y (Nian *et al.*, 2021) entre otros, refieren que el modelo mecánico de Burgers, representa adecuadamente el comportamiento físico dependiente del tiempo para materiales asfálticos bajo estados tensionales y climáticos típicos de servicio en estructuras de pavimento. Para obtener la fuerza de contacto entre dos partículas de elementos discretos considerando dicho modelo mecánico de Burgers, ya sea la fuerza de contacto de tipo normal o la fuerza de contacto de tipo transversal, se debe solucionar la ecuación diferencial que rige mecánicamente dicho modelo físico. Para la solución numérica de tal ecuación diferencial, se parte de la premisa de adición de desplazamientos o de deformaciones y su respectiva derivada para el modelo de Burgers, tal como se relaciona en la siguiente expresión:

$$u = u_{M-e} + u_{M-v} + u_K$$

Por tanto, la derivada respecto al tiempo del desplazamiento corresponde a lo descrito en la siguiente ecuación diferencial:

$$\frac{du}{dt} = \frac{du_{M-e}}{dt} + \frac{u_{M-v}}{dt} + \frac{du_K}{dt}$$

Donde:

u : deformación total del modelo Burgers

u_{M-e} : deformación del elemento resorte del modelo Maxwell.

u_{M-v} : deformación del elemento pistón del modelo Maxwell.

u_K : deformación total del modelo Kelvin-Voigt.

Teniendo en cuenta la condición de aditividad de tensiones entre los elementos del modelo Kelvin-Voigt como componente del modelo de Burgers, se tiene que la fuerza de contacto f , se puede obtener a partir de la siguiente ecuación:

$$f = K_k u_k + C_k \frac{du_k}{dt}$$

Donde:

K_k : rigidez del resorte del elemento Kelvin-Voigt.

C_k : viscosidad del pistón del elemento Kelvin-Voigt.

Por otra parte, considerando la igualdad de tensiones entre los elementos del modelo Maxwell como componente del modelo mecánico de Burgers, se tiene que la fuerza de contacto corresponde a lo referido en las siguientes expresiones:

$$f = K_m u_{m-e}$$

$$f = C_m \frac{du_{m-v}}{dt}$$

En concordancia, la derivada respecto al tiempo de la fuerza de contacto deducida a partir del resorte del modelo de Maxwell, corresponde a lo referido en la siguiente ecuación diferencial:

$$\frac{df}{dt} = K_m \frac{du_{m-e}}{dt}$$

Donde:

K_m : rigidez del resorte del modelo de Maxwell.

C_m : viscosidad del pistón del modelo de Maxwell.

Despejando la variación de la deformación en el tiempo del elemento Kelvin-Voigt de la expresión anterior referida a la fuerza de contacto a partir de dicho componente del modelo de Burgers, se tiene que:



$$\frac{du_k}{dt} = \frac{f - K_k u_k}{C_k}$$

Resolviendo la anterior ecuación diferencial ordinaria por aproximación numérica de diferencias finitas centradas para valores promedio de u_k y f asociados al componente del modelo de Kelvin, se obtiene que:

$$\frac{u_k^{t+1} - u_k^t}{\Delta t} = \frac{1}{C_k} \left(\frac{f^{t+1} + f^t}{2} - \frac{K_k(u_k^{t+1} + u_k^t)}{2} \right)$$

Luego, despejando la deformación total del modelo Kelvin-Voigt para el intervalo o escalón de tiempo siguiente u_k^{t+1} , se obtiene:

$$u_k^{t+1} = \frac{1}{A} \left[B u_k^t + \frac{\Delta t}{2C_k} (f^{t+1} + f^t) \right]$$

Donde:

$$A = 1 + \frac{K_k \Delta t}{2C_k}$$

$$B = 1 - \frac{K_k \Delta t}{2C_k}$$

Por otro lado, el desplazamiento y la velocidad para el modelo de Maxwell constitutivo del modelo Burgers del contacto, corresponden a las siguientes ecuaciones:

$$u_M = u_{M-e} + u_{M-v}$$

$$\frac{du_M}{dt} = \frac{du_{M-e}}{dt} + \frac{du_{M-v}}{dt}$$

Donde:

u_M : deformación total del modelo Maxwell.

u_{M-e} : deformación del elemento resorte del modelo Maxwell.

u_{M-v} : deformación del elemento pistón del modelo Maxwell.

Considerando que la fuerza de contacto y la derivada de la misma en función del pistón y resorte del modelo Maxwell respectivamente corresponden a:

$$f = C_m \frac{du_{m-v}}{dt}$$

$$\frac{df}{dt} = K_m \frac{du_{m-e}}{dt}$$

La velocidad del desplazamiento total del modelo Maxwell, se cuantifica a partir de la siguiente ecuación diferencial:



$$\frac{du_m}{dt} = \frac{df/dt}{K_m} + \frac{f}{C_m}$$

Solucionando la ecuación diferencial ordinaria anterior por aproximación numérica de diferencias finitas centradas para valores promedio de la fuerza de contacto f asociada al componente del modelo Maxwell, se obtiene:

$$\frac{u_m^{t+1} - u_m^t}{\Delta t} = \frac{f^{t+1} - f^t}{\Delta t K_m} + \frac{f^{t+1} + f^t}{2C_m}$$

Por lo tanto, el desplazamiento del componente asociado al modelo Maxwell para el escalón de tiempo siguiente será:

$$u_m^{t+1} = \frac{f^{t+1} - f^t}{K_m} + \frac{\Delta t(f^{t+1} + f^t)}{2C_m} + u_m^t$$

El desplazamiento total (u) y la velocidad respectiva del modelo de contacto Burgers, es dado por las siguientes expresiones:

$$u = u_k + u_m$$

$$\frac{du}{dt} = \frac{du_k}{dt} + \frac{du_m}{dt}$$

Usando el esquema de diferencias finitas para la derivación en el tiempo para el desplazamiento total del modelo de contacto Burgers, se obtiene:

$$u^{t+1} - u^t = u_k^{t+1} - u_k^t + u_m^{t+1} - u_m^t$$

Sustituyendo las ecuaciones de desplazamiento para el escalón de tiempo siguiente, tanto de los componentes de los modelos de Maxwell y de Kelvin-Voigt deducidos anteriormente, dentro de la ecuación de desplazamiento total incremental del modelo de contacto Burgers referida anteriormente, y despejando la fuerza de contacto para el escalón de tiempo siguiente, se obtiene finalmente:

$$f^{t+1} = \frac{1}{C} \left[u^{t+1} - u^t + \left(1 - \frac{B}{A} \right) u_k^t - Df^t \right]$$

Donde:

$$C = \frac{\Delta t}{2AC_k} + \frac{1}{K_m} + \frac{\Delta t}{2C_m}$$

$$D = \frac{\Delta t}{2AC_k} - \frac{1}{K_m} + \frac{\Delta t}{2C_m}$$

2.3.9 RELACIÓN ENTRE PARÁMETROS CONSTITUTIVOS DE LOS MATERIALES PARA CONTACTOS ENTRE AGREGADOS Y ELEMENTOS DE CARGA (CONTACTOS ELÁSTICOS NO LINEALES AMORTIGUADOS)

Tal como se refirió previamente, el contacto entre las mismas partículas de agregados y entre agregados y los elementos discretos que representan los dispositivos de acero



empleados para la transmisión de las cargas y de apoyo del espécimen, serán considerados de manera elástica no lineal con amortiguamiento, representado su comportamiento mecánico por medio de un elemento resorte y un pistón en paralelo para cada partícula de material respectivo, tal como se muestra en la Figura 2-16 y Figura 2-17. El modelo de contacto de Hertz – Mindlin, recomendado en (International Center for Numerical Method, 2012), es el modelo no lineal con amortiguamiento clásico más usado en colisión de partículas. A partir de la teoría de Hertz para una esfera elástica i , la rigidez normal puede ser escrita como:

$$K_n = \left(\frac{2 * \bar{G} * \sqrt{2 * r'}}{3 * (1 - \bar{\mu})} \right) * \sqrt{\delta}$$

Donde r' es el radio de contacto, el cual se obtiene de acuerdo a la siguiente expresión:

$$r' = \frac{2 * r_i * r_j}{r_i + r_j}$$

Los parámetros mecánicos del contacto, \bar{G} y $\bar{\mu}$, corresponden a la semisuma de los parámetros mecánicos de los elementos que conforman el contacto, y se obtienen de acuerdo a las siguientes expresiones matemáticas:

$$\bar{G} = \frac{G_i + G_j}{2}$$

$$\bar{\mu} = \frac{\mu_i + \mu_j}{2}$$

Así, para caracterizar cada contacto, es necesario conocer de cada elemento discreto su Módulo de Cortante G_i , su relación de Poisson μ_i , su radio geométrico r_i , y el traslapeo entre las esferas en contacto, δ .

La fuerza de contacto normal f_n , es descompuesta en una parte elástica f_{ne} y la fuerza de contacto de amortiguamiento f_{nd} , tal como se expresa en la siguiente ecuación:

$$f_n = f_{ne} + f_{nd}$$

La fuerza normal elástica del contacto (f_{ne}), pueden ser calculada a partir de las siguientes expresiones:

$$f_{ne} = K_n \delta_n$$

La fuerza de amortiguamiento para el contacto f_{nd} (vectorialmente en sentido opuesto a la fuerza normal elástica), se calcula a partir de la determinación del coeficiente de amortiguamiento c_n (que caracteriza el pistón del modelo mecánico) y la velocidad relativa normal entre las partículas en contacto V_{rn} , de acuerdo a las siguientes expresiones:

$$f_{nd} = c_n * V_{rn}$$

$$c_n = 2 * \alpha * \sqrt{m_n * K_n}$$



Dónde: α corresponde a la fracción del amortiguamiento crítico asumido para el cálculo del Coeficiente de Amortiguamiento del Contacto (c_n), recomendado 0.9 por diversos investigadores y m_n corresponde a la masa reducida del contacto, la cual se calcula de acuerdo a la siguiente expresión matemática:

$$m_n = \frac{m_i * m_j}{m_i + m_j}$$

En consecuencia, y de la misma manera que para la condición transversal, la fuerza de contacto normal es calculada como la suma algebraica de la fuerza elástica normal más la fuerza de amortiguamiento normal.

La fuerza de contacto transversal f_t , al igual que la fuerza normal, que aplica para los contactos no adheridos y para aquellos que han perdido la adherencia, es descompuesta en una parte elástica f_{te} y la fuerza de contacto de amortiguamiento f_{td} , tal como se expresa en la siguiente ecuación:

$$f_t = f_{te} + f_{td}$$

La parte elástica de la fuerza de contacto tangencial f_{te} es proporcional a la rigidez tangencial k_t y al traslape tangencial en la superficie de contacto de las partículas δ_{rt} , por lo tanto:

$$f_{te} = k_t * \delta_{rt}$$

(Labra Gonzalez, 2012) refiere que investigadores como Mindlin y Deresiewicz ampliaron la teoría para la dirección tangencial del contacto, proponiendo la siguiente expresión matemática para la determinación de la rigidez del contacto:

$$k_t = \left(\frac{2 * (\bar{G}^2 * 3(1 - \bar{\mu}) * r')^{\frac{1}{3}}}{2 - \bar{\mu}} \right) * |f_{ne}|^{\frac{1}{3}}$$

La fuerza de amortiguamiento de contacto tangencial se supone ser mecánicamente de tipo viscosa y está dada por la siguiente expresión matemática:

$$f_{td} = c_t * V_{rt}$$

Igual que para el comportamiento normal, el coeficiente de amortiguamiento tangencial c_t puede ser asumido como una fracción α del amortiguamiento crítico C_{cr} para el sistema de dos cuerpos rígidos con masas m_i y m_j (asumido 0.9), conectado con un resorte de rigidez k_t , de acuerdo con la siguiente formulación:

$$c_t = 2 * \alpha * \sqrt{m_n * K_t}$$

La fuerza de reacción tangencial, f_i , se genera por la fricción entre partículas, oponiéndose al movimiento relativo en el punto de contacto. La velocidad relativa tangencial en el punto de contacto entre dos partículas, v_{rt} , es obtenida empleando la siguiente ecuación:

$$v_{rt} = v_r - (v_r * n)n$$

Para lo cual:

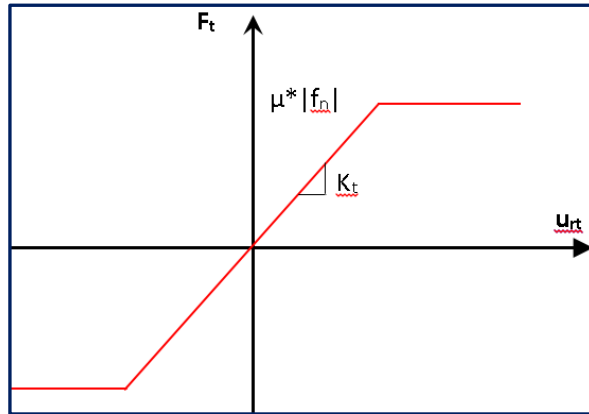


$$v_r = (\dot{u}_j + w_j * r_{cj}) - (\dot{u}_i + w_i * r_{ci})$$

Donde \dot{u}_i , \dot{u}_j , w_i , w_j son las velocidades traslacionales y rotacionales de las partículas, r_{ci} y r_{cj} , son los vectores que conectan los centros de las partículas con el respectivo punto de contacto.

La correspondencia entre la fuerza de fricción f_t y el desplazamiento relativo tangencial u_{rt} para el modelo clásico de Coulomb (asociado a una fuerza normal f_n), es relacionado de acuerdo a lo expresado en la Figura 2-18.

Figura 2-18. Ley de Coulomb Generalizada.



La ley de Coulomb produciría oscilaciones no-físicas de la fuerza de fricción debido a posibles cambios en la dirección de la velocidad de deslizamiento, por lo cual, se debe hacer un proceso de regularización que implica la descomposición de la velocidad relativa tangencial en sus componentes reversible v_{rt}^r e irreversible v_{rt}^{ir} , de acuerdo a lo expresado en la siguiente ecuación:

$$v_{rt} = v_{rt}^r + v_{rt}^{ir}$$

Lo anterior es equivalente a formular el contacto friccional como un problema análogo a elasto-plasticidad, el cual puede ser visto claramente desde la relación fuerza - desplazamiento tangencial de la figura. Consecuentemente, el componente elástico de la fuerza tangencial es calculado de forma incremental, mediante la referida analogía de elasto-plasticidad que permite cuantificar la fuerza de fricción empleando un algoritmo de retorno radial estandarizado, siguiendo los pasos formulados a continuación:

- 1- Calcular un estado de prueba.

$$F_t^{trial} = F_t^{n-1} + k_t * v_{rt} * \Delta t$$

- 2- Chequear condición de deslizamiento.

$$\varphi^{trial} = \|F_t^{trial}\| - u * f_n$$

- 3- Si $\varphi^{trial} \leq 0$, se tiene un contacto atascado y la fuerza de fricción corresponde al valor de prueba.

$$F_t^n = F_t^{trial}$$



- 4- Si ocurre lo contrario, se genera un contacto tipo deslizante, para lo cual se realiza un mapeo de retorno dando:

$$F_t^n = u * f_n * \frac{F_t^{trial}}{\|F_t^{trial}\|}$$

Donde u corresponde al coeficiente de fricción cinemático asociado a los materiales entre las partículas en contacto.

2.3.10 RELACIÓN ENTRE PARÁMETROS CONSTITUTIVOS DE LOS MATERIALES PARA CONTACTO ENTRE PARTÍCULAS DE MASTIC ASFÁLTICO (CONTACTO VISCOELÁSTICO).

El contacto entre partículas de elementos discretos que caracterizaran el mastic asfáltico constitutivo de la mezcla asfáltica del espécimen discretizado, será considerado de manera viscoelástico por medio de la representación de un modelo mecánico de Burgers, como se muestra en las Figura 2-16 y Figura 2-17. En tal sentido, las relaciones entre los parámetros de rigidez mesomecánicos y macromecánicos para este tipo de materiales constitutivos, tanto en dirección normal como transversal al contacto, son las expuestas a continuación.

$$\begin{aligned} K_{mn} &= 2E_1R & K_{ms} &= \frac{E_1}{(1 + \mu')}R \\ C_{mn} &= 2n_1R & C_{ms} &= \frac{n_1}{(1 + \mu')}R \\ K_{Kn} &= 2E_2R & K_{Ks} &= \frac{E_2}{(1 + \mu')}R \\ C_{Kn} &= 2n_2R & C_{Ks} &= \frac{n_2}{(1 + \mu')}R \end{aligned}$$

Donde:

E_1 , E_2 , n_1 y n_2 : parámetros a nivel macromecánico de modelo de Burgers para el mastic asfáltico.

μ' : relación de Poisson para el mastic asfáltico.

K_{mn} , C_{mn} , K_{Kn} , C_{Kn} : parámetros a nivel mesomecánico del modelo de Burgers del contacto para el mastic asfáltico en la dirección normal.

K_{ms} , C_{ms} , K_{Ks} , C_{Ks} : parámetros a nivel mesomecánico del modelo de Burgers del contacto para el mastic asfáltico en la dirección transversal.

2.3.11 RELACIÓN ENTRE PARÁMETROS CONSTITUTIVOS DE LOS MATERIALES PARA CONTACTO ENTRE PARTÍCULAS DE AGREGADO Y PLACAS DE CARGA CON MASTIC ASFÁLTICO (CONTACTO SEMI VISCOELÁSTICO).

El contacto entre partículas de elementos discretos que caracterizaran tanto el agregado como el mastic asfáltico constitutivos de la mezcla asfáltica del espécimen discretizado, será representada de forma viscoelástica por medio de un modelo mecánico de Burgers,



como se muestra en las Figura 2-16 y Figura 2-17. En tal sentido, las relaciones entre los parámetros de rigidez mesomecánicos y macromecánicos para este tipo de materiales constitutivos, tanto en la dirección normal como en la dirección transversal al contacto, son las presentadas a continuación

$$K'_{mn} = \frac{4E_1E_2}{E_1 + E_2}R$$

$$C'_{mn} = 4n_1R$$

$$K'_{kn} = 4E_2R$$

$$C'_{kn} = 4n_2R$$

$$K'_{ms} = \frac{4E_1E_2}{(1 + \mu')E + 2(1 + \mu)E_1}R$$

$$C'_{ms} = \frac{2n_1}{(1 + \mu')}R$$

$$K'_{ks} = \frac{2E_2}{(1 + \mu')}R$$

$$C'_{ks} = \frac{2n_2}{(1 + \mu')}R$$

Donde:

K'_{mn} , C'_{mn} , K'_{kn} , C'_{kn} : parámetros mecánicos del modelo de Burger para el contacto entre agregados o placa de carga y el mastic asfáltico en la dirección normal.

K'_{ms} , C'_{ms} , K'_{ks} , C'_{ks} : parámetros mecánicos del modelo de Burger para el contacto entre agregados o placa de carga y el mastic asfáltico en la dirección transversal.

E_1 , E_2 , n_1 y n_2 : parámetros a nivel macromecánico del modelo de Burger para el mastic asfáltico.

μ' : relación de Poisson para el mastic asfáltico.

E : módulo elástico de los agregados o placa de carga.

μ : relación de Poisson de los agregados o de la placa de carga.

2.3.12 MODELO CONSTITUTIVO PARA LA SIMULACIÓN DEL AGRIETAMIENTO DEL MATERIAL

Tal como se especificó anteriormente, los materiales constitutivos considerados para la modelación en elementos discretos de la mezcla asfáltica y de la placa de carga del ensayo, son los relacionados a continuación:

- Partículas de agregados.
- Partículas de mastic asfáltico (consistente de mezcla de agregados muy finos con áridos de tamaño filler y cemento asfáltico).
- Partículas de acero que representan el dispositivo de transmisión de carga empleado en el desarrollo de la prueba.
- Vacíos con aire.

Consecuente con lo anterior, para los materiales cuyos contactos entre partículas presentan adherencia mecánica y por lo tanto tienen la capacidad de soportar y transmitir las fuerzas de tracción, es decir en el caso particular del presente estudio, el contacto entre las partículas de agregados y de mastic asfáltico o el contacto entre las mismas

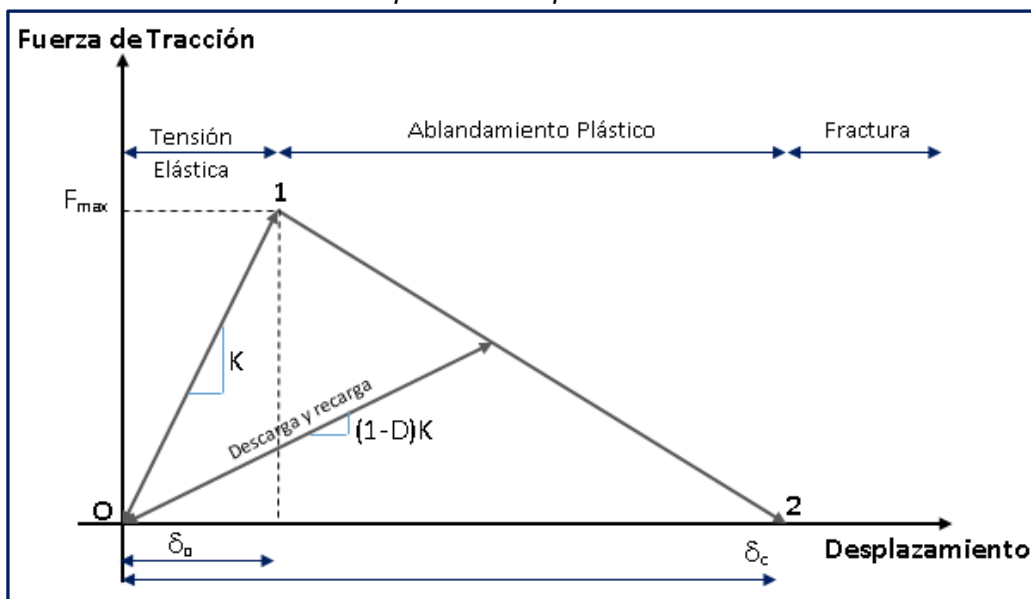


partículas de mastic y entre agregados, se representarán por medio del Modelo de Fractura Cohesivo Bilineal.

Bajo el marco anterior, para la simulación del fenómeno físico asociado al agrietamiento del material asfáltico dentro de los análisis por medio del método numérico de los elementos discretos considerado dentro del presente trabajo, se aplicará dicho modelo, referido por autores como (Xue *et al.*, 2020).

Este patrón de respuesta tenso-deformacional tiene la ventaja y característica favorable desde el punto de vista lógico y computacional, de modelar el inicio y la propagación del agrietamiento del material adherido de forma gradual e incremental, evaluando la fuerza de cohesión que se genera entre las partículas aglutinadas a medida que dichos elementos discretos se separan uno del otro. La fuerza de cohesión respectiva, se define por medio de una relación entre la fuerza a tracción con el desplazamiento correspondiente. La Figura 2-19 representa gráfica y conceptualmente la curva de Tensión - Desplazamiento para el modelo de comportamiento mecánico de Fractura Cohesivo Bilineal.

Figura 2-19. Curva de Tensión - Desplazamiento para el Modelo de Fractura Cohesivo Bilineal.



Referencia: adaptada de (P. Liu *et al.*, 2019, p. 3)

Dentro del comportamiento mecánico del modelo en representación, a medida que las partículas de elementos discretos adheridas se separan, la fuerza de tracción entre estas partículas se incrementa hasta alcanzar un valor máximo (representado por la trayectoria tenso-deformacional 0-1 de la Figura 2-19). El punto 1, asociado a $F_{máx}$, es el punto donde la cohesión del contacto entre elementos discretos comienza a fallar, para posteriormente iniciar el proceso de evolución del daño reduciendo la rigidez del contacto, disminuyendo la magnitud de la fuerza a tracción gradualmente a cero (según trayectoria 1-2), implicando en dicho caso la separación completa entre los elementos discretos antes adheridos, y por tanto, generándose un punto de fractura dentro de la discretización del material.

Como puede ser visto gráficamente para este modelo mecánico en particular, tanto la relación fuerza – desplazamiento del contacto entre las partículas en la zona de tensión elástica como en el rango de ablandamiento plástico, presentan una relación lineal, lo que define su nombre como Bilineal.

Se considera un parámetro de degradación de rigidez o ablandamiento D , el cual varía entre 0 y 1. Dicho parámetro se relaciona con el estado tensional del contacto, de acuerdo a la siguiente expresión.

$$D = \frac{\delta_c * (\delta_{m\acute{a}x} - \delta_o)}{\delta_{m\acute{a}x} * (\delta_c - \delta_o)}$$

Donde:

D : parámetro de degradación de rigidez.

δ_o : desplazamiento máximo asociado a la resistencia máxima del contacto.

$\delta_{m\acute{a}x}$: desplazamiento máximo soportado por el contacto durante el periodo de análisis.

δ_c : desplazamiento plástico asociado a la separación completa del contacto o desplazamiento crítico.

El área representada bajo la curva de fuerza de tracción versus desplazamiento de las partículas, corresponde a la cantidad de energía de fractura necesaria para completar el proceso de separación completa de las partículas y por tanto, de pérdida total de adherencia entre los elementos discretos. En la Figura 2-19, $F_{m\acute{a}x}$ corresponde a la resistencia máxima a cohesión del contacto en sentido normal o transversal, mientras que la pendiente inicial simbolizada con la letra K , refiere al módulo elástico del contacto respectivo.

Bajo el contexto anterior y para las fuerzas de tensión entre las partículas hasta alcanzar la separación crítica en donde ya se pierde toda la adherencia entre ellas, las fuerzas de contacto vendrán determinadas de acuerdo con lo expresado en las siguientes ecuaciones constitutivas.

Si $F \leq F_{m\acute{a}x}$:

$$F^n = K^n * \delta^n$$

$$F^t = K^t * \delta^t$$

Si $F > F_{m\acute{a}x}$:

$$F^n = (1 - D) * K^n * \delta^n$$

$$F^t = (1 - D) * K^t * \delta^t$$

Donde:

- K^n, K^t es la rigidez normal y transversal a tensión del contacto respectivamente.
- δ^n y δ^t son los desplazamientos actuantes del contacto en la dirección normal y cortante respectivamente.



- $F_{máx}^n$ y $F_{máx}^t$ expresan la resistencia a la tensión en sentido normal y cortante, para el contacto adherido entre partículas.

Si la fuerza de contacto normal o transversal entre las partículas supera el valor de la resistencia de contacto, el contacto se ablanda y por consiguiente las fuerzas normal y de cortante se reducen linealmente a cero.

En general, el modelo de fractura cohesivo bilineal considerado, incluye tres parámetros característicos de los materiales, a saber:

- Resistencia a la tensión / cohesión ($F_{máx}$)
- Desplazamiento crítico (δ_c).
- Energía de fractura cohesiva (Gf).

Entre estos 3 parámetros, solo 2 son independientes dado que la energía de fractura cohesiva puede ser calculada por la integral definida según la expresión matemática presentada a continuación:

$$Gf = \int_0^{\delta_c} F(\delta) d\delta$$

Donde, $F(\delta)$ corresponde a la función de resistencia a la tracción y $d\delta$ es un diferencial de desplazamiento. Dado que el desplazamiento de separación es difícil de ser medido en laboratorio, la energía de fractura (Gf) y la resistencia cohesiva ($F_{máx}$), son los parámetros empleados como datos de entrada para el modelo de fractura cohesiva.

2.3.13 DISCRETIZACIÓN DEL MODELO

El modelamiento con Elementos Discretos de cualquier problema físico, inicia con la preparación del modelo geométrico del propio sistema analizado. Lo anterior implica que la posición inicial y la forma de cada uno de los elementos discretos, deben ser concretamente definidas y especificadas. Así, una de las etapas más relevantes en la simulación con el DEM corresponde a la discretización del medio, toda vez que este proceso tiene una fuerte influencia en todos los resultados obtenidos (Labra Gonzalez, 2012).

Para modelar materiales granulares sin cohesión, una partícula del DEM representa una partícula de material, permitiendo la aplicación correspondiente de sus propiedades mecánicas. En el caso de simulación de materiales sólidos (con contactos adheridos como el caso de especímenes de rocas, concreto hidráulico o de mezclas asfálticas), las partículas del DEM no tiene sentido físico, y esta solo corresponde a la discretización del medio, siendo en este caso una idealización estructurada del medio simulado. Idealmente, el paquete de partículas empleado en la simulación, debería permitir la representación de las propiedades mecánicas en el material, tal como la isotropía o la relación de Poisson.

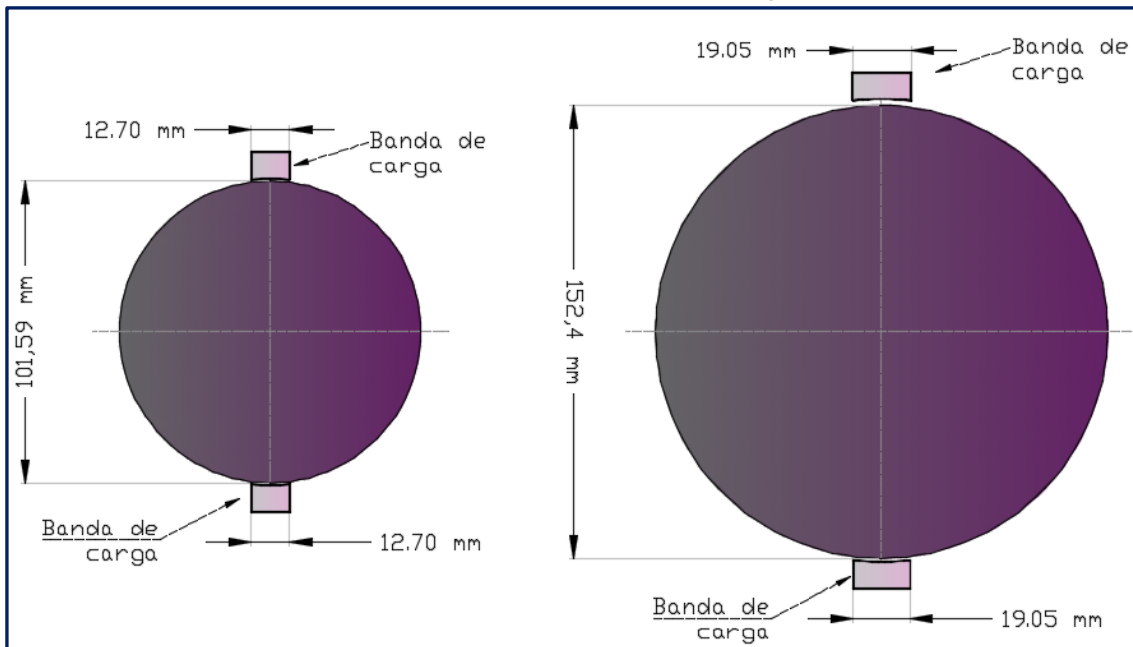
El método de discretización propuesto para el presente trabajo de grado, típicamente involucra la construcción estructurada de un empaquetado de partículas para un modelo geométrico en 2D de una muestra de una briqueta circular de material asfáltico de espesor unitario, la cual asocia sus dimensiones determinadas en el cumplimiento de los requerimientos geométricos estipulados en el artículo INV E-786 de las Normas de



Ensayos de Materiales para Carreteras del Instituto Nacional de Vías (Mintransporte & Invías, 2013).

Así, la briqueta circular y el dispositivo de carga considerado para la representación analítica en 2D del ensayo de tracción indirecta, involucrará un espécimen de diámetro de 101.59 mm o de 152.4 mm, mientras que, para las bandas de carga, se considerará un ancho promedio de 12.70 mm +/- 0.3 mm o 19.05 mm +/- 0.3 mm respectivamente, tal como se representa esquemáticamente en la Figura 2-20.

Figura 2-20. Condiciones geométricas definidas para el modelo analítico 2D del espécimen de mezcla asfáltica y la banda de carga.

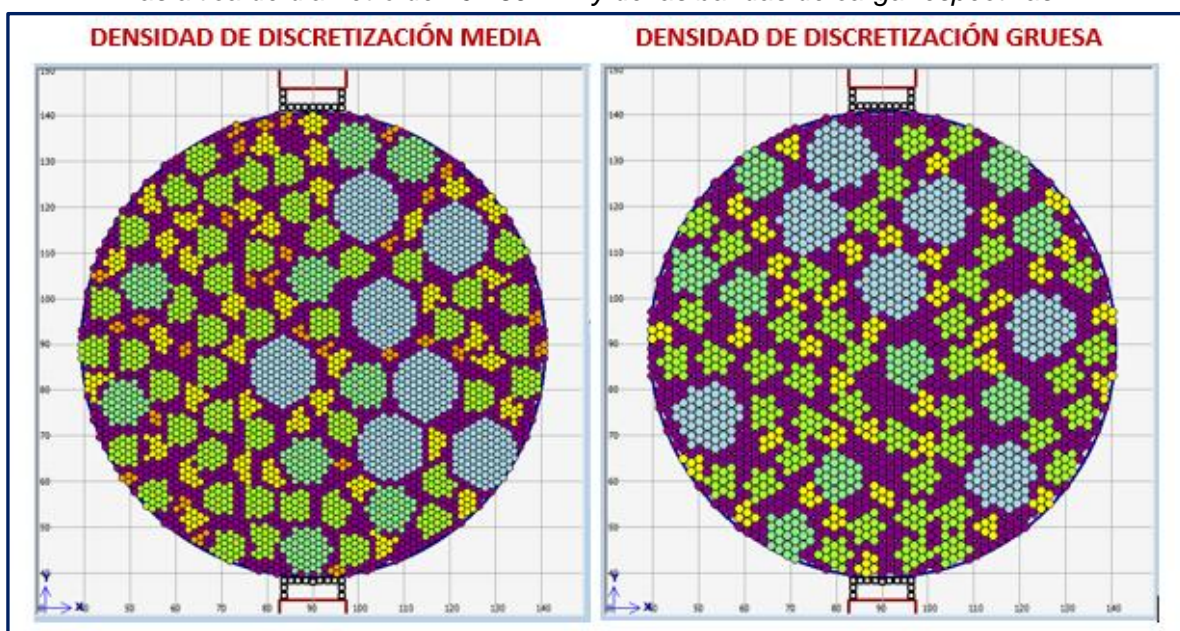


La discretización del modelo considerado para el presente trabajo de grado (tanto del espécimen de la mezcla asfáltica como la banda de aplicación de la carga) estará en función de una distribución volumétrica asociada a un tamaño mínimo de partículas de elementos discretos de forma de discos en análisis 2D, y una máxima densidad del material representado. Lo anterior buscando obtener un bajo costo computacional en el proceso y logrando simulaciones relativamente factibles de ejecución en un computador portátil o de escritorio de características técnicas normales a altas, y una importante confiabilidad en los resultados a obtener.

Para modelar un cuerpo o medio geométrico en referencia al análisis numérico de fenómenos físicos por medio del empleo del método de los elementos discretos, el proceso de discretización de dicho medio puede ser desarrollado por medio de una distribución de densificación estructurada de partículas (donde las partículas presentan dimensiones iguales tratando de definir el menor tamaño posible en función del recurso computacional disponible para los análisis, en referencia a tiempos de simulación y capacidad de memoria de almacenamiento), o a partir de una discretización que siga una distribución predefinida de tamaños de partículas deseada para la simulación en particular.

Para este estudio en particular, y bajo el marco de discretización estructurada del medio en analizado (especimen de mezcla asfáltica según características geométricas estipuladas en la norma de ensayo INV E786-13), se plantearon dos escenarios de discretización del espécimen del material, denominadas como discretización de densidad media y de densidad gruesa, en función del tamaño y número de los elementos discretos constitutivos del modelo analítico, tal como se muestra en la Figura 2-21. La discretización denominada como media, involucrará la subdivisión del espécimen en elementos discretos de 1.50 mm de diámetro, mientras que la discretización referida como gruesa, corresponderá con elementos discretos constitutivos de 2.00 mm de diámetro. El número de elementos discretos para cada densidad de discretización, estará en función del tamaño del espécimen definido para la ejecución de la simulación.

Figura 2-21. Propuestas de nivel de detalle de discretización para los especímenes de mezcla asfáltica de diámetro de 101.59 mm y de las bandas de carga respectivas.



En consecuencia, la Tabla 2-1 presenta en función del tamaño del espécimen y de la densidad de discretización, la propuesta de condiciones definidas de discretización estructurada para los especímenes virtuales de mezcla asfáltica considerados para el desarrollo del presente estudio y las condiciones respectivas de discretización de las placas de carga.

Tabla 2-1. Propuesta de Discretización Estructurada para los especímenes de mezcla asfáltica y placas de carga.

Tamaño de Teórico del Especimen	Características de los Elementos Discretos		Densidad Discretización	
			Media	Gruesa
Pequeño (Diámetro 101.6 mm)	Especimen	Diámetro (mm)	1.50	2.00
		Número	4180	2347
	Placas de Carga	Diámetro (mm)	1.60	
		Número / lado	13	



Tamaño de Teórico del Especímen	Características de los Elementos Discretos		Densidad Discretización	
			Media	Gruesa
Grande (Diámetro 152.4 mm)	Especímen	Diámetro (mm)	2.06	2.54
		Número / lado	4968	3250
	Placas de Carga	Diámetro (mm)	1.60	
		Número / lado	17	

2.4 ESTADO DEL ARTE REFERENTE AL TEMA DE INVESTIGACIONES APLICADAS A MEZCLAS ASFÁLTICAS Y EL MÉTODO DE ELEMENTOS DISCRETOS

En el presente numeral se presenta un recuento de la exploración bibliográfica realizada referente a las diversas investigaciones, libros, artículos o cualquier otro producto técnico y científico que tenga relación directa con la aplicación del método de los elementos discretos en el modelado del comportamiento mecánico de mezclas asfálticas y/o de ensayo de tracción directa sobre especímenes de diversos materiales de aplicaciones geotécnicas. Dicha exploración bibliográfica fue realizada por medio de una búsqueda personalizada para el tema de consulta respectiva, en las plataformas de las siguientes bases de datos bibliográficas:

- GoogleScholar.
- Oxford Academic.
- Scopus.
- ScienceDirect.
- SpringerLink.

Consecuente a lo anterior, la siguiente tabla expone de manera resumida la información de relevancia de los diferentes productos científicos consultados:

Tabla 2-2. Resumen de la información bibliográfica consultada en referida a la aplicación del Método de Elementos Discretos y Mezclas Asfálticas.

Autor	Tipo de Documento	Título	Resumen
Fuente Bibliográfica: Google Scholar			
(Lee, 2006)	Tesis de doctorado	Modelamiento en Elementos Discretos para Mezclas Asfálticas Idealizadas	Este trabajo de investigación se enfocó en simular el comportamiento mecánico viscoelástico con elementos discretos, para especímenes cilíndricos de mezclas asfálticas idealizadas (en 3D), bajo condiciones de sollicitación de carga de compresión uniaxial y triaxial. Para adelantar las simulaciones mecánicas, se empleó el programa comercial PFC3D. Se compararon los resultados arrojados por el modelo de simulación, con datos experimentales ejecutados sobre mezclas asfálticas caracterizadas en el Reino Unido.



Autor	Tipo de Documento	Titulo	Resumen
(Mahabadi <i>et al.</i> , 2009)	Artículo Científico	Modelamiento Numérico de una prueba brasilera de rocas estratificadas usando el método combinado de elementos Finitos y Discretos	Este estudio buscó simular el comportamiento mecánico en referencia a la prueba Brasilera (tracción indirecta) de especímenes de rocas homogéneas y estratificadas. Se evaluó la incidencia de la dirección de la estratificación del espécimen con referencia a la carga aplicada y el efecto de la velocidad de carga. La simulación fue desarrollada por medio de la aplicación de un código fuente desarrollado por (Mujnza, 2004), el cual acopla dentro del modelo, el método de Elementos Discreto con el Método de Elementos Finitos. El estudio concluyó, de acuerdo con las condiciones evaluadas, que la velocidad de aplicación de carga es directamente proporcional a la carga máxima desarrollada por los especímenes de roca, e igualmente que la carga máxima es altamente influenciada por la dirección de las estratificaciones del espécimen.
(Leguizam o Echeverri & Vega Duarte, 2016)	Tesis de Maestría	Obtención de Leyes de Fatiga por Reflexión en Mezclas Asfálticas mediante el Método de Elementos Discretos.	El objetivo de la investigación es obtener las leyes de fatiga por reflexión de mezclas asfálticas tipo MDC2, por medio de la aplicación de la metodología de elementos discretos, a partir de la simulación del ensayo de tracción directa sobre especímenes del material. En ese documento, explica de manera adecuada la aplicación del modelo de contacto ligado dentro del análisis de elementos discretos. Considera solo tamaño de partículas hasta de 2.0 mm de diámetro. Para la ejecución de las simulaciones, se empleó el código fuente definido para el programa comercial PFC2D. Las leyes de fatiga obtenidas fueron comparadas con información experimental del mismo ensayo para el material. De igual forma, se presenta un análisis de sensibilidad de las leyes de fatiga simuladas variando para ello la rigidez de las partículas granulares.
(Romanel & Valverde, 2011)	Artículo Científico	Simulación del Fisuramiento en Mezclas Asfálticas por el Método de Elementos Discretos	El estudio evaluó la propagación de la fisuración de mezclas de probetas circulares de mezclas asfálticas, por medio de la simulación del ensayo DCT (Tensión Compacta de Discos), en el cual la probeta es formada con una fisura predefinida. La discretización de las probetas fue concebida de manera estructura con diámetros de partículas de 2.0 mm, 1.0 mm y 0.5 mm. Para la ejecución de las simulaciones, se empleó el código fuente definido para el programa comercial PFC2D. Se compararon los resultados obtenidos con la simulación con datos de experimentación real, para lo cual el autor refiere que se obtuvieron diferencias significativas evaluándose para ello la fuerza máxima de tracción soportada por el espécimen.
Fuente Bibliográfica: Springer Link			
(Chen <i>et al.</i> , 2011).	Artículo Científico	Modelamiento con Elementos Discretos de agrietamiento en Concreto Asfáltico usando una aproximación Micro mecánica	Los investigadores desarrollaron un modelo de elementos discretos tridimensional que simulaba el ensayo de tracción indirecta, para evaluar así el comportamiento de mezclas asfálticas ante el agrietamiento del material a nivel micro mecánico. Se emplearon partículas de forma irregular usando clusters de elementos esféricos para la configuración de un espécimen cilíndrico y se evaluó el contenido de vacíos dentro del material. Se modeló de



Autor	Tipo de Documento	Titulo	Resumen
		3D definida por el Usuario	<p>manera diferencial los contactos entre partículas (mastic asfáltico - agregados). Se empleó el código fuente escrito en lenguaje de programación Fish, disponible en el programa comercial PFC3D. Los resultados obtenidos por el modelo generado (expresado en curvas esfuerzo vs deformación a tensión) fueron comparados con resultados experimentales, obteniendo comparaciones satisfactorias entre ambas situaciones.</p>
(Ma <i>et al.</i> , 2016)	Artículo Científico	Modelamiento Micro estructural y Prueba Virtual de Mezclas Asfálticas basado en el Método de Elementos Discretos Tridimensional.	<p>Se buscó realizar la modelación a nivel micro estructural de mezclas asfálticas simulando pruebas de penetración y de fluencia uniaxial por medio de Elementos Discretos. Los agregados gruesos constitutivos de la mezcla asfáltica fueron generados aleatoriamente dentro del espécimen virtual, con diferentes tamaños de partículas. El mastic asfáltico fue modelado por medio de partículas discretas de pequeño diámetro (1.0 mm). Para adelantar las simulaciones mecánicas, se empleó el programa comercial PFC3D. Se concluyó en términos generales que los resultados tanto de las pruebas simuladas como de las pruebas experimentales asociadas a la referida investigación, presentan una adecuada correlación.</p>
(Chen, Pan, <i>et al.</i> , 2012)	Artículo Científico	Predicción del Comportamiento Dinámico de Concreto Asfáltico usando el Método de Elementos Discretos Tridimensional.	<p>Se buscó predecir el módulo dinámico y ángulo de fase de concreto asfáltico por medio del método de elementos discretos en 3D. Se modelaron la gradación del agregado con partículas irregulares tridimensionales conformadas por clúster de circunferencias, vacíos con aire y el mastic asfáltico dentro de especímenes cilíndricos sometidos a solicitaciones de compresión uniaxial cíclico. Se desarrolló un código fuente escrito en lenguaje de programación Fish, disponible en el programa comercial PFC3D. El modelo desarrollado fue validado empleando datos de curvas esfuerzo – deformación experimental, obteniendo resultados favorables para los parámetros mecánicos considerados.</p>
(Cai <i>et al.</i> , 2013)	Artículo Científico	Modelamiento con Elementos Discretos de Pruebas de Compresión de Deformación constante sobre Mezclas Asfálticas Idealizadas.	<p>Se modelaron especímenes de mezclas asfálticas con partículas esféricas de tamaño homogéneo (tamaño arena), sometidos a solicitaciones de compresión uniaxial monotónica. La mezcla simulada numéricamente comprendía 70% agregado, 20% bitumen y 10% vacíos. Se evaluó dentro del trabajo de investigación la incidencia de la velocidad de deformación de carga, y la temperatura del material expresado en los parámetros mecánicos básicos del ligante asfáltico. Se consideró un modelo mecánico viscoelástico lineal para la representación de la rigidez de los contactos entre partículas. Se empleó el programa comercial PFC3D para la ejecución de las simulaciones consideradas. Se reportan resultados satisfactorios entre las simulaciones ejecutadas en comparación con los resultados experimentales considerados para el trabajo de investigación en cuestión.</p>



Autor	Tipo de Documento	Titulo	Resumen
Fuente Bibliográfica: Scopus			
(Y. Liu & You, 2011)	Artículo Científico	Modelamiento en elementos discretos acelerados de materiales asfálticos con el principio de superposición Temperatura – Frecuencia.	<p>La investigación presenta una metodología para reducir el tiempo de computación de análisis por elementos discretos para materiales asfálticos, empleando para ello el principio de superposición Tiempo-Temperatura. Para lo anterior, se ejecutaron pruebas experimentales para determinar los parámetros mecánicos del material, en relación al modelo mecánico de Burger, para aplicar al modelo propuesto.</p> <p>Para la ejecución de las simulaciones viscoelásticas en 2D y 3D, se empleó el código fuente definido para los programas comerciales PFC2D y PFC3D, obteniendo módulos dinámicos y ángulos de fase como respuesta mecánica del material.</p> <p>Reporta el artículo que tanto los resultados de las simulaciones 2D y 3D para los materiales asfálticos modelados, presentan una adecuada relación y precisión con los resultados experimentales de base considerados para el estudio.</p>
(Chen, Huang, et al., 2012)	Artículo Científico	Aplicación del Método de Elementos Discretos para la Compactación Giratoria Superpave.	<p>Se simuló el proceso de compactación de mezclas asfálticas en caliente realizado con el compactador giratorio Superpave, empleando para ello el Método de Elementos Discretos en 3D. Las simulaciones ejecutadas solo consideraron partículas de diámetro superior a 2.36 mm, considerándose esferas cubiertas con una película de mastic asfáltico.</p> <p>Se empleó como base el código fuente abierto denominado YADE Open-DEM para las simulaciones computacionales, siendo implementado y modificado en el lenguaje C++.</p> <p>Los resultados arrojados del estudio de acuerdo al modelo desarrollado fueron validados por medio de resultados de pruebas experimentales, obteniendo respuestas concordantes para ambas condiciones y justificando la aplicación del DEM para este tipo de análisis.</p>
(Mahmoud et al., 2010)	Artículo Científico	Análisis de Elementos Discretos de la Influencia de las propiedades del agregado y la estructura interna en Fractura de Mezclas Asfálticas	<p>Esta investigación combinó el Método de Elementos Discretos con técnicas de procesamiento de imágenes, para simular, por medio del ensayo de tracción indirecta en 2D, la resistencia a la fractura de mezclas asfálticas evaluando el efecto de la forma, rigidez y gradación del agregado. Se evaluaron 5 tipos de agregados: de origen granítico, caliza dura, caliza blanda, grava y arenisca.</p> <p>Para la ejecución de las simulaciones, se empleó el código fuente definido para el programa comercial PFC2D.</p> <p>Como conclusión más relevante del estudio, arrojó que los agregados de origen de piedra caliza suave experimentaron las fuerzas internas más altas en comparación con los otros tipos de agregados evaluados en la fabricación de la mezcla asfáltica.</p>



Autor	Tipo de Documento	Titulo	Resumen
(You & Buttlar, 2004)	Artículo Científico	Modelamiento con Elementos Discretos para predecir el Módulo de mezclas de concreto asfáltico.	<p>Se empleó la modelación micro mecánica en elementos discretos, para predecir el módulo dinámico de mezclas asfálticas bajo solicitaciones de compresión y tensión, para un rango de temperatura y frecuencias de carga. El módulo complejo de la mezcla asfáltica fue estimado a partir del módulo de rigidez del agregado y del mastic, como datos de entrada del modelo. Se emplearon resultados experimentales para validar el modelo simulado.</p> <p>Para la ejecución de las simulaciones, se empleó el programa comercial PFC2D.</p> <p>Reporta el investigador, que los resultados de módulos dinámicos obtenidos de la simulación fueron razonables para escenarios de simulación a bajas temperaturas con relación a los datos experimentales disponibles en el estudio. Para altas temperaturas del material, los resultados no fueron satisfactorios en comparación con los valores medidos en laboratorio.</p>
(Zhou <i>et al.</i> , 2020)	Artículo Científico	Investigación de la estructura interna de mezclas asfálticas en modelos de elementos discretos acelerados.	<p>Este estudio se propuso la reducción del módulo de rigidez de mezclas asfálticas para poder así acelerar la simulación en elementos discretos del proceso de compactación, teniendo en cuenta el alto tiempo y costo computacional que este método numérico precisa. Se emplearon pruebas de laboratorio y simulaciones para verificar la posibilidad de aceleración computacional de los análisis en DEM, sin afectar la precisión de las simulaciones realizadas. Se incluyeron tres tipos de gradaciones del material granular para las mezclas asfálticas.</p> <p>En el cuerpo del artículo científico no se especificó el programa o código fuente de elementos discretos empleado para la ejecución de la investigación.</p> <p>Los resultados referidos por los autores para el caso de simulaciones del proceso de compactación de mezclas asfálticas, consideraron el rango de reducción del módulo en 1/100 veces; para un aumento de la eficiencia de cálculo de diez veces en los análisis numéricos.</p>
(Kim <i>et al.</i> , 2009).	Artículo Científico	Modelamiento de fractura micro mecánica de concreto asfáltico usando el ensayo de viga de borde simple.	<p>La presente investigación implementó una aproximación bidimensional en elementos discretos agrupados para simular el comportamiento complejo del agrietamiento durante pruebas de fractura de concreto asfáltico. El ensayo simulado corresponde a la prueba de viga muescada de cuña simple, simplemente apoyada con una carga puntual en el centro del espécimen.</p> <p>Para la ejecución de las simulaciones, se empleó el programa comercial PFC2D.</p> <p>La investigación arrojó la construcción de un modelo numérico de fractura basado en un modelo mecánico de ablandamiento cohesivo. Los parámetros de los materiales para el modelo fueron determinados a partir de pruebas experimentales ejecutadas sobre el material estudiado. El autor refiere que los modelos desarrollados generan buenos resultados de predicción del agrietamiento del material.</p>



Autor	Tipo de Documento	Titulo	Resumen
(Abbas <i>et al.</i> , 2005)	Artículo Científico	Modelamiento de la rigidez del mastic asfáltico usando análisis de elementos discretos y modelos de base micro mecánica.	<p>Este estudio empleó el método de elementos discretos para simular dinámicamente el comportamiento mecánico del mastic asfáltico, comparando los resultados de las simulaciones con datos experimentales ejecutados. También se estudió la sensibilidad de diferentes modelos micro mecánicos disponibles en la literatura, en referencia al módulo cortante del ligante asfáltico.</p> <p>Para la ejecución de las simulaciones, se empleó el programa comercial PFC2D.</p> <p>Los resultados del estudio arrojaron que el módulo cortante dinámico predicho del mastic tiene una alta dependencia del módulo cortante del ligante según las simulaciones ejecutadas, en concordancia con los datos experimentales recopilados para el estudio.</p> <p>De igual forma el modelo de elementos discretos propuesto representó adecuadamente el efecto exponencial de la fracción de volumen del filler en la rigidez del mastic, tal como se observó en las pruebas experimentales.</p>
(Y. Liu & You, 2008)	Artículo Científico	Simulación de pruebas de carga cíclicas para mezclas asfálticas usando modelos predefinidos dentro de elementos discretos.	<p>Esta investigación buscó desarrollar un nuevo modelo de simulación de pruebas de cargas cíclicas para mezclas asfálticas usando el método de elementos discretos. Se generó un algoritmo denominado algoritmo de polígonos aleatorio, donde se empleaban polígonos para representar partículas de agregados del material. Pruebas de laboratorio de agregados y mastic asfáltico se ejecutaron para determinar los parámetros de entrada del modelo computacional desarrollado.</p> <p>Para la ejecución de las simulaciones del respectivo trabajo de investigación, se empleó el programa comercial PFC2D.</p> <p>Los resultados del trabajo fueron promisorios entre los simulado y lo medido en laboratorio, en referencia al módulo dinámico del material y el ángulo de fase.</p>
(Ma <i>et al.</i> , 2018).	Artículo Científico	Simulación de pruebas de pista de prueba para mezclas asfálticas usando modelos de elementos discretos.	<p>Este estudio simuló en dos dimensiones ensayos de pista de prueba y el comportamiento en ahuellamiento en alta temperatura de una mezcla asfáltica, usando elementos discretos. Se consideraron agregados de forma irregular y propiedades viscoelásticas para el mastic asfáltico.</p> <p>Para la ejecución de las simulaciones del respectivo trabajo de investigación, se empleó el programa comercial PFC3D.</p> <p>Los resultados del modelo arrojaron resultados de simulación para ahuellamiento de etapa primario y secundario, sin embargo, el estudio no arrojó validación con resultados experimentales para la comparación del caso.</p>
Fuente Bibliográfica: Science Direct			



Autor	Tipo de Documento	Titulo	Resumen
(Qian <i>et al.</i> , 2020).	Artículo Científico	Seguimiento al proceso de compactación para mezclas asfálticas usando el método de elementos discretos.	<p>Esta investigación se llevó a cabo para simular por medio de la metodología de elementos discretos en 2D, el proceso de computación de mezclas asfálticas normalmente ejecutado en el laboratorio (compactación Marshall y compactación estática). Se evaluó la incidencia en la respuesta mecánica del material, de una distribución y tamaño crítico de agregado y las condiciones de contorno del modelo computacional propuesto.</p> <p>La aplicabilidad del modelo fue demostrada por medio de comparaciones con resultados de pruebas de laboratorio complementarias.</p> <p>Las simulaciones fueron ejecutadas usando el programa comercial PFC3D.</p> <p>El artículo científico reporta en sus conclusiones que los resultados simulados para los procesos de compactación evaluados son consistentes con los resultados experimentales realizados.</p>
(Wang <i>et al.</i> , 2020).	Artículo Científico	Desarrollo de un modelo heterogéneo, viscoelástico bidimensional para el estudio de agrietamiento en bloque en pavimentos asfálticos.	<p>Este trabajo de investigación buscó desarrollar una serie de modelos de elementos discretos basados en micromecánica heterogénea y viscoelástico bidimensional para evaluar la formación de grietas en bloques en pavimentos asfálticos sujetos a cargas térmicas.</p> <p>El autor refiere que el mecanismo de formación del agrietamiento del bloque se simuló evaluando para ello los efectos del tamaño de las partículas y espécimen, el tiempo de relajación de los materiales asfálticos, el envejecimiento oxidativo del betún asfáltico y el agrietamiento preexistente. Se emplearon modelos mecánicos elásticos y viscoelásticos para la caracterización mecánica de los materiales constitutivos.</p> <p>Las simulaciones fueron ejecutadas usando el programa comercial PFC3D/2D.</p>
(Cai <i>et al.</i> , 2014).	Artículo Científico	Modelamiento viscoelástico con elementos discretos de una mezcla asfáltica de gradación real.	<p>El método numérico de elementos discretos se empleó para simular pruebas de compresión uniaxial con tasa de deformación constante para una mezcla asfáltica realista que comprende agregados densamente gradados. Las simulaciones fueron realizadas en tres dimensiones para especímenes cilíndricos.</p> <p>Las simulaciones fueron ejecutadas usando el programa comercial PFC3D.</p> <p>Se concluyó que el modelo mecánico de Burgers modificado puede predecir adecuadamente el comportamiento mecánico de mezclas asfálticas ante sollicitaciones o ensayos de velocidad de deformación constante utilizando el Método de elementos discretos.</p>



Autor	Tipo de Documento	Titulo	Resumen
(Ding <i>et al.</i> , 2018).	Artículo Científico	Efectos de la homogeneidad del esqueleto del agregado sobre el comportamiento de fluencia del concreto asfáltico	<p>Esta investigación evaluó por medio de simulaciones micromecánicas en elementos discretos, la propiedad de homogeneidad de la distribución granulométrica del esqueleto mineral de mezclas asfálticas sobre el desempeño a fluencia. Se investigaron 2 tipos de mezclas: densa y discontinua. El estudio se complementó con pruebas experimentales para las mezclas asfálticas en cuestión.</p> <p>Las simulaciones numéricas fueron ejecutadas usando el programa comercial de elementos discretos PFC3D. Como resultado se concluyó que la simulación numérica de la prueba de fluencia mostró buena correlación con las pruebas de laboratorio ejecutadas. Además, se encontró que mezclas asfálticas con esqueleto de agregados más duros muestran mejor comportamiento ante la fluencia del material, mientras que la propiedad homogeneidad del esqueleto del agregado muestra más obvias influencias en el comportamiento a fluencia del hormigón asfáltico con un esqueleto de agregado grueso más fuerte.</p>
(Zhang <i>et al.</i> , 2018).	Artículo Científico	Impactos de las estructuras de vacíos con aire en los ensayos de ahuellamiento del concreto asfáltico basados en simulación discretizada.	<p>Se investigó los impactos de las estructuras internas de vacíos con aire en el desempeño a alta temperatura del concreto asfáltico de gradación densa. Los modelos digitales del ensayo de ahuellamiento con especímenes de mastic asfáltico, agregados gruesos y vacíos con aire, fueron construidos en el software de simulación PFC3D. Los trabajos de simulación se complementaron con pruebas experimentales de ahuellamiento y de fluencia. Como resultado se concluyó que, al comparar con las pruebas de ahuellamiento, las pruebas de ahuellamiento simuladas pueden caracterizar bien el comportamiento de ahuellamiento del hormigón asfáltico. De igual forma, la prueba simulada de ahuellamiento pudo caracterizar convenientemente los impactos de las estructuras de vacíos con aire en la resistencia a ahuellamiento del concreto asfáltico. Se probó igualmente con las simulaciones, que tanto el nivel de porosidad como la distribución espacial de los vacíos con aire dentro de las muestras de concreto asfáltico muestran impactos obvios en la resistencia a la formación de deformaciones permanentes del concreto asfáltico.</p>
(Nian <i>et al.</i> , 2021).	Artículo Científico	Simulación numérica mejorada con elementos discretos y experimento sobre el desempeño antifisuración a baja temperatura de mezclas asfálticas basado en PFC2D.	<p>Este estudio evaluó la ley de agrietamiento de mezclas asfálticas a bajas temperaturas, estableciendo un modelo mesoscópico mejorado en elementos discretos, de espécimen tipo Marshall sometido a carga de tensión indirecta y un espécimen rectangular sometido a flexión trabecular de tres puntos.</p> <p>Las simulaciones fueron ejecutadas usando el programa comercial PFC2D.</p> <p>Se concluyó que el software de elementos discretos empleado en el trabajo de investigación, tiene buena confiabilidad en la simulación de las pruebas evaluadas para mezclas asfálticas con diferentes gradaciones. De igual forma, el modelo mejorado de simulación numérica a nivel meso propuesto en dicha investigación, tiene una buena precisión, en referencia con resultados de datos experimentales recopilados.</p>



Autor	Tipo de Documento	Titulo	Resumen
(Wang <i>et al.</i> , 2021).	Artículo Científico	Mecanismo mesoscópico de fluencia para mezclas asfálticas basado en el método de elementos discretos	<p>Se investigó un mecanismo de fluencia de mezclas asfálticas a nivel mesoscópico, mediante la simulación de una prueba de fluencia dinámica por medio del método de elementos discretos (DEM) bidimensional. La modelación en DEM involucro partículas de forma irregular. Las simulaciones fueron ejecutadas usando el programa comercial PFC2D.</p> <p>Como conclusión del estudio, se tuvo que la deformación axial de la fluencia dinámica disminuyó con el aumento del módulo del mastic asfáltico, considerado en el modelo mecánico de Burgers. De igual forma, el módulo del mastic asfáltico estuvo estrechamente relacionado con la deformación de las mezclas asfálticas.</p>
(Dondi <i>et al.</i> , 2012).	Artículo Científico	Modelamiento del módulo cortante complejo del ensayo de reómetro de corte dinámico de ligantes asfálticos usando una aproximación de elementos discretos en 3D.	<p>Esta investigación desarrolló una aproximación de elementos discretos en 3 dimensiones, para predecir el módulo complejo y el ángulo de fase de betunes asfálticos, obtenido del ensayo que emplea el Reómetro de Corte Dinámico. De igual forma, la interacción entre partículas a nivel micro, fue simulada por medio de un modelo de contacto mecánico de Burgers. Las simulaciones numéricas fueron ejecutadas usando el programa comercial de elementos discretos PFC3D.</p> <p>Los resultados obtenidos de la investigación confirman que el Método de los Elementos Discretos es una herramienta útil y confiable para modelar el comportamiento reológico de cementos asfálticos. De igual forma, se definió que la aproximación adoptada logra predecir adecuadamente, tanto cuantitativa como cualitativamente, el módulo complejo y el ángulo de fase en un amplio rango de temperaturas y frecuencias de cementos asfálticos.</p>
(Feng <i>et al.</i> , 2015).	Artículo Científico	Estudio de las propiedades normales y cortantes de modelos viscoelástico de mezclas asfálticas por método de elementos discretos	<p>En este artículo se investigó y estudió sobre el comportamiento viscoelástico de mezclas asfálticas utilizando el método de elementos discretos, empleando el modelo mecánico de Burger. Se emplearon resultados de ensayos experimentales ejecutados sobre mezclas asfálticas para la calibración del modelo de Burger empleado en las simulaciones.</p> <p>Las simulaciones numéricas fueron ejecutadas usando el programa comercial de elementos discretos PFC3D, bajo una configuración de pruebas uniaxiales de tensión-compresión.</p> <p>El estudio arrojó como conclusión principal que el comportamiento viscoelástico de mezclas asfálticas puede ser adecuadamente modelado por medio del modelo mecánico de Burger en el método de elementos discretos. De igual forma se encontró que tanto el módulo dinámico como el ángulo de fase de mezclas asfálticas, pueden predecirse adecuadamente en cierto rango de frecuencias de carga, por medio del modelo ahí desarrollado.</p>



Autor	Tipo de Documento	Titulo	Resumen
(Xue <i>et al.</i> , 2020).	Artículo Científico	Uso de un modelo de Elementos Discretos heterogéneo aleatorio para simular el comportamiento por fractura de concreto asfáltico por medio del ensayo de flexión semi-circular.	Esta investigación busco desarrollar un modelo de fractura heterogénea de mezclas asfálticas, basado en la técnica algorítmica y el método de elementos discretos, simulando para ello la prueba de flexión semicircular (SCB). El concreto asfáltico se modeló como materiales heterogéneos con estructuras aleatorias de agregados y mastic asfáltico. Se utilizó un modelo de agrietamiento cohesivo bilineal como ley constitutiva para modelar el inicio y la propagación de las grietas. La simulación se verificó mediante resultados experimentales de mezclas asfálticas con diferentes tamaños máximos nominales de agregado a diferentes temperaturas. En el cuerpo del artículo científico no se especificó explícitamente el programa o código fuente de elementos discretos empleado para la ejecución de la investigación. Los resultados de las simulaciones computacionales mostraron una excelente concordancia con los resultados experimentales ejecutados para diferentes temperaturas y con diferentes tipos de material asfáltico. De igual forma, los autores refieren que el modelo de simulación de agrietamiento planteado en el estudio, podría usarse para reducir el número requerido de ensayos experimentales, de por sí costosos y demorados, además de ayudar a comprender el comportamiento de fracturamiento del concreto asfáltico.

2.5 LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN VISUAL BASIC .NET

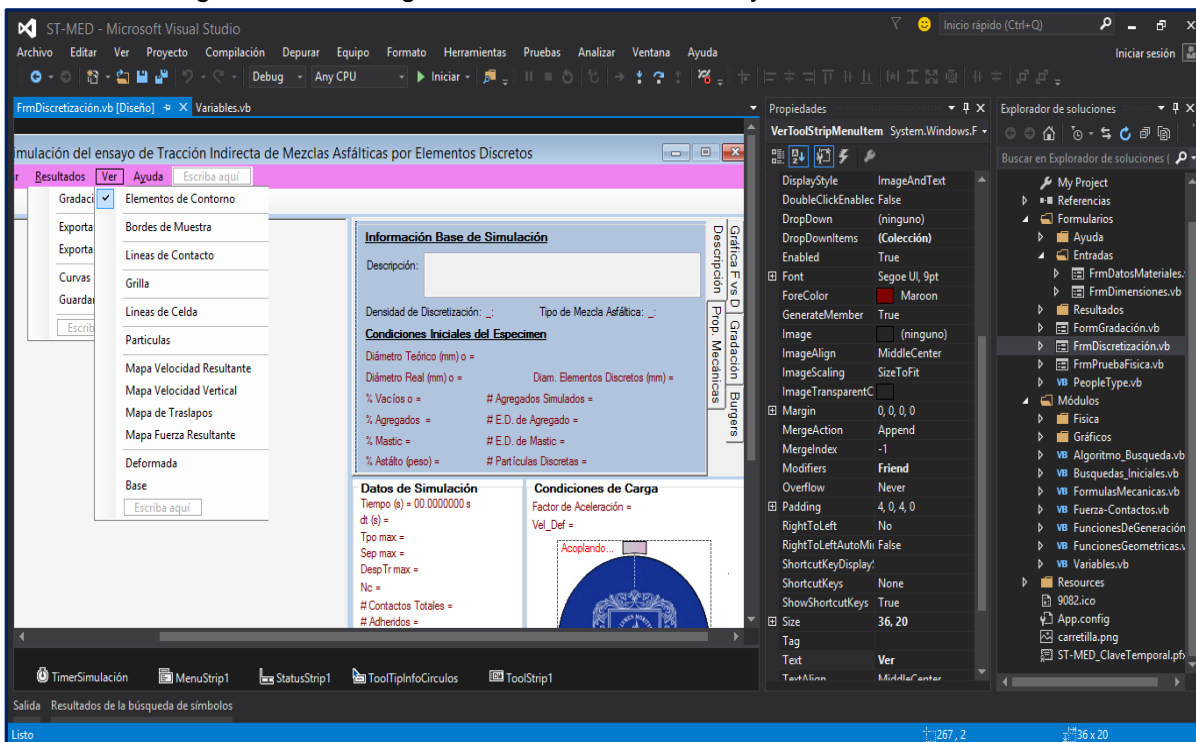
Este aparte del informe presenta una breve descripción del Lenguaje de Programación Visual Basic .Net y su plataforma asociada de trabajo, toda vez que el diseño computacional, lógico y gráfico de la aplicación respectiva y de los algoritmos propuestos en el presente trabajo de grado, fueron desarrollados en este lenguaje teniendo en cuenta que dicho lenguaje, al ser una herramienta de programación genérica o de propósito general, presenta ciertas ventajas y facilidades en relación a otros lenguajes disponibles.

Tal como se precisa en autores como (Luna, 2011), Visual Basic .NET es un lenguaje de programación genérico de nueva generación orientado al desarrollo lógico de objetos y eventos, considerado como una evolución del lenguaje Basic y posteriormente del Visual Basic e implementado sobre el entorno de administración lógica de framework.NET, el cual fue diseñado por Microsoft Corporation® para ser ejecutado sobre las plataformas de arquitectura computacional Windows.

Este lenguaje de programación, Visual Basic .NET, presenta una importante simplicidad en su sintaxis de ejecución, sin embargo, tiene la capacidad de poder crear aplicaciones muy potentes y sofisticadas, facilitando el manejo de bases de datos, los cálculos matemáticos de orden iterativo y cíclico, la elaboración de ambientes gráficos e incluso aplicaciones de entorno de desarrollo web. La Figura 2-22 expone el ambiente de trabajo principal para la plataforma de Visual Basic. Net sobre el entorno de desarrollo de Visual Studio 2013.



Figura 2-22. Vista general del entorno de trabajo de Visual Basic .Net.



Entre las principales ventajas identificadas que se presentan en el adiestramiento, manejo y empleo del lenguaje de programación Visual Basic .Net, son las enunciadas a continuación:

- Es de rápido y fácil aprendizaje y de manejo funcional para el desarrollo de cualquier nivel y tipo de aplicación.
- Integra el diseño y la implementación de formularios y controles en ambiente de Windows, de uso común actualmente en los ordenadores de escritorio o portátiles disponibles en el mercado tecnológico.
- En consecuencia de lo anterior, permite usar con facilidad la plataforma de los sistemas operativos de arquitectura bajo Windows.
- Es uno de los lenguajes de uso más extendido a nivel mundial.
- Fácilmente extendible mediante la aplicación de librerías predefinidas con extensión DLL.
- Permite desarrollar grandes y complejas aplicaciones, incluyendo el manejo de base de datos de tamaño importante y de gráficos complejos.
- Provee un entorno adecuado para realizar pequeños prototipos rápidos o muy sofisticados.

En consecuencia, el código fuente de todos los algoritmos desarrollados en el presente trabajo de investigación y adicionalmente la aplicación correspondiente, los cuales fueron desarrollados bajo el entorno de programación de Visual Basic .Net, serán explicados conceptualmente más adelante en este informe, y serán incluidos como anexo del presente documento.



3 MODELO COMPUTACIONAL PROPUESTO

En este capítulo se presenta una descripción general del algoritmo lógico desarrollado para la elaboración del modelo computacional asociado como objeto fundamental al presente trabajo de grado. Lo anterior teniendo en cuenta que el lenguaje de programación empleado para la elaboración del modelo computacional en cuestión, fue Visual Basic .Net en entorno de desarrollo Visual Studio 2013, y para el cual se idearon y escribieron las líneas de código o de sentencias de comandos respectivas, que hacen posible que la aplicación del modelo computacional respectivo sea ejecutada por parte del usuario.

Bajo el marco anterior, el trabajo intelectual realizado para la estructuración del algoritmo del modelo en Elementos Discretos en cuestión en aplicación al comportamiento mecánico de mezclas asfálticas, fue desarrollado pensando en generar condiciones de simpleza computacional, facilidad de procesamiento de resultados, algo de estética visual y fácil uso por parte de los usuarios de la aplicación de simulación de mecánica computacional. También se tuvo como objetivo indirecto, lograr de manera posible un fácil entendimiento del código fuente, para que cualquier interesado con un mínimo conocimiento de programación y de algoritmia básica, pueda tener las herramientas para descifrar y entender la rutina lógica constitutiva, ya sea para su posterior estudio, uso o mejora dado el caso.

Se deberá considerar por parte de los lectores del presente informe de trabajo de grado, que la explicación conceptual del algoritmo referido en este componente del documento, debe ser complementado con la lectura y entendimiento del Anexo 01, correspondiente al Manual de Usuario del aplicativo para la ejecución del modelo computacional objetivo del presente trabajo de grado, además del Anexo 03 que contiene la totalidad del Código Fuente desarrollado.

En consecuencia y de manera resumida y a nivel de apreciación macro desde el punto de vista de programación lógica computacional, la aplicación consta de 2 elementos principales que son los módulos y los formularios. Los formularios, que son los contenedores gráficos, fueron diseñados para permitir la interacción entre el computador (*software y hardware*) y el usuario respectivo durante la ejecución de la aplicación, tal como refiere (Luna, 2011). Bajo el marco anterior, en el Anexo 01 (Manual de Usuario), se presenta una descripción detallada de todos los formularios y los controles que constituyen el componente interactivo de la aplicación y sus condiciones de uso y de manipulación respectivas.

Por otra parte se encuentran los módulos de programación, corresponden a las áreas alfanuméricas de trabajo en donde se declaran local o globalmente las variables, los vectores, las matrices y las estructuras de datos constitutivas, tal como lo estipulan autores como (Blanco, 2002). Además de lo anterior, dentro de los módulos se declaran y se escriben las sentencias de comandos de los procedimientos y de las funciones, y se programa toda la interacción lógica entre los procedimientos, las funciones, los formularios y los controles contenidos dentro de los formularios, que permiten de manera sistemática, el ejecutar funcionalmente la aplicación.



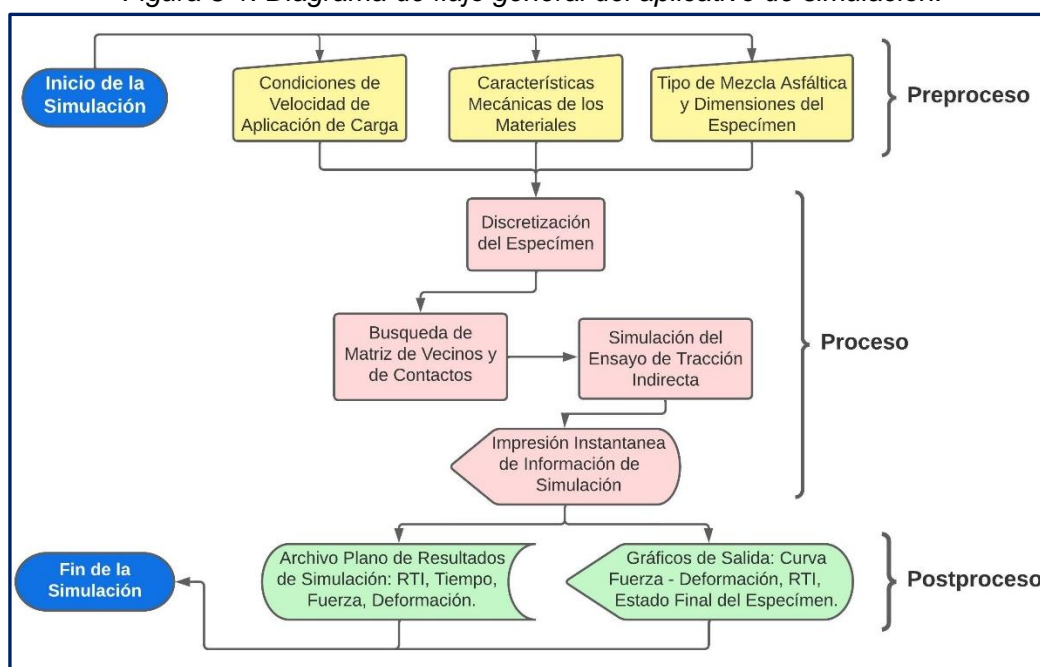
3.1 DIAGRAMAS DE FLUJO EXPLICATIVOS

Desde un punto de vista de análisis macro de desarrollo lógico y conceptual, el algoritmo planteado para la simulación del ensayo de tracción indirecta sobre especímenes de mezclas asfálticas, comprende 3 etapas principales de ejecución tal como se describe a continuación:

1. Etapa de preprocesamiento, que básicamente comprende el ingreso de los parámetros mecánicos de los diferentes materiales por parte del usuario, además de la definición de las condiciones geométricas de la muestra modelada y de velocidad de ejecución del ensayo, expresado en la velocidad de deformación para la aplicación de carga sobre el espécimen.
2. Etapa de procesamiento, que comprende tanto la discretización del espécimen virtual del material asfáltico, como la simulación del ensayo definido como tal y la representación gráfica e impresión continua e instantánea de los parámetros y resultados de la simulación.
3. Etapa de postprocesamiento, que refiere a la entrega al usuario de los archivos planos numéricos y gráficos finales de los resultados obtenidos a lo largo del proceso de representación computacional.

Bajo las anteriores consideraciones, la Figura 3-1, presenta de manera conceptual dada la complejidad y extensión del código fuente elaborado, el diagrama de flujo general del modelo computacional desarrollado. En complemento, será presentado seguidamente en este mismo capítulo del documento y con el objetivo de generar mayor entendimiento de su desarrollo, una descripción más detallada acerca de los procedimientos principales que constituyen la etapa respectiva del proceso, a saber: Discretización del medio geométrico y la simulación numérica del ensayo de comportamiento mecánico del espécimen de material bituminoso.

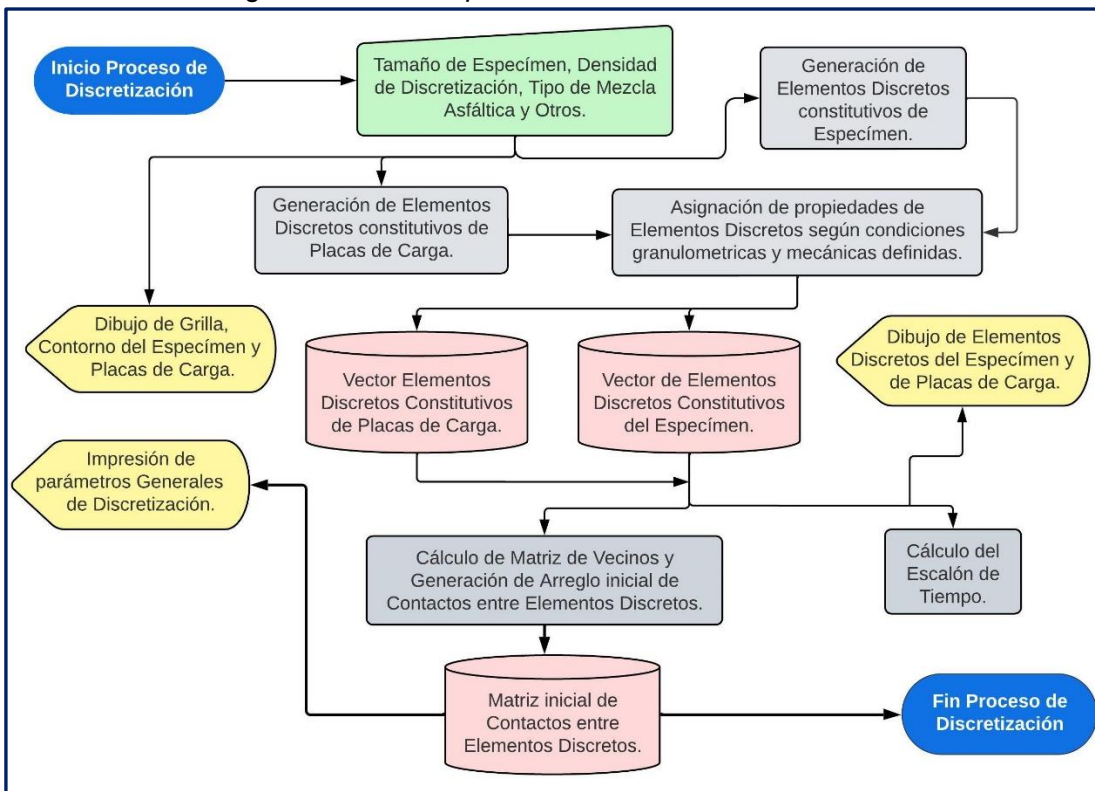
Figura 3-1. Diagrama de flujo general del aplicativo de simulación.



El proceso de Discretización del modelo geométrico que representa el espécimen del material asfáltico sobre el cual se ejecutará la simulación, comprende el algoritmo confeccionado para generar la subdivisión en un número finito de elementos discretos, de tal forma que se logre obtener un modelo o prototipo numérico que garantice condiciones similares en orden de magnitud de masa unitaria y de porosidad, a las manejadas normalmente en el laboratorio.

Teniendo en cuenta que los materiales geotécnicos empleados en la infraestructura vial típicamente presentan, tanto en campo como en laboratorio, una distribución aleatoria de partículas, el proceso de discretización inicia con la localización específica de cada elemento discreto que integrará el dominio geométrico, siendo su designación particular de tipo de material constitutivo realizado a partir de un proceso de generación de números aleatorios, y en función de una distribución granulométrica asociada a un tipo de mezcla asfáltica definida por parte del usuario como dato de entrada. La Figura 3-2 expone de manera explicativa el diagrama de flujo asociado al algoritmo desarrollado para el proceso de discretización del espécimen.

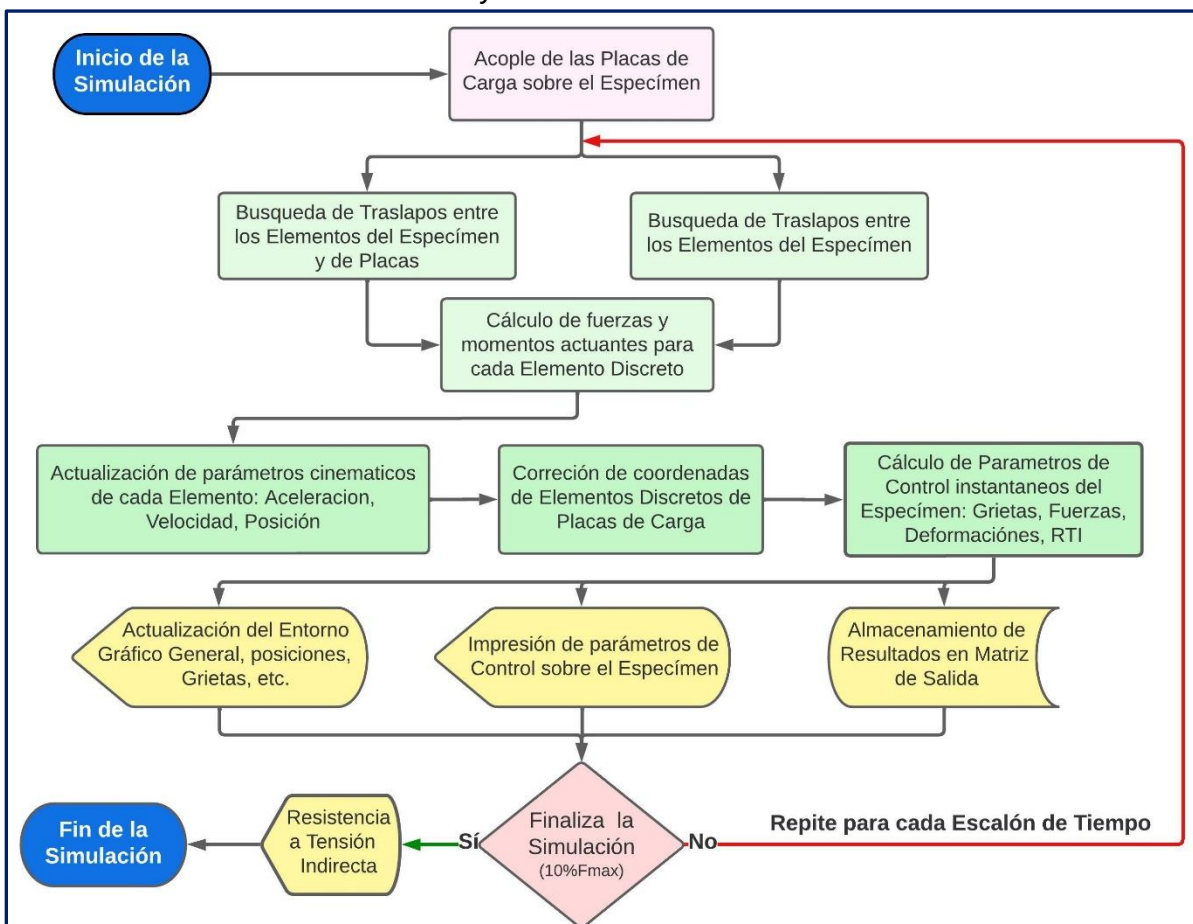
Figura 3-2. Diagrama de flujo explicativo del algoritmo asociado al proceso de discretización del dominio geométrico del espécimen de material de mezcla asfáltica.



De igual forma, la Figura 3-3 detalla para cada escalón de tiempo referido a un instante de tiempo en ejecución del modelo computacional, el diagrama de flujo asociado al algoritmo generado en referencia al proceso de Simulación del Ensayo de Tracción Indirecta sobre un espécimen de mezcla asfáltica en particular. Dicho proceso de simulación realizado, implica por tanto la ejecución continua y sistemática de los siguientes subprocesos:



Figura 3-3. Diagrama de flujo explicativo del algoritmo asociado al proceso de Simulación del ensayo de Tracción Indirecta.



- Modelamiento de la aplicación de la carga vertical de compresión diametral sobre el espécimen, en concordancia con las magnitudes establecidas en la norma INV E786-13, en función de la corrección de las coordenadas de los elementos discretos que representan las placas de carga, superior e inferior.
- Búsqueda y actualización de los traslapos entre los elementos discretos del espécimen entre sí, y de igual forma con los elementos discretos de contorno o de las placas de aplicación de carga, para obtener las fuerzas y momentos resultantes sobre cada partícula.
- Actualización de los parámetros cinemáticos y geométricos en específico de cada elemento discreto (aceleraciones, velocidades, posiciones) y regeneración de la interfaz gráfica según la información espacial renovada de los elementos.
- Cálculo y almacenamiento de las solicitaciones de fuerzas a compresión aplicadas y las deformaciones verticales diametrales asociadas sobre el espécimen del material, identificación de condiciones de generación de grietas o rompimiento de adherencia entre partículas, trazabilidad de parámetros de respuesta de deformaciones del espécimen y de condiciones volumétricos y gravimétricos y otros parámetros de control de la muestra, y almacenamiento de resultados en la matriz de resultados o matriz de salida declarada para tal fin.

Finalmente, el proceso iterativo del algoritmo desarrollado termina automáticamente con el cumplimiento del criterio del 10% de la fuerza máxima soportada por el espécimen, solicitación clave dentro de la simulación que es plenamente identificada por la programación del *software* a lo largo del periodo de análisis respectivo. Sin embargo, el usuario puede terminar la simulación en cualquier instante, pero deberá tener la precaución de guardar previamente toda la información resultante del ejercicio adelantado. Es de tener en cuenta que el artículo INV E786-13, no regula explícitamente la condición específica para la terminación de la prueba de tracción indirecta en el laboratorio.

3.2 VARIABLES Y ESTRUCTURAS DE DATOS

Toda la información alfanumérica y gráfica requerida para la estructuración del código fuente y necesaria para la ejecución del modelo computacional propuesto, fueron almacenadas en arreglos lógicos temporales o definitivos dentro del código fuente, empleando para ello variables, vectores, matrices o estructuras de datos, tal como se detalla de manera subsecuente en el presente subnumeral del informe.

3.2.1 ESTRUCTURAS DE DATOS

A manera explicativa, a continuación, se procederá a describir las características y los campos respectivos de las estructuras de datos de ámbito global, definidas y empleadas para la respectiva formulación del modelo numérico de simulación computacional del ensayo de tracción indirecta, objeto del presente trabajo de grado.

Elementos:

Esta estructura de datos, denominada “*Elementos*”, fue concebida para almacenar las características de tipo geométricas, mecánicas, cinemáticas y complementarias, para cada uno de los elementos discretos generados durante el proceso de discretización de la muestra de material granular, guardando la información respectiva a lo largo de cada instante de tiempo de la simulación ejecutada.

En consecuencia, esta estructura de datos es típicamente dinámica para cada uno de los elementos discretos, por lo cual, se modifican los valores de los campos que definen las características correspondientes durante cada escalón de tiempo ejecutado de la simulación. La Tabla 3-1 muestra la composición de campos asociada a la estructura de datos denominada Elementos.

Tabla 3-1. Características de la Estructura de datos definida para almacenar los parámetros del Vector de Elementos Discretos Constitutivos.

Campo	Tipo de Variable	Descripción del Campo
TipoParticula	Cadena	Define el material del elemento discreto, ya sea granular, mastic, o acero.
No_Particula_Real	Entero	Número de partícula dentro del espécimen que constituye el elemento discreto.
x_o	Doble	Coordenada x inicial del centro geométrico del elemento discreto, en mm.
y_o	Doble	Coordenada y inicial del centro geométrico del elemento discreto, en mm.



Campo	Tipo de Variable	Descripción del Campo
x	Doble	Coordenada x del centro geométrico del elemento discreto, en mm.
y	Doble	Coordenada y del centro geométrico del elemento discreto, en mm.
r	Doble	Radio del elemento discreto, en mm.
A	Doble	Área del elemento discreto, en mm ² .
m	Doble	Masa del elemento discreto, en kg.
Tamiz	Entero	Número del tamiz asociado a la partícula que constituye el elemento.
D	Doble	Masa unitaria del elemento discreto, en kg/m ³ .
Gr	Doble	Módulo de rigidez del elemento discreto, en kPa.
E	Doble	Módulo de elasticidad del elemento discreto, en kPa
u	Doble	Relación de Poisson del elemento discreto, en tanto por uno.
I	Doble	Momento de inercia del elemento discreto, en mm*N*s ² .
Vx	Doble	Velocidad del elemento en dirección x, en mm/s.
Vy	Doble	Velocidad del elemento en dirección y, en mm/s
Ax	Doble	Aceleración del elemento en dirección x, en mm/s ² .
Ay	Doble	Aceleración del elemento en dirección y, en mm/s ² .
Fx	Doble	Fuerza aplicada sobre el elemento en dirección x, en N.
Fy	Doble	Fuerza aplicada sobre el elemento en dirección y, en N.
Aw	Doble	Aceleración angular del elemento discreto, en Rad/s ² . Positivo en el sentido anti horario.
Vw	Doble	Velocidad angular del elemento discreto, en Rad/s. Positivo en el sentido anti horario.
dw	Doble	Angulo de rotación del elemento, en Rad.
T	Doble	Momento actuante sobre el elemento discreto, en N*mm. Positivo en sentido anti horario.
Bloqueado	Buleano	Define si el elemento discreto está bloqueado durante el proceso de refinado de la discretización, para no ser considerado en el ciclo de trabajo.
NoCeldaUbicacion	Entero	Número de celda de ubicación del centro del elemento discreto para el algoritmo de búsqueda.
NoAleatorio	Doble	Número aleatorio asignado al elemento discreto para distribuir los elementos dentro del medio discretizado del espécimen.

Granulometría:

La estructura de datos denominada “*Granulometría*”, define las características de gradación del conjunto de elementos discretos que fueron generados para discretizar el espécimen de mezcla asfáltica simulado, de acuerdo al tipo de material definido por el usuario. Como referencias granulométricas, se tienen las bandas de control de los



diferentes tipos de mezclas asfálticas especificadas en el artículo 450-22 de las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras del Instituto Nacional de Vías.

Dada las características ingenieriles que representa esta estructura de datos, sus campos son fijos a lo largo de la respectiva simulación una vez el tipo de gradación es definida por el usuario. La Tabla 3-2 expone las características correspondientes de los campos asociados a esta estructura de datos.

Tabla 3-2. Características de la Estructura de datos definida para almacenar los parámetros granulométricos del material simulado.

Campo	Tipo de Variable	Descripción del Campo
RangoTamizSuperior	Cadena	Define el diámetro superior del tamiz, en texto.
RangoTamizInferior	Cadena	Define el diámetro inferior del tamiz, en texto.
DiametroPromedio	Doble	Diámetro promedio para el rango de tamiz evaluado, en mm
PorcentajeRetenido	Doble	Valor del porcentaje de retenido del rango del tamiz, %.
NumSalidalteracion	Entero	Número de iteraciones para la generación de elementos de cada tamiz durante el proceso de discretización del espécimen.
ContadorCirculosPorTamiz	Entero	Número de partículas simuladas para el rango de la gradación
AcumuladoAreaPorTamiz	Doble	Acumula el área de las partículas generadas por cada tamiz, en mm ² .
PorcentajePasa	Doble	Valor del porcentaje de pasa del rango del tamiz asociado, en %.
AreaTamizLimite	Doble	Valor teórico del área de los elementos discretos del tamiz respectivo.
Area_Unitaria_Partícula	Doble	Área de partículas requeridas según el % retenido del tamiz, en mm ² .
Area_Teorica_Tamiz	Doble	Área de partículas requeridas según el % retenido del tamiz, en mm ² .
No_Partículas_Reales	Entero	Número de partículas requeridas del tamiz respectivo según el % retenido.
No_Partículas_Equivalentes_Unitarias	Entero	Número de elementos discretos equivalentes para simular una partícula real de tamiz respectivo.
No_Partículas_Equivalentes_Totales	Entero	Número teórico total de elementos discretos necesarios para simular el área requerida del tamiz.
Area_Real_Simulada_Tamiz	Doble	Área total de elementos discretos simulados del tamiz, en mm ² .
No_Partículas_Equivalentes_Reales	Entero	Número total de elementos discretos simulados para el tamiz respectivo.

ContactosCirculos:



Esta estructura de datos de ámbito global denominada “*ContactosCirculos*”, define las características mecánicas de cada uno de los contactos posibles entre los elementos discretos que se traslaparan entre sí, para un instante dado durante el tiempo de la simulación. En consecuencia, los valores de los campos constitutivos de esta estructura de datos, son susceptibles de cambiar para cada escalón de carga, en la medida que el algoritmo actualiza los potenciales traslapos generados entre los elementos discretos que componen el espécimen numérico. La Tabla 3-3 relaciona las características correspondientes de los campos asociados a esta estructura de datos de los contactos entre las partículas de elementos discretos.

Tabla 3-3. Características de la Estructura de Datos definida para almacenar los parámetros de los contactos entre Elementos Discretos.

Campo	Tipo de Variable	Descripción del Campo
ValorTraslapo	Doble	Valor del traslapo entre las dos partículas en contacto, en mm.
Tipo_De_Contacto	Cadena	Define el tipo de contacto entre las partículas en contacto: Elástico, Viscoelástico, SemiViscoelástico.
Contacto_Adherido	Buleano	Define si el contacto es adherido.
NoCirculoInicial	Entero	Número del círculo inicial o elemento del contacto en análisis.
NoCirculoFinal	Entero	Número del círculo final o elemento del contacto en análisis.
Kmn	Doble	Parámetro Elástico del modelo Maxwell para el contacto entre agregados y mastic en dirección normal, N/mm.
Cmn	Doble	Parámetro Viscoso del modelo Maxwell para el contacto entre agregados y mastic en dirección normal.
Kkn	Doble	Parámetro Elástico del modelo Kelvin para el contacto entre agregados y mastic en dirección normal, N/mm.
Ckn	Doble	Parámetro Viscoso del modelo Kelvin para el contacto entre agregados y mastic en dirección normal.
Def_Kelvin_Anterior_Normal	Doble	Deformación del modelo Kelvin del ciclo de carga anterior en dirección normal, en mm.
ValorTraslapo_Anterior	Doble	Valor del traslapo entre las dos partículas en contacto para el ciclo anterior, en mm
Fuerza_Normal_Anterior	Doble	Fuerza normal del contacto para el ciclo anterior, en N.
Kmt	Doble	Parámetro Elástico del modelo Maxwell para el contacto entre agregados y mastic en dirección transversal, en N/mm.
Cmt	Doble	Parámetro viscoso del modelo Maxwell para el contacto entre agregados y mastic en dirección transversal.
Kkt	Doble	Parámetro Elástico del modelo Kelvin para el contacto entre agregados y mastic en dirección transversal.



Campo	Tipo de Variable	Descripción del Campo
Ckt	Doble	Parámetro viscoso del modelo Kelvin para el contacto entre agregados y mastic en dirección transversal.
Def_Kelvin_Anterior_Tangencial	Doble	Deformación del modelo Kelvin del ciclo de carga anterior en dirección tangencial, en mm.
Desplazamiento_Tangencial_Anterior	Doble	Valor del desplazamiento tangencial entre las dos partículas en contacto para el ciclo anterior, en mm
Fuerza_Tangencial_Anterior	Doble	Fuerza tangencial del contacto para el ciclo anterior, en N.
Kn	Doble	Rigidez normal del Contacto Elástico, en N/mm.
Gn	Doble	Módulo de Rigidez ponderado del Contacto elástico, en kPa.
Un	Doble	Relación de Poisson ponderado del Contacto elástico, en tanto por uno.
rn	Doble	Radio de Contacto elástico, en mm,
Fne	Doble	Fuerza Normal Elástica Resultante, en N.
mn	Doble	Masa reducida del contacto elástico, en kg.
cn	Doble	Coefficiente de amortiguamiento del contacto elástico, en N*s/mm.
Vrn	Doble	Velocidad relativa normal entre partículas del contacto elástico, en mm/s.
AnguloTeta	Doble	Angulo alineamiento normal entre las partículas en contacto, en Radianes.
Fnd	Doble	Fuerza normal de amortiguamiento del contacto elástico, en N.
Frn	Doble	Fuerza resultante normal del contacto elástico, en N.
Kt	Doble	Rigidez transversal del contacto elástico, en N/mm.
Vrt	Doble	Velocidad relativa tangencial entre partículas en contacto elástico, en mm/s.
ds	Doble	Desplazamiento relativo tangencial del contacto elástico, en mm.
Fte	Doble	Fuerza tangencial del contacto elástico, en N.
ct	Doble	Coefficiente de amortiguamiento transversal del contacto elástico, en N*s/mm.
Ftd	Doble	Fuerza viscosa de amortiguamiento del contacto elástico, en N
CoefFricc	Doble	Coefficiente de fricción entre materiales de las partículas en contacto, en tanto por uno.
Frt	Doble	Fuerza resultante transversal del contacto, en N.
Frt_anterior	Doble	Fuerza resultante transversal del ciclo anterior, en N.



Campo	Tipo de Variable	Descripción del Campo
FFFnmax	Doble	Fuerza máxima para el modelo de agrietamiento del contacto en dirección normal en N.
KKkno	Doble	Rigidez normal para el modelo de agrietamiento, en N/mm.
GGGno	Doble	Energía de rotura del contacto adherido en dirección normal, en N-mm.
dddon	Doble	Deformación elástica máxima normal para el modelo de agrietamiento, en mm.
dddnmax	Doble	Deformación de rotura normal para el modelo de agrietamiento, en mm.
FFFsmax	Doble	Fuerza máxima para el modelo de agrietamiento del contacto en dirección transversal, en N.
KKKso	Doble	Rigidez transversal para el modelo de agrietamiento, en N/mm.
GGGso	Doble	Energía de rotura del contacto adherido en dirección tangencial, en N-mm.
dddos	Doble	Deformación elástica máxima tangencial para el modelo de agrietamiento, en mm.
dddsmx	Doble	Deformación de rotura tangencial para el modelo de agrietamiento, en mm.
DDDDDD	Doble	Parámetro de degradación de rigidez del contacto [0-1], en tanto por uno.
_Traslapo_Base	Doble	Traslapo base del contacto para condición neutra de separación, en mm

Puntos Grietas:

Esta estructura de datos de ámbito global, caracteriza la plastificación y el rompimiento de los contactos iniciales adheridos y por ende, define el proceso de generación de microgrietas y grietas dentro del cuerpo del espécimen numérico. En consecuencia, el número de registros y los valores de los campos constitutivos de esta estructura de datos, se generan a medida que el espécimen de mezcla asfáltica se va deformando, tomándose como información base para la representación gráfica del agrietamiento y evolución de daño del testigo virtual del material. La Tabla 3-4, relaciona las características correspondientes de los campos asociados a esta estructura de datos.

Tabla 3-4. Características de la Estructura de Datos definida para almacenar los parámetros de grietas y microgrietas generadas en la simulación.

Campo	Tipo de Variable	Descripción del Campo.
No_Grieta	Entero	Número de microgrieta generada en el proceso de simulación.
No_Contacto	Entero	Número de contacto adherido asociado a la microgrieta generada.
Elemento_Inicial	Entero	Número de elemento inicial asociado al contacto adherido roto.



Campo	Tipo de Variable	Descripción del Campo.
Elemento_Final	Entero	Número de elemento final asociado al contacto adherido roto.

3.2.2 VECTORES Y MATRICES

Los arreglos vectoriales o los matriciales que fueron creados y definidos con ámbito de uso global, para el manejo y almacenamiento de toda la información requerida y generada por el algoritmo computacional implementado en el modelo numérico, son los descritos a continuación. Estos vectores y matrices, al igual que las estructuras de datos definidas, fueron declarados en el módulo de clase denominado “*Variables*”, tal como puede ser verificado en el [Anexo 03](#) – Código Fuente desarrollado en Visual Basic .NET, asociado al presente informe. La Tabla 3-5 relaciona las características correspondientes a los arreglos generados dentro del algoritmo del modelo computacional de la simulación.

Tabla 3-5. Características de los arreglos definidos para el almacenamiento y manejo de la información del aplicativo.

Vector o Matriz	Tipo de Variable	Descripción del Arreglo
Circulos(i)	Elementos	Vector de los elementos discretos de discretización del espécimen.
CirculosParedSup(i)	Elementos	Vector de los elementos discretos de representación de la placa superior de carga.
CirculosParedInf(i)	Elementos	Vector de los elementos discretos de representación de la placa inferior de carga.
Matriz_Elementos_Cercanos(i, j)	Entero	Matriz de almacenamiento del número de elementos más cercanos para cada elemento discreto del espécimen.
Matriz_Distancias_Cercanos(i, j)	Doble	Matriz de almacenamiento de las distancias de separación de los elementos más cercanos para cada elemento discreto del espécimen.
Matriz_Elementos_Cercanos_Placa_Sup(i, j)	Entero	Matriz de almacenamiento del número de elementos más cercanos para cada elemento discreto de la placa superior de carga.
Matriz_Distancias_Cercanos_Placa_Sup(i, j)	Doble	Matriz de almacenamiento de las distancias de separación de los elementos más cercanos para cada elemento discreto de la placa superior de carga.
Matriz_Elementos_Cercanos_Placa_Inf(i, j)	Entero	Matriz de almacenamiento del número de elementos más cercanos para cada elemento discreto de la placa inferior de carga.
Matriz_Distancias_Cercanos_Placa_Inf(i, j)	Doble	Matriz de almacenamiento de las distancias de separación de los elementos



Vector o Matriz	Tipo de Variable	Descripción del Arreglo
		más cercanos para cada elemento discreto de la placa inferior de carga.
Tamices(15)	Granulometría	Vector de características granulométricas de los tamices constitutivos del agregado.
Contactos_Iniciales_Entre_Circulos(i)	ContactosCirculos	Arreglo de datos de los contactos iniciales adheridos y generados entre los elementos discretos del espécimen.
Contactos_Potenciales_Entre_Circulos(i)	ContactosCirculos	Arreglo de datos de los contactos potenciales sin adherencia entre los elementos discretos del espécimen.
ContactosParedSuperior(i)	ContactosCirculos	Arreglo de almacenamiento de los contactos generados entre los elementos discretos del espécimen y de la placa de carga superior.
ContactosParedInferior(i)	ContactosCirculos	Arreglo de almacenamiento de los contactos generados entre los elementos discretos del espécimen y de la placa de carga inferior.
MatrizFte(i, j)	Doble	Matriz de almacenamiento de la fuerza tangencial normal consolidada para cada escalón de carga, en N.
Matriz_Output_MR(2, i)	Doble	Matriz de salida consolidada de los resultados de la simulación, 0 tiempo en s, 1 fuerza en N, 2 deformación diametral en mm.
Vector_Fisuras(i)	Puntos_Grietas	Vector de almacenamiento y manejo de los contactos que pierden adherencia generando las microgrietas dentro del espécimen.

3.2.3 VARIABLES

Las variables (y algunas constantes) de ámbito global que se consideran relevantes para el adecuado entendimiento del algoritmo en particular desarrollado, y que fueron establecidas para la ejecución de las sentencias alfanuméricas y graficas constitutivas en los módulos, funciones, procedimientos, formularios y demás componentes contemplados en el código fuente del aplicativo, son las descritas seguidamente en la Tabla 3-6.

Tabla 3-6. Relación y descripción de las variables simples principales de ámbito global definidas dentro del código fuente.

Nombre	Tipo	Descripción
Diametro	Doble	Diámetro inicial de la probeta, en mm.
Tipo_de_Mezcla	Cadena	Define el tipo de Mezcla asfáltica a simular: "Densa", "Semidensa", "Gruesa", "Drenante", "DiscontinuaF", "DiscontinuaM"
Densidad_de_Discretización	Cadena	Define la densidad de Discretización definida para la simulación del espécimen: "Media" - "Gruesa"



Nombre	Tipo	Descripción
NoCoordinacion	Doble	Asigna el número de Coordinación de la Simulación.
F_M_Dibujo	Doble	Factor numérico empleado para ajustar el dibujo de los elementos discretos a una escala apropiada.
Pi	Constante Doble	Numero Pi (3.1415926).
Radio_Elemento_Discreto_Tipo	Doble	Radio del elemento discreto definido según la densidad de discretización y el tamaño de la muestra definida por el usuario, en mm.
Radio_Elemento_Placa_Tipo	Doble	Radio del elemento discreto de las placas de carga, en mm.
Area_Elemento_Discreto_Tipo	Doble	Área unitaria del elemento discreto del espécimen, definido según la densidad de discretización y el tamaño de la muestra, en mm ² .
Porc_Inicial_Vacios	Doble	Porcentaje inicial de los vacíos del espécimen generados durante la construcción de la discretización, en %.
Porc_Teorico_Vacios	Doble	Porcentaje teórico de vacíos del espécimen definido según el tipo de mezcla seleccionado, en %.
Porc_Teorico_Efectivo_Vacios	Doble	Porcentaje de vacíos que serán obtenidos por la eliminación de elementos del vector de elementos discretos, en %.
Area_Teorica_Especimen	Doble	Área Bruta del espécimen, en mm ² .
Area_Gravas	Doble	Área teórica de elementos discretos que caracterizan partículas de tamaño grava, en mm ² .
Area_Arenas	Doble	Área teórica de elementos discretos que caracterizan partículas de tamaño arena simulada, en mm ² .
Area_Mastic	Doble	Área teórica de elementos discretos que caracterizan partículas de mastic asfáltico, en mm ² .
Vacios_Iniciales	Doble	Área de vacíos Iniciales del espécimen obtenidos de la discretización del espécimen.
PrimerTamizRetenido	Entero	Número del tamiz donde se presenta el primer retenido, de acuerdo con la gradación seleccionada del material.
ContadorCirculos	Doble	Número total de elementos discretos dentro del espécimen, generados en la simulación.
No_Contactos_Iniciales_Entre_Circulos	Entero	Número de contactos iniciales generados entre los elementos discretos del espécimen.
Numero_Contactos_Ahderidos	Entero	Número de contactos iniciales adheridos generados entre los elementos discretos del espécimen.



Nombre	Tipo	Descripción
Numero_Contactos_No_Adheridos	Entero	Número de contactos iniciales no adheridos generados entre los elementos discretos del espécimen y las placas de carga.
Numero_Contactos_Viscoelásticos	Entero	Número de contactos iniciales viscoelásticos (mastic/mastic) generados entre los elementos discretos del espécimen.
Numero_Contactos_Semiviscoelásticos	Entero	Número de contactos semiviscoelásticos (mastic/agregado o mastic/placa) generados entre los elementos discretos del espécimen.
Numero_Contactos_Elasticos	Entero	Número de contactos elásticos (agregado/agregado o agregado/placa) generados entre los elementos discretos del espécimen.
No_Contactos_Potenciales_Entre_Circulos	Entero	Número de contactos potenciales no adheridos de cada elemento discreto del espécimen.
NoContactosParedSuperior	Entero	Número de contactos generados entre los elementos discretos del espécimen y los de la placa de carga superior.
NoContactosParedInferior	Entero	Número de contactos generados entre los elementos discretos del espécimen y los de la placa de carga inferior.
dt_simulacion	Doble	Escalón de tiempo calculado para adelantar la simulación, en s.
Tiempo_de_Simulacion	Doble	Consecutivo de tiempo para la simulación, en s.
Nociclo	Entero	Número de iteraciones que se ejecutan durante la simulación.
Velocidad_Deformacion_CR	Doble	Almacena la velocidad de deformación de las placas de carga para la simulación, en mm/s.
Fuerza_Transmitida_Placa_Superior	Doble	Fuerza unitaria transmitida por la placa de carga superior sobre el espécimen en cada instante de la simulación, en N.
Fuerza_Transmitida_Placa_Inferior	Doble	Fuerza unitaria transmitida por la placa de carga inferior sobre el espécimen en cada instante de la simulación, en N.
Fuerza_Transmitida_Resultante	Doble	Fuerza resultante (promedio) unitaria transmitida por las placas de carga sobre el espécimen en cada instante de la simulación, en N.
Fuerza_Transmitida_Maxima	Doble	Fuerza resultante unitaria máxima transmitida por las placas de carga sobre el espécimen, en N.
Deformacion_para_Fuerza_Maxima	Doble	Deformación asociada a la fuerza unitaria máxima transmitida sobre el espécimen, en mm.
Factor_velocidad_Placa_Superior	Doble	Factor numérico empleado para acelerar los desplazamientos de los elementos de la



Nombre	Tipo	Descripción
		placa superior, para generar el acoplamiento con el espécimen.
Factor_velocidad_Placa_Inferior	Doble	Factor numérico empleado para acelerar los desplazamientos de los elementos de la placa inferior, para generar el acoplamiento con el espécimen.
FACTOR_Aceleracion_Simulacion	Entero	Factor que incrementa la velocidad de desplazamiento de los elementos discretos de las placas para acelerar la simulación.
Limite_Superior_Eje_X	Doble	Límite superior de la escala del eje x de la gráfica de visualización de fuerza vs deformación, en mm.
Limite_Superior_Eje_y	Doble	Límite superior de la escala del eje y de la gráfica de visualización de fuerza vs deformación, en N.
RTI	Doble	Resistencia a la tensión indirecta del espécimen, en kPa.
N_Adquisicion	Entero	Número de iteraciones para empleada para las adquisiciones de salida. Su magnitud está en función de la velocidad de la simulación.
Longitud_I	Doble	Diámetro inicial del espécimen, en mm.
Diametro_I	Doble	Diámetro instantáneo del espécimen, en mm.
DeformacLongitudinal_Instantanea	Doble	Deformación longitudinal instantánea del espécimen (función de la altura de las partículas menos su radio), en mm.
DeformLongUnitaria_Instantanea	Doble	Deformación unitaria longitudinal instantánea del espécimen, en %.
TraslapoMaximo	Doble	Valor del máximo traslapo a compresión entre elementos discretos obtenido en cada escalón de tiempo, en mm.
TraslapoMaximoAbsoluto	Doble	Valor del máximo traslapo a compresión entre elementos discretos obtenido en toda la simulación, en mm.
Traslapo_Maximo_Tension	Doble	Valor del máximo traslapo a tensión entre elementos discretos adheridos obtenido en cada escalón de tiempo, en mm.
Traslapo_Maximo_Absoluto_Tension	Doble	Valor del máximo traslapo a tensión entre elementos discretos adherido obtenido en toda la simulación, en mm.
Dezplazaminto_Transversal_Maximo_Tension	Doble	Valor del máximo desplazamiento transversal en tensión entre elementos discretos adheridos obtenido en cada escalón de tiempo, en mm.
Dezplazaminto_Transversal_Maximo_Absoluto_Tension	Doble	Valor del máximo desplazamiento transversal en tensión entre elementos discretos adheridos obtenido en toda la simulación, en mm.



Nombre	Tipo	Descripción
Coef_Acero_Granular	Doble	Coefficiente de fricción de contacto entre elementos discretos de acero y granular, en tanto por uno.
Coef_Granular_Granular	Doble	Coefficiente de fricción de contacto entre elementos discretos de granular, en tanto por uno.
Coef_Granular_Mastic	Doble	Coefficiente de fricción de contacto entre elementos discretos de mastic y granular, en tanto por uno.
Coef_Mastic_Mastic	Doble	Coefficiente de fricción de contacto entre elementos discretos de mastic, en tanto por uno.
Coef_Mastic_Acero	Doble	Coefficiente de fricción de contacto entre elementos discretos de mastic y acero, en tanto por uno.
Porcentaje_Asfalto	Doble	Porcentaje de asfalto en la mezcla asfáltica por peso, en %.
U_Mastic	Doble	Relación de Poisson del mastic, en tanto por uno.
E_Mastic	Doble	Módulo de elasticidad del mastic, en kPa.
G_Mastic	Doble	Módulo de rigidez del mastic, en kPa
D_Mastic	Doble	Densidad del mastic, en kg/m ³ .
D_Asfalto	Doble	Densidad del asfalto, en kg/m ³ .
Penetracion_Asfalto	Doble	Penetración del asfalto, en mm/10.
E1	Doble	Constante elástica del modelo Maxwell para el mastic, en kPa.
n1	Doble	Constante viscosa del modelo Maxwell para el mastic, en kPa-s.
E2	Doble	Constante elástica del modelo Kelvin para el mastic, en kPa.
n2	Doble	Constante viscosa del modelo Kelvin para el mastic, en kPa-s.
E_Acero	Doble	Módulo de elasticidad del acero para las placas de carga, en kPa.
G_Acero	Doble	Módulo de rigidez del acero para las placas de carga, en kPa
U_Acero	Doble	Relación de Poisson del acero para las placas de carga, en tanto por uno.
D_Acero	Doble	Densidad del acero para las placas de carga, en kg/m ³ .
E_Granular	Doble	Módulo de elasticidad del agregado mineral, en kPa.
G_Granular	Doble	Módulo de rigidez del agregado mineral, en kPa.
U_Granular	Doble	Relación de Poisson del agregado mineral, en tanto por uno.
D_Granular	Doble	Densidad del agregado mineral, en kg/m ³ .
Snmax_I	Doble	Esfuerzo normal máximo de la interface para el modelo de agrietamiento, en kPa.
Ssmax_I	Doble	Esfuerzo tangencial máximo de la interface para el modelo de agrietamiento, en kPa.



Nombre	Tipo	Descripción
Kno_I	Doble	Rigidez normal de la Interface para el modelo de agrietamiento, en kPa/mm.
Kso_I	Doble	Rigidez tangencial de la Interface para el modelo de agrietamiento, en kPa/mm.
Gnf_I	Doble	Energía de fractura normal de la Interface, en kPa-mm.
Gsf_I	Doble	Energía de fractura tangencial de la Interface, en kPa-mm.
Snmax_G	Doble	Esfuerzo normal máximo del agregado mineral para el modelo de agrietamiento, en kPa.
Ssmax_G	Doble	Esfuerzo tangencial máximo del agregado mineral para el modelo de agrietamiento, en kPa.
Kno_G	Doble	Rigidez normal del agregado mineral para el modelo de agrietamiento, en kPa/mm.
Kso_G	Doble	Rigidez tangencial del agregado mineral para el modelo de agrietamiento, en kPa/mm.
Gnf_G	Doble	Energía de fractura normal del agregado mineral, en kPa-mm.
Gsf_G	Doble	Energía de fractura tangencial del agregado mineral, en kPa-mm.
Alpha	Doble	Fracción del amortiguamiento crítico asumido para el cálculo del coeficiente de amortiguamiento del contacto (c_n) del modelo de Hertz.
ContadorParaRefrecarPictureBox	Entero	Contador empleado para refrescar y actualizar el control de dibujo principal del formulario.
ContadorDatosMatrizSalida	Entero	Contador del número de datos guardados en la matriz de salida de la simulación.
Contador_para_búsqueda_Contactos_Placa	Entero	Contador proyectado dentro del control Timer para actualizar los contactos de los elementos discretos de las placas de carga.
NoInteraccionesSalida	Entero	Número de iteraciones necesarias para guardar la información en la matriz de salida.
Contador_Fisuras	Entero	Contador del número de microfisuras generadas durante la simulación
F_Part_Max	Doble	Fuerza máxima soportada por los elementos discretos durante la simulación, en N.
Vres_Part_Max	Doble	Velocidad resultante máxima soportada por los elementos discretos durante la simulación, en N.
Acumulador_Fuerza_Resultante_Promedio	Doble	Acumulador de las fuerzas soportadas por los elementos discretos durante cada escalón de tiempo de la simulación, en N.
FEcha_Inicio	Cadena	Almacena la fecha y hora de inicio de la simulación, según información del sistema.



Nombre	Tipo	Descripción
Descripción	Cadena	Variable que almacena las características de descripción del material y del ensayo simulado, ingresado por el usuario.

3.3 MÓDULOS, FUNCIONES Y PROCEDIMIENTOS CONSTITUTIVOS DEL MODELO

Los procedimientos y las funciones alfanuméricas proyectadas para la ejecución de las diferentes tareas gráficas, lógicas y numéricas empleadas en el desarrollo del modelo computacional asociado a la simulación del fenómeno físico representado en el presente trabajo de grado, fueron consignados en los diferentes módulos de código fuente constitutivos de la aplicación y dispuestos en el [Anexo 03](#). Bajo este contexto y con el objetivo fundamental de hacer fácilmente entendible la estructura del algoritmo desarrollado, a continuación, se procede a relacionar y describir concretamente las características operativas de las funciones o procedimientos considerados dentro de cada módulo de código que compone la aplicación.

Tabla 3-7. Descripción de procedimientos y funciones generados dentro de cada módulo de código fuente.

Nombre del Módulo	Función o Procedimiento	Descripción del Campo.
DibujoParticulas	Dibujar_Circulos	Procedimiento que dibuja el perímetro de los elementos discretos dentro del contenedor gráfico según su distribución de tamaño.
	Dibujar_Circulos_Velocidad	Procedimiento que dibuja el perímetro de los elementos discretos según el valor de la resultante de su velocidad.
	Dibujar_Circulos_Velocidad_Rotacional	Procedimiento que dibuja el perímetro de los elementos discretos según el valor de la resultante de su velocidad rotacional.
	Dibujar_Circulos_Monocromatico	Procedimiento que dibuja el perímetro de los elementos discretos del espécimen del mismo color.
	Dibujar_Circulos_Material	Procedimiento que dibuja el perímetro de los elementos discretos del espécimen según el material constitutivo del mismo.
	Control_Dibujo_Partículas	Procedimiento que grafica los elementos del dibujo simulados según la condición seleccionada por el usuario.
	Dibujar_Lineas_de_contacto_Iniciales	Procedimiento que dibuja líneas entre los elementos discretos del espécimen que se encuentran en contacto.
	Dibujar_Lineas_de_contacto_Potenciales	Procedimiento que dibuja líneas entre los elementos discretos del espécimen potencial de contacto.
Procedimientos_Dibujo	CoordXDibujo	Función que determina la coordenada X de dibujo en función del tamaño de la muestra a simular.



Nombre del Módulo	Función o Procedimiento	Descripción del Campo.
	CoordYDibujo	Función que determina la coordenada Y de dibujo en función del tamaño de la muestra a simular.
	Dibujo_Grilla	Procedimiento que dibuja la grilla de coordenadas definida dentro del control gráfico.
	Dibujar_Borde_Muestra	Procedimiento que dibuja el borde exterior de la muestra en condición inicial dentro del control gráfico.
	Dibujar_Elementos_de_Contorno	Procedimiento que dibuja los elementos discretos asociados a las placas de carga en condición instantánea.
	Dibujar_Elementos_de_Contorno_Basico	Procedimiento que dibuja los elementos discretos asociados a las placas de carga en condición inicial de la simulación.
	Dibujo_Lineas_de_Celda	Procedimiento que dibuja las líneas de subdivisión de celda empleadas en el proceso de búsqueda de contactos y vecinos de los elementos discretos del espécimen.
	Control_de_Dibujo	Procedimiento que dibuja los parámetros gráficos definidos por el usuario.
	Dibujar_Lineas_De_Contacto_Circulos	Procedimiento que dibuja las líneas del contacto entre elementos.
	Dibujar_ServoMuro	Procedimiento que dibuja la cadena de elementos discretos idealizada como polígono de placa de carga.
	Dibujar_Mapa_Fuerza_Resultante	Procedimiento que dibuja los elementos discretos del espécimen como mapa de fuerza resultante actuante sobre cada partícula.
	Dibujar_Mapa_Velocidad_Vertical	Procedimiento que dibuja los elementos discretos del espécimen como mapa de velocidad vertical actuante sobre cada partícula.
	Dibujar_Mapa_Velocidad_REsultante	Procedimiento que dibuja los elementos discretos del espécimen como mapa de velocidad resultante actuante sobre cada partícula.
	Dibujar_De_Traslapes_Contactos	Procedimiento que dibuja esquemáticamente los traslapes entre especímenes como mapa de traslapes actuante sobre cada partícula.
Algoritmo_Búsqueda	_1_Procedimiento_Asigna_Celda_a_Elemento	Procedimiento que asigna a cada elemento discreto dentro del espécimen, el número de celda de búsqueda asociada.
FormulasMecanicas	Rigidez_De_Contacto	Función que calcula la rigidez de contacto normal elástico entre 2 partículas traslapadas a compresión, en N/mm.
	Rigidez_De_Contacto_Transversal	Función que calcula la rigidez de contacto transversal elástico entre 2 partículas traslapadas a compresión, en N/mm.



Nombre del Módulo	Función o Procedimiento	Descripción del Campo.
	Calculo_Escalon_Critico	Procedimiento que calcula el escalón de tiempo crítico empleado para la simulación, de acuerdo con todos los criterios de definición evaluados, en s.
	Definicion_COeficiente_Friccion_Contacto	Función que define el coeficiente de fricción para el contacto entre dos partículas adyacentes, según los tipos de materiales constitutivos.
Fuerza_Contactos	Kmn_Visco	Función que calcula el parámetro elástico normal del modelo Maxwell para contacto viscoelástico entre las partículas i, j, en N/mm.
	Cmn_Visco	Función que calcula el parámetro viscoso normal del modelo Maxwell para contacto viscoelástico entre las partículas i, j, en N/mm -s.
	Kkn_Visco	Función que calcula el parámetro elástico normal del modelo Kelvin para contacto viscoelástico entre las partículas i, j, en N/mm.
	Ckn_Visco	Función que calcula el parámetro viscoso normal del modelo Kelvin para contacto viscoelástico entre las partículas i, j, en N/mm -s.
	Kmt_Visco	Función que calcula el parámetro elástico transversal del modelo Maxwell para contacto viscoelástico entre las partículas i, j, en N/mm.
	Cmt_Visco	Función que calcula el parámetro viscoso transversal del modelo Maxwell para contacto viscoelástico entre las partículas i, j, en N/mm -s.
	Kkt_Visco	Función que calcula el parámetro elástico transversal del modelo Kelvin para contacto viscoelástico entre las partículas i, j, en N/mm.
	Ckt_Visco	Función que calcula el parámetro viscoso transversal del modelo Kelvin para contacto viscoelástico entre las partículas i, j, en N/mm -s.
	Kmn_Semi	Función que calcula el parámetro elástico normal del modelo Maxwell para contacto semiviscoelástico entre las partículas i, j, en N/mm.
	Cmn_Semi	Función que calcula el parámetro viscoso normal del modelo Maxwell para contacto semiviscoelástico entre las partículas i, j, en N/mm -s.
	Kkn_Semi	Función que calcula el parámetro elástico normal del modelo Kelvin para contacto



Nombre del Módulo	Función o Procedimiento	Descripción del Campo.
		semiviscoelástico entre las partículas i, j, en N/mm.
	Ckn_Semi	Función que calcula el parámetro viscoso normal del modelo Kelvin para contacto semiviscoelástico entre las partículas i, j, en N/mm -s.
	Kmt_Semi	Función que calcula el parámetro elástico transversal del modelo Maxwell para contacto semiviscoelástico entre las partículas i, j, en N/mm.
	Cmt_Semi	Función que calcula el parámetro viscoso transversal del modelo Maxwell para contacto viscoelástico entre las partículas i, j, en N/mm -s.
	Kkt_Semi	Función que calcula el parámetro elástico transversal del modelo Kelvin para contacto semiviscoelástico entre las partículas i, j, en N/mm.
	Ckt_Semi	Función que calcula el parámetro viscoso transversal del modelo Kelvin para contacto semiviscoelástico entre las partículas i, j, en N/mm -s.
	Calculo_Fuerzas_Compresión_entre_Circulos_Contacto_Elastico	Procedimiento que calcula las fuerzas por compresión entre dos elementos discretos constitutivos de un contacto elástico.
	Calculo_Fuerzas_Compresión_entre_Circulos_Contacto_Viscoelastico	Procedimiento que calcula las fuerzas por compresión entre dos elementos discretos constitutivos de un contacto viscoelástico.
	Calculo_Fuerzas_Compresión_entre_Circulos_Contacto_SemiViscoelastico	Procedimiento que calcula las fuerzas por compresión entre dos elementos discretos constitutivos de un contacto semiviscoelástico.
	Calculo_Fuerzas_Compresión_Placa_Superior_Contacto_Elastico	Procedimiento que calcula las fuerzas por compresión generados con elementos discretos constitutivos de la placa de carga superior, para contacto elástico.
	Calculo_Fuerzas_Compresión_Placa_Inferior_Contacto_Elastico	Procedimiento que calcula las fuerzas por compresión generados con elementos discretos constitutivos de la placa de carga inferior, para contacto elástico.
	Calculo_Fuerzas_Compresión_Placa_Superior_Contacto_SemiViscoelastico	Procedimiento que calcula las fuerzas por compresión generados con elementos discretos constitutivos de la placa de carga superior, para contacto semiviscoelástico.
	Calculo_Fuerzas_Compresión_Placa_Inferior_Contacto_SemiViscoelastico	Procedimiento que calcula las fuerzas por compresión generados con elementos discretos constitutivos de la placa de carga inferior, para contacto semiviscoelástico.



Nombre del Módulo	Función o Procedimiento	Descripción del Campo.
	Calculo_Fuerzas_Tension_entre_Circuitos_Contacto	Procedimiento que calcula las fuerzas resultantes a tensión para elementos discretos adheridos de la misma partícula de agregado.
	Calculo_Fuerzas_Compresion_entre_Circuitos_Contacto_Elastico_Potencial	Procedimiento que calcula las fuerzas por compresión generados en contactos (potenciales) con elementos discretos definidos en la matriz de vecinos, contacto tipo elástico.
	Calculo_Fuerzas_Compresion_entre_Circuitos_Contacto_Viscoelastico_Potencial	Procedimiento que calcula las fuerzas por compresión generados en contactos (potenciales) con elementos discretos definidos en la matriz de vecinos, contacto tipo viscoelástico.
	Calculo_Fuerzas_Compresion_entre_Circuitos_Contacto_SemiViscoelastico_Potencial	Procedimiento que calcula las fuerzas por compresión generados en contactos (potenciales) con elementos discretos definidos en la matriz de vecinos, contacto tipo semiviscoelástico.
FuncionesDeGeneración	Diametro_Particulas_Teorico	Función que define el radio para el elemento discreto i de acuerdo con la distribución granulométrica asociada a la mezcla asfáltica, en mm.
	Generacion_Discretizacion_Especimen	Procedimiento que define la distribución estructurada del espécimen, según las condiciones de densidad de discretización y tamaño de la muestra, definidas por el usuario.
	Generación_Elementos_de_Contorno	Procedimiento que define la distribución estructurada de los elementos de contorno, según el tamaño de la muestra definida por el usuario.
FuncionesGEometricas	FuncionAreaDeElementoCircular	Función que calcula el área de un elemento discreto circular, en mm ² .
	FuncionTraslapoEntreCirculo	Función que calcula el traslape entre dos elementos discretos en contacto, en mm
	Teta	Función que calcula el ángulo de pendiente entre dos partículas en contacto, en radianes.
	Calculo_Deformacion_Diametral_Especimen	Procedimiento que calcula la deformación diametral del espécimen, en mm.
FrmDiscretización (Clase Pública)	TimerSimulación_Tick	Procedimiento que ejecuta la simulación del ensayo durante cada escalón de tiempo para el espécimen discretizado. Incluye actualización de posición de los elementos discretos de las placas de cargas, la actualización de los traslapes de los contactos y generación de microgrietas, cálculos de fuerzas para cada partícula, actualización de la cinemática de las partículas, actualización gráfica de la



Nombre del Módulo	Función o Procedimiento	Descripción del Campo.
		interface y el almacenamiento e impresión de la información instantánea de la simulación y sus cálculos finales. Tiene instrucciones de código para dibujar el espécimen en condición inicial y en condición deformada, incluyendo los contactos plastificados, contactos rotos y las grietas generadas.
	DiscretizarToolStrip MenuItem_Click	Procedimiento que ejecuta la discretización estructurada del espécimen, de acuerdo con las condiciones geométricas del espécimen y granulométricas del material asfáltico, definidos para la simulación por parte del usuario.
	ExportarArchivoDe ResultadosToolStri pMenuItem_Click	Procedimiento que genera y exporta el archivo plano (*.txt) de los resultados de la simulación del ensayo de Tracción Indirecta.
	ExportarArchivoED ACADToolStripMen uItem_Click	Procedimiento que exporta archivo plano (*.txt) de los elementos discretos generados para exportar y dibujar en Autocad (comandos en inglés).
	BusquedaDeConta ctosHebrasToolStri pMenuItem_Click	Procedimiento de programación con hebras, que obtiene la matriz de búsqueda de los elementos discretos del espécimen y de las placas de carga (matriz de vecinos). Para realizar su ejecución, se llaman los procedimientos auxiliares: Busqueda_Inicial, Busqueda_Central, Busqueda_Central_2, Busqueda_Final y Busqueda_Placa.
	BusquedaDeConta ctosHebrasToolStri pMenuItem1_Click	Procedimiento de programación con hebras, que obtiene los contactos iniciales para los elementos discretos del espécimen (contactos adheridos) y los contactos potenciales, además de los contactos iniciales no adheridos para los elementos discretos de las placas de carga. Para realizar su ejecución, se llaman los procedimientos auxiliares: Busqueda_Contactos_Hebra_1_Circulos y Busqueda_Contactos_Hebra_Placa.
	GranulométricaTool StripMenuItem_Clic k	Procedimiento que dibuja el espécimen de acuerdo con la distribución granulométrica asociada a la discretización.

3.4 REFERENCIAS DE LOS PARÁMETROS MECÁNICOS DE ENTRADA PARA EL MODELO.

Como una ayuda para simplificar el empleo del software asociado y para facilitar el entendimiento del modelo computacional implementado, especialmente para los usuarios que no tengan conocimiento del soporte teórico avanzado descrito en este



informe, la Tabla 3-8 presenta un compendio informativo de referencia para los diversos parámetros mecánicos de entrada asociados a los diferentes materiales y modelos de comportamiento, necesarios para poder adelantar las diferentes simulaciones del ensayo de tracción indirecta.

Tabla 3-8. Información técnica general y valores de referencia para los principales parámetros mecánicos de entrada del modelo computacional implementado.

Símbolo ----- Nombre	Definición	Obtención	Valores Recomendados ----- [Rango Tipo]
E_1 ----- Constante elástica de Maxwell.	Módulo elástico del modelo Maxwell constitutivo del modelo viscoelástico de Burgers, para las condiciones de temperatura y nivel de esfuerzos de referencia del mastic asfáltico.	La estimación de los parámetros viscoelásticos del modelo combinado de Burgers, se hace a partir del ajuste numérico de los resultados de ensayos de capacitancia de fluencia (<i>Creep Compliance</i>) efectuados sobre especímenes del mastic asfáltico en laboratorio, para las condiciones de servicio definidas. La prueba de capacitancia de fluencia sobre materiales asfálticos se ejecuta mediante la aplicación de un esfuerzo constante sobre el espécimen a lo largo del tiempo, registrando las deformaciones del elemento (Papagiannakis & Masad, 2008). El procedimiento de ensayo es estandarizado según la norma AASHTO T-322.	300 000 kPa. ----- Rango Tipo [100 000 – 800 000] kPa Según tipo de asfalto, mezcla y condiciones de servicio.
n_1 ----- Constante viscosa de Maxwell.	Módulo viscoso del modelo Maxwell constitutivo del modelo viscoelástico de Burgers, para las condiciones de la temperatura y nivel de esfuerzos de referencia del mastic asfáltico.		800 kPa-s ----- Rango Tipo [200 – 2 000] kPa-s En función del tipo y rigidez del asfalto y las condiciones de servicio.
E_2 ----- Constante elástica de Kelvin voigt.	Módulo elástico del modelo Kelvin constitutivo del modelo viscoelástico de Burgers, para las condiciones de la temperatura y de nivel de esfuerzos de referencia, del mastic asfáltico.		40 000 kPa. ----- Rango Tipo [10 000–120 000] kPa En función del tipo y rigidez del asfalto, mezcla y condiciones de servicio.
n_2 ----- Constante viscosa de Kelvin Voigt	Módulo viscoso del modelo Kelvin Voigt constitutivo del modelo viscoelástico de Burgers, para las condiciones de la temperatura y nivel de esfuerzos de referencia del mastic asfáltico.		20 kPa-s ----- Rango Tipo [5 – 100] kPa-s En función del tipo y la rigidez del asfalto y las condiciones de servicio.
E_{granular} ----- Módulo Elástico del Granular	Parámetro elástico que caracteriza el comportamiento de esfuerzo - deformación y por tanto la rigidez a compresión del material granular.	A partir de ensayos de compresión uniaxial de especímenes de la matriz de roca madre del agregado, a partir de mediciones indirectas o por correlaciones disponibles en la literatura especializada para diferentes tipos de roca, su composición química y nivel de meteorización (Alejano Monge. & Ramírez Oyanguren, 2004).	80 *10 ⁶ kPa Roca Diabasa sana. ----- Rango Tipo [8-100] *10 ⁶ kPa
μ_{granular} ----- Relación de Poisson del Granular	Parámetro elástico que relaciona las deformaciones transversales y las axiales del material granular sometido ante un esfuerzo dado.		0.18 Roca Diabasa sana. ----- Rango Tipo [0.07 – 0.25]
Densidad Granular ----- Densidad natural del Granular	Relación entre la masa de una partícula de agregado y el volumen de la partícula correspondiente.	A través de la ejecución de mediciones gravimétricas y volumétricas de la matriz de roca madre del agregado, mediciones indirectas o a partir de correlaciones disponibles en la literatura	2 780 kg/ m ³ Roca Diabasa sana. ----- Rango Tipo [1 300 – 3 000] kg/m ³



Símbolo ----- Nombre	Definición	Obtención	Valores Recomendados ----- [Rango Tipo]
		especializada para los tipos de roca y de acuerdo a su composición mineralógica (Alejano Monge. & Ramírez Oyanguren, 2004).	
E_{Placa} ----- Módulo Elástico de la Placa de Carga (Acero).	Parámetro elástico que caracteriza el comportamiento esfuerzo deformación y por tanto la rigidez del material constitutivo de las placas de carga (acero).	Con la ejecución de ensayos de tracción uniaxial de elementos de acero, mediciones indirectas o a partir de correlaciones disponibles en la literatura especializada para los diferentes tipos de aleaciones (<i>The Engineering ToolBox</i> , 2001).	205 *10 ⁶ kPa ----- Rango Tipo [180 - 220] *10 ⁶ kPa
μ_{Placa} ----- Módulo de Poisson del material de Placa de Carga (Acero).	Parámetro elástico que relaciona las deformaciones transversales y las axiales del material constitutivo de las placas de carga (acero).		0.28 ----- Rango Tipo [0.25 – 0.32]
Densidad ρ_{Placa} ----- Densidad del material de Placa de Carga (Acero).	Relación entre la masa del material y el volumen correspondiente.	A partir de la ejecución de ensayos gravimétricos y volumétricos del acero, mediciones indirectas o a partir de correlaciones disponibles en la literatura especializada para las diferentes aleaciones.	7 900 kg/ m ³ ----- Rango Tipo [7 800 – 8 100] kg/ m ³
Densidad $\rho_{Asfalto}$ ----- Densidad del Cemento Asfáltico	Relación entre la masa del asfalto y el volumen correspondiente. Para el cemento asfáltico esta propiedad es dependiente de su composición química y de la temperatura del material.	Por medio de la medición de parámetros volumétricos y gravimétricos del material en el laboratorio, para condiciones controladas de temperatura.	1 010 kg/ m ³ ----- Rango Tipo [920 a 1 030] kg/ m ³
Penetración ----- Penetración del Cemento Asfáltico	Parámetro que correlaciona de forma indirecta la consistencia y dureza de un cemento asfáltico, siendo dependiente del tipo y composición química del mismo.	A partir de la medición directa de la penetración en el laboratorio, en condiciones controladas de temperatura del material.	65.0 mm/10 ----- Rango Tipo [15 a 100] mm/10
S_{nmax} Interface ----- Esfuerzo máximo normal de la interface	Resistencia máxima de cohesión del contacto en sentido normal del modelo de agrietamiento para la interface mastic / agregado.	Por medio de la ejecución sobre especímenes de mezcla asfáltica, de ensayos de Flexión de probeta Semicircular (SCB), Tensión compacta de forma de disco (DC), Disco Brasilero (BD) o Viga Agrietada de un Solo Borde (SENB), para condición de modo de falla I (modo de apertura donde la fisura se abre perpendicular al plano de la misma, siendo causado por tensión o flexión).	1 600 kPa ----- Rango Tipo [500 a 8 000] kPa Según tipo de asfalto y condiciones de servicio.
K_{no} Interface ----- Rigidez normal a tensión de la interface.	Relación entre el esfuerzo y la deformación en sentido normal en el rango de comportamiento elástico del modelo de agrietamiento para la interface mastic / agregado.		4 000 kPa/mm ----- Rango Tipo [2 000 a 15 000] kPa/mm Según tipo de asfalto y condiciones de servicio.
G_n Interface ----- Energía de fractura	Parámetro de energía de fractura normal del modelo de agrietamiento para la interface mastic/agregado.		440 kPa-mm ----- Rango Tipo [200 a 2 000] kPa-mm



Símbolo ----- Nombre	Definición	Obtención	Valores Recomendados ----- [Rango Tipo]
normal de la interface.			Según tipo de asfalto y condiciones de servicio.
Ss max Interface ----- Esfuerzo máximo transversal de la interface	Resistencia máxima de cohesión del contacto en sentido transversal del modelo de agrietamiento para la interface mastic / agregado.	A través de la ejecución sobre especímenes de mezcla asfáltica, de ensayos de Flexión de probeta Semicircular (SCB), Tensión compacta de forma de disco (DC), Disco Brasileiro (BD) o Viga Agrietada de un Solo Borde (SENB), para condición de modo de falla II (modo de deslizamiento en el plano, donde las caras de la fisura se desplazan en sentido perpendicular al frente de la grieta en su plano.	800 kPa ----- Rango Tipo [200 a 4 000] kPa Según tipo de asfalto y condiciones de servicio.
Kso Interface ----- Rigidez transversal a tensión de la interface.	Relación entre el esfuerzo y la deformación en sentido transversal en el rango de comportamiento elástico del modelo de agrietamiento para la interface mastic / agregado.		2 000 kPa/mm ----- Rango Tipo [500 a 8 000] kPa/mm Según tipo de asfalto y condiciones de servicio.
Gs Interface ----- Energía de fractura transversal de la interface.	Parámetro de energía de fractura transversal del modelo de agrietamiento para la interface mastic/agregado.		220 kPa-mm ----- Rango Tipo [100 a 1 000] kPa-mm Según tipo de asfalto y condiciones de servicio.
Sn max Agregado ----- Esfuerzo máximo normal interno de la matriz de roca del agregado.	Resistencia máxima de cohesión del contacto en sentido normal del modelo de agrietamiento interno para la matriz de la roca del agregado.	Con la ejecución sobre especímenes de la matriz de roca madre del agregado, de ensayos de Flexión de probeta Semicircular (SCB), Tensión compacta de forma de disco (DC), Disco Brasileiro (BD), viga en voladizo o Viga Agrietada de un Solo Borde (SENB), para condición de modo de falla I (modo de apertura donde la fisura se abre perpendicular al plano de la misma, siendo causado por tensión o flexión).	6 000 kPa ----- Rango Tipo [4 000 a 20 000] kPa Según tipo de roca matriz, dureza y mineralogía.
Kno Agregado ----- Rigidez normal a tensión de la matriz de roca del agregado	Relación entre el esfuerzo y la deformación en sentido normal en el rango de comportamiento elástico del modelo de agrietamiento para la matriz de roca del agregado		500 000 kPa/mm ----- Rango Tipo [1e5 a 2e6] kPa/mm Según tipo de roca matriz, dureza y mineralogía.
Gn Agregado ----- Energía de fractura normal de la matriz de roca del agregado	Parámetro de energía de fractura normal del modelo de agrietamiento para la matriz de roca del agregado.		45 kPa-mm ----- Rango Tipo [10 a 1 000] kPa-mm Según tipo de roca matriz, dureza, ductilidad y mineralogía.
Ss max Agregado ----- Esfuerzo máximo transversal de la matriz de roca del agregado	Resistencia máxima de cohesión del contacto en sentido transversal del modelo de agrietamiento para la matriz de roca del agregado.	Mediante la ejecución sobre probetas representativas de la matriz de roca madre del agregado, de ensayos de Flexión de probeta Semicircular (SCB), Tensión compacta de forma de disco (DC), Disco Brasileiro (BD), viga en voladizo o Viga Agrietada de un Solo Borde (SENB), para condición de modo de falla II (modo de deslizamiento en el plano, donde las caras de la fisura se desplazan de forma	5 000 kPa ----- Rango Tipo [1 000 a 15 000] kPa Según tipo de roca matriz, dureza y mineralogía.
Kso Agregado ----- Rigidez transversal a tensión de la matriz de roca del agregado	Relación entre el esfuerzo y la deformación en sentido transversal en el rango de comportamiento elástico del modelo de agrietamiento para la matriz de roca del agregado.		400 000 kPa/mm ----- Rango Tipo [0.5e5 a 1e6] kPa/mm Según tipo de roca matriz, dureza y mineralogía.



Símbolo ----- Nombre	Definición	Obtención	Valores Recomendados ----- [Rango Tipo]
GS Agregado ----- Energía de fractura transversal de la matriz de roca del agregado	Parámetro de energía de fractura transversal del modelo de agrietamiento para la matriz de roca del agregado.	perpendicular al frente de la grieta en su plano.	38 kPa-mm ----- Rango Tipo [1 a 500] kPa-mm Según tipo de roca matriz, dureza, ductilidad y mineralogía.
Coef. Fricc Acero-Granular ----- Coeficiente de fricción entre el acero y el agregado.	Constante de proporcionalidad cinemática entre la fuerza de rozamiento y la normal para el contacto entre partículas de placas de carga y partículas discretas del agregado.	A partir de la ejecución de ensayos de laboratorio normalizados, o por medio de valores de referencia disponibles en la literatura especializada para las diferentes combinaciones de contactos entre los materiales, siendo los valores de este parámetro dependientes de condiciones como la temperatura y la textura de los cuerpos.	0.35 ----- Rango Tipo [0.30 a 0.40]
Coef. Fricc Granular-Granular ----- Coeficiente de fricción entre granulares	Constante de proporcionalidad cinemática entre la fuerza de rozamiento y la normal para el contacto entre partículas de elementos que representan el agregado granular.		0.60 ----- Rango Tipo [0.50 a 0.70]
Coef. Fricc Granular-Mastic ----- Coeficiente de fricción entre el mastic y el agregado.	Constante de proporcionalidad cinemática entre la fuerza de rozamiento y normal para el contacto entre partículas del agregado y del mastic asfáltico.		0.50 ----- Rango Tipo [0.40 a 0.60]
Coef. Fricc Mastic-Mastic ----- Coeficiente de fricción entre el mastic	Constante de proporcionalidad cinemática entre la fuerza de rozamiento y la fuerza normal para el contacto entre partículas de mastic asfáltico.		0.70 ----- Rango Tipo [0.60 a 0.70]
Coef. Fricc Mastic-Acero ----- Coeficiente de fricción entre el mastic y el acero.	Constante de proporcionalidad cinemática entre la fuerza de rozamiento y normal para el contacto entre partículas del mastic y las que representan la placa de carga (acero).		0.60 ----- Rango Tipo [0.50 a 0.70]



4 RESULTADOS DE PRUEBAS DE TRACCIÓN INDIRECTA DE LABORATORIO Y CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES ASFÁLTICOS PARA VALIDACIÓN DEL MODELO

El presente Capítulo relaciona los resultados de los ensayos de caracterización recopilados para tres (3) diferentes tipos de mezclas asfálticas fabricadas y empleadas en proyectos de infraestructura vial para la ciudad de Cali y para el del departamento del Cauca. Dentro de la caracterización de los materiales especificados, se buscó que, sobre este tipo de información consultada, se involucre al menos resultados de ejecución sobre el material específico de ensayos de tracción indirecta en condición seca.

En correspondencia, el Anexo 05 asociado al informe del presente trabajo de grado, relaciona los resultados de los diferentes ensayos de caracterización para las mezclas asfálticas de orden local consideradas dentro del trabajo, como materiales patrón para la validación del presente modelo computacional.

Para efectos de adelantar el proceso de validación del modelo implementado, serán empleados como datos de entrada los diferentes parámetros mecánicos disponibles, considerados y extractados de la información secundaria recopilada, correspondientes para los diferentes tipos de mezclas asfálticas referidas.

Se reitera que, dentro de la información evaluada para la caracterización de las mezclas asfálticas en referencia a la validación del presente modelo computacional desarrollado, no fue posible encontrar ni disponer de resultados referentes a ensayos de definición de parámetros del modelo de agrietamiento y parámetros viscoelásticos. Lo anterior teniendo en cuenta la condición extraordinaria de este tipo de pruebas, las cuales son enfocadas para la ejecución de trabajos de investigación.

Tanto los parámetros viscoelásticos de cada material asfáltico, como los parámetros del modelo de agrietamiento, fueron asumidos tomando un orden lógico de dichas variables, de tal manera que los valores su RTI simulados en el modelo computacional, fueran valores cercanos y lógicos en referencia a los resultados del parámetro medidos experimentalmente en el laboratorio.

4.1 MEZCLA DE ALTO MÓDULO MAM-25.

A continuación, se presentan los datos extraídos y de relevancia para la mezcla asfáltica de Alto Módulo de tipología MAM-25 elaborada con asfalto modificado con polímero tipo V (de nomenclatura Tipo I según las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras del INVÍAS en su versión 2022), que para el caso en particular, se asocia a una de las plantas de fabricación disponibles en la ciudad de Cali y sus alrededores. Dicha mezcla asfáltica fue caracterizada y fabricada en el mes de septiembre de 2022, y de acuerdo con la información recopilada, su elaboración estaba regida por las especificaciones generales de construcción de carreteras del instituto nacional de vías, versión 2013. La Tabla 4-1 resume los parámetros técnicos considerados con la finalidad de adelantar la validación del modelo computacional para el material de referencia.



Tabla 4-1. Parámetros de validación del modelo para mezclas asfálticas tipo MAM-25 elaborada con asfaltos modificados con polímeros.

Parámetro	Valor de Referencia
Peso Específico <i>Bulk</i> del Agregado	2.828 g/cm ³
Densidad del Asfalto	1.020 g/cm ³
Porcentaje de Asfalto Efectivo	4,6%
Penetración del Asfalto a 25 ° C	20 (0.1mm)
Tipo de Gradación del Agregado	MAM-25
Tipo de Cemento Asfáltico	Modificado con polímero tipo V (Norma 2013) / Tipo I (Norma 2022)

Valores Experimentales Resistencia a Tracción Indirecta			
Prueba 1 RTI Experimental (kPa) =		1 359.40	
Prueba 2 RTI Experimental (kPa) =		1 353.30	
Prueba 3 RTI Experimental (kPa) =		1 342.30	
Desv. Estándar =	8.67	RTI Prom. (kPa) =	1 351.67
Coeficiente de Variación (%) =		0.64	

Tal como se puede verificar sobre la información aportada en el anexo respectivo, no fue posible disponer de los parámetros mecánicos de caracterización viscoelástico para el mastic asfáltico referido a la mezcla, ni los parámetros asociados al modelo de agrietamiento correspondiente del material.

4.2 MEZCLA ASFÁLTICA TIPO MSC-19 ELABORADA CON ASFALTO MODIFICADO CON POLÍMEROS TIPO III.

De igual forma, en este numeral se presentan los datos obtenidos de relevancia para la mezcla asfáltica de tipología MSC-19 elaborada con asfalto modificado con polímero tipo III (Tipo V según las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras INVÍAS versión 2022), que para el caso en particular, también se asocia a una de las plantas asfálticas comercializadoras en la ciudad de Cali. El material asfáltico en referencia, fue caracterizado y fabricado en el primer semestre del año 2018, y por tanto, su diseño, elaboración e instalación estaba regida por las especificaciones generales de construcción de carreteras del Instituto Nacional de Vías, versión 2013. La Tabla 4-2 detalla los parámetros de relevancia considerados para adelantar el proceso de validación del modelo computacional desarrollado para simular el ensayo de resistencia a tracción indirecta.



Tabla 4-2. Parámetros de validación del modelo para mezclas asfálticas tipo MSC-19 elaborada con asfaltos modificados con polímeros.

Parámetro	Valor de Referencia
Peso Específico <i>Bulk</i> del Agregado	2.863 g/cm ³
Densidad del Asfalto	1.018 g/cm ³
Porcentaje de Asfalto	4.7%
Penetración del Asfalto a 25°C	55.3 (0.1mm)
Tipo de Gradación del Agregado	MSC-19
Tipo de Cemento Asfáltico	Modificado con polímero tipo III (Norma 2013) / Tipo V (Norma 2022)

Valores Experimentales Resistencia a Tracción Indirecta			
Prueba 1 RTI Experimental (kPa) =		788.00	
Prueba 2 RTI Experimental (kPa) =		703.00	
Prueba 3 RTI Experimental (kPa) =		684.00	
Prueba 4 RTI Experimental (kPa) =		801.00	
Desv. Estándar =	59.06	RTI Prom. (kPa) =	744.00
Coeficiente de Variación (%)		7.94	

Al igual para la mezcla asfáltica referida en el numeral anterior, de la información aportada en el anexo respectivo no fue posible disponer de los parámetros mecánicos de caracterización viscoelástica para el material de mastic asfáltico referido a la mezcla en cuestión, ni de los parámetros asociados al modelo de agrietamiento asociado.

4.3 MEZCLA ASFÁLTICA TIPO MDC-19, ELABORADA CON CEMENTO ASFÁLTICO CONVENCIONAL.

A continuación, se presentan los datos obtenidos de relevancia para la caracterización física y mecánica de una mezcla asfáltica de tipología MDC-19 elaborada con asfalto convencional de clasificación 60/70, comercializada por un proveedor de mezcla asfáltica cuya planta se localiza en el sur del departamento del Cauca. El material asfáltico en referencia, fue caracterizado y fabricado en el segundo semestre del año 2021, y por tanto, su diseño, elaboración e instalación estaba regida por las especificaciones generales de construcción de carreteras del Instituto Nacional de Vías, versión 2013. Es de tener en cuenta que esta mezcla asfáltica fue elaborada con agregados obtenidos de la explotación de material proveniente de playa de río. La Tabla 4-3 expone los parámetros técnicos de relevancia considerados para adelantar el proceso de validación del modelo computacional de simulación del ensayo de resistencia a tracción indirecta para este tipo de material en específico.



Tabla 4-3. Parámetros de validación del modelo para mezclas asfálticas tipo MDC-19 elaborada con asfalto convencional.

Parámetro	Valor de Referencia
Peso Específico <i>Bulk</i> del Agregado	2.630 g/cm ³
Densidad del Asfalto	1.029 g/cm ³
Porcentaje de Asfalto	5.2%
Penetración del Asfalto a 25 ° C	65.0 (0.1mm)
Tipo de Gradación del Agregado	MDC-19
Tipo de Cemento Asfáltico	Convencional (clasificación 60/70)
Resistencia a la Tracción Indirecta en condición seca (valor promedio)	544.6 kPa.

Valores Experimentales Resistencia a Tracción Indirecta			
Prueba 1 RTI Experimental (kPa) =		546.00	
Prueba 2 RTI Experimental (kPa) =		574.20	
Prueba 3 RTI Experimental (kPa) =		513.50	
Desv. Estándar =	30.38	RTI Prom. (kPa) =	544.57
Coeficiente de Variación (%)		5.58	

Al igual para las mezclas asfálticas referidas anteriormente, de la información aportada en el anexo respectivo no fue posible disponer de todos los parámetros mecánicos de caracterización viscoelástico necesarios para el material de mastic asfáltico referido a la mezcla MDC-19, ni de los parámetros técnicos de definición asociados al modelo de agrietamiento implementado.



5 VERIFICACIÓN DEL SOFTWARE, EJECUCIÓN DE SIMULACIONES Y RESULTADOS

En este capítulo del documento se describen los diferentes procedimientos adelantados para el desarrollo de la última etapa de la ejecución del trabajo de grado, se relacionan los datos de entrada definidos para la alimentación del aplicativo desarrollado en DEM, los resultados obtenidos de las diferentes simulaciones realizadas y la correspondiente validación de los resultados de las simulaciones con datos experimentales reales de pruebas de tracción indirecta para varios tipos de mezclas asfálticas locales, con la finalidad de evaluar la eficiencia del modelo numérico implementado.

5.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LAS SIMULACIONES

Para esta etapa del presente estudio, se proyectó adelantar las simulaciones del ensayo de tracción indirecta (tres simulaciones por cada tipo de mezcla asfáltica considerada), teniendo como precepto que los tiempos de duración de dichas simulaciones fueran considerablemente racionales, sin afectar la confiabilidad del modelo, y además que se pudieran obtener archivos de los resultados con un tamaño lo suficientemente manejable en un ordenador de escritorio o personal, para su posterior almacenamiento, procesamiento y verificación del caso.

Se debe tener presente que, para el Método de Elementos Discretos, aspectos como el tamaño menor de partícula y el número respectivo de partículas juega un rol preponderante de manera directa en el tiempo de duración de la simulación, y de igual forma estos parámetros, influyen en la confiabilidad y validez de los resultados generados de las simulaciones ejecutadas por este método numérico.

Bajo el criterio anterior, dentro de la definición de las condiciones de carga de los ensayos simulados de tracción indirecta, la velocidad de deformación de carga fue definida como 275 mm/min equivalente a 4.58 mm/s. Es de tener en cuenta que la norma INV E786-13, asociada a las normas de ensayos de materiales de las especificaciones generales de construcción de carreteras, estipula aplicar sobre la probeta una carga vertical de compresión asociada con una velocidad de deformación de 50 +/- 5 mm/min (0.83 +/- 0.08 mm/s). Dado lo anterior, para las simulaciones correspondientes se consideró un factor de aceleración de carga de 5X, logrando duraciones de las simulaciones entre 48 horas a 76 horas de tiempo computacional ininterrumpido, de acuerdo con el tipo de material simulado y para las características de rendimiento del ordenador donde se corrió el modelo computacional correspondiente.

De igual forma y como parámetro de influencia en los tiempos de duración de las simulaciones ejecutadas, se consideró un espécimen con la menor dimensión estipulada en la norma (4.0 pulgadas o 101.6 mm de diámetro), además las partículas asociadas al material de mastic de las mezclas asfálticas (y por tanto el número y el tamaño mínimo de los elementos discretos de los demás materiales constitutivos), fue restringido a 1.50 mm de diámetro. En consecuencia, el número máximo de elementos discretos considerados para la discretización de los especímenes del material asfáltico en las simulaciones fue de 4180.



En conclusión, se trató de representar lo más fielmente posible la distribución granulométrica real de los materiales asfálticos, pero con la condición fundamental de no gastar muchos recursos computacionales que hagan el proceso muy lento o demorado, perdiendo funcionalidad el proceso de simulación o afecten la confiabilidad de los resultados obtenidos.

5.2 DATOS DE ENTRADA

Los datos de entrada con los que fueron realizadas las simulaciones de los ensayos de tracción indirecta sobre mezclas asfálticas, a partir de la aplicación computacional desarrollada en el presente trabajo de grado, son los descritos a continuación para cada tipo de material asfáltico. Es de tener en cuenta que para ampliar el espectro de verificación del modelo computacional implementado y de acuerdo con la información experimental disponible para la validación, se proyectó hacer simulaciones para mezclas asfálticas elaboradas con asfaltos convencionales (tipo MDC-19) y para mezclas elaboradas con asfaltos modificados con polímeros (MAM-25 modificada con polímero tipo V y MSC-19 modificada con polímero tipo III, según especificaciones INV 2013).

5.2.1 CONDICIONES DE CARGA

Durante la ejecución de las simulaciones del ensayo de tracción indirecta por Elementos Discretos, se buscó representar en su mayor medida las condiciones de carga estipuladas en el artículo INV E786-13, que estandariza el método del ensayo para Colombia, pero tratando que el proceso de simulación implicara un tiempo razonable de análisis y un gasto computacional adecuado. Bajo este precepto, se consideró una velocidad de deformación de 275 mm/min (4.58 mm/s), asociado a un factor de mayoración o de aceleración de 5X, equivalente a 5 veces de la velocidad estipulada en la norma INVÍAS. Bajo lo anterior, las simulaciones fueron proyectadas durar alrededor de 2 a 3 días de trabajo de computador continuo, en vez de 10 a 15 días si se considerará el cumplimiento normativo correspondiente.

5.2.2 DIMENSIONES DE LA PROBETA Y TAMAÑO DE PARTÍCULAS

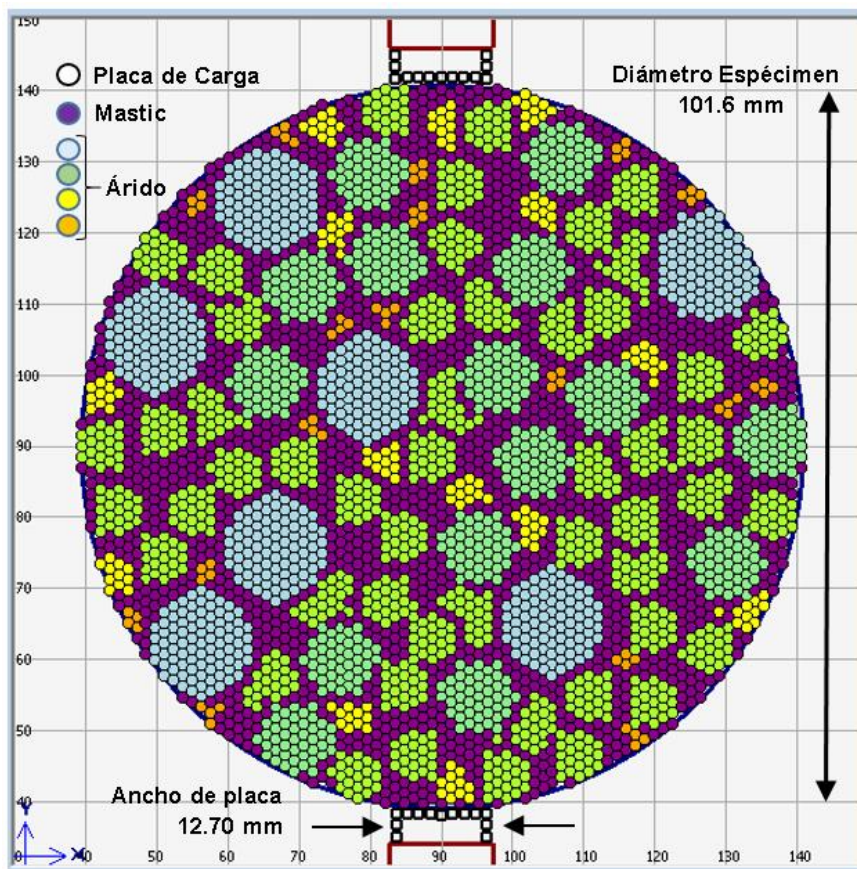
Las características geométricas de la probeta o espécimen de mezcla asfáltica definidas para la simulación de las pruebas de tracción indirecta adelantadas sobre la aplicación desarrollada, fueron definidas considerando el menor diámetro permitido en la norma de ensayo regente, que estipula un diámetro nominal de 101.6 mm. Bajo la anterior condición, se involucraría un mínimo número de elementos discretos que permitiera condiciones más eficientes de simulación, lo anterior expresado en menores tiempos de ejecución y de memoria de almacenamiento de información resultante. Es de tener en cuenta que el ancho considerado del espécimen para efectos de los cálculos correspondientes fue de 1.0 mm.

El tamaño de los elementos discretos para la discretización del espécimen, fue considerado para 1.50 mm de diámetro de cada partícula. Con la referencia del tamaño del espécimen y del tamaño de las partículas discretas definido, el número máximo de elementos discretos considerados para la discretización de los especímenes de los materiales asfálticos simulados fue de 4180 elementos.



La Figura 5-1 muestra las características geométricas definidas del espécimen y esquematiza las condiciones granulométricas y de discretización típicas considerados para los materiales asfálticos incluidos dentro de las simulaciones ejecutadas.

Figura 5-1. Esquema tipo del espécimen de mezcla asfáltica definido en las simulaciones.



5.2.3 PARÁMETROS DE LOS COMPONENTES DE LA MEZCLA ASFÁLTICA DE ALTO MÓDULO MAM-25

Los parámetros mecánicos definidos para los componentes constitutivos de la Mezcla Asfáltica tipo MAM-25 para las condiciones de servicio correspondientes, y requeridos para alimentar el modelo de simulación por DEM, fueron definidos a partir de la información secundaria consultada para este tipo de material y relacionada en el [Anexo 05](#) del presente documento. Sin embargo, la información de los modelos mecánicos avanzados no disponibles (modelo de comportamiento viscoelástico y de agrietamiento elástico bilineal), fueron definidos de manera iterativa a través de simulaciones previas, de tal manera que generaran resultados de la resistencia a tracción del orden del resultado referido experimentalmente para el material correspondiente.

Bajo la condición anterior, la Tabla 5-1 relaciona los parámetros mecánicos correspondientes como datos de entrada al modelo computacional, en referencia a la mezcla MAM-25, con los cuales fueron ejecutadas las tres simulaciones del caso.

Tabla 5-1. Propiedades mecánicas de la Mezcla MAM-25 (elaborada con asfalto modificado con polímero tipo V) como datos de entrada del modelo.

Parámetros Viscoelásticos (Burgers)	Valor	Unidades
E_1	600 000	kPa
n_1	1 800	kPa-s
E_2	80 000	kPa
n_2	35	kPa-s
Información del Ligante Asfáltico	Valor	Unidades
Densidad	1 020	kg/m ³
Penetración	20.0	mm/10
Contenido de Asfalto (peso)	4.6	%
Parámetros Agrietamiento (Interface Mastic/Agregado)	Valor	Unidades
S_{nmax}	5 000	kPa
K_{no}	10 000	kPa/mm
G_n	1 875	kPa-mm
S_{smax}	2 500	kPa
K_{so}	5 000	kPa/mm
G_s	937.5	kPa-mm

5.2.4 PARÁMETROS DE LOS COMPONENTES DE LA MEZCLA ASFÁLTICA TIPO MSC-19 ELABORADA CON ASFALTO MODIFICADO CON POLÍMEROS TIPO III.

Para la mezcla asfáltica tipo MSC-19, elaborada con asfalto modificado con polímeros tipo III, los parámetros mecánicos definidos para los componentes constitutivos del material en su condición de ejecución de la simulación correspondientes, y requeridos para alimentar el modelo de simulación por DEM, fueron concretados con base en la información secundaria consultada para esta mezcla y relacionada en el Anexo 05 del presente documento. No obstante, la información de los modelos mecánicos avanzados no disponibles (modelo de comportamiento viscoelástico y de agrietamiento elástico bilineal), fue definida iterativamente con simulaciones previas de tal manera que, generaran resultados de la resistencia a tracción simulada del orden del resultado asociado experimentalmente para este material.

Bajo la condición anterior, la Tabla 5-2 relaciona los parámetros mecánicos básicos considerados como datos de entrada al modelo computacional, con los que se realizaron tres simulaciones correspondientes como condición para el proceso de validación del modelo computacional implementado.



Tabla 5-2. Propiedades mecánicas de la Mezcla MSC-19 elaborada con asfalto modificado con polímero tipo III, como datos de entrada del modelo.

Parámetros Viscoelásticos (Burgers)	Valor	Unidades
E_1	350 000	kPa
n_1	900	kPa-s
E_2	45 000	kPa
n_2	28	kPa-s
Información del Ligante Asfáltico	Valor	Unidades
Densidad	1 018	kg/m ³
Penetración	55.3	mm/10
Contenido de Asfalto (peso)	4.7	%
Parámetros Agrietamiento (Interface Mastic/Agregado)	Valor	Unidades
S_{nmax}	2 250	kPa
K_{no}	5 000	kPa/mm
G_n	675	kPa-mm
S_{smax}	1 125	kPa
K_{so}	2 500	kPa/mm
G_s	337.5	kPa-mm

5.2.5 PARÁMETROS DE LOS COMPONENTES DE LA MEZCLA ASFÁLTICA TIPO MDC-19, ELABORADA CON CEMENTO ASFÁLTICO CONVENCIONAL 60/70.

De forma similar a los dos tipos de materiales asfálticos considerados antes, para la mezcla asfáltica tipo MDC-19 elaborada con asfalto convencional 60/70, los parámetros mecánicos definidos para sus componentes constitutivos, y requeridos como datos de entrada para el modelo de simulación por DEM, fueron definidos a partir de la información secundaria consultada para esta mezcla y relacionada en el Anexo 05 del presente documento.

En correspondencia, la información de los modelos mecánicos avanzados no disponibles (modelo de comportamiento viscoelástico y de agrietamiento elástico bilineal), fueron determinados a partir de la ejecución de simulaciones previas, de tal manera que generaran resultados de RTI simulada del mismo orden del resultado asociado a los ensayos de laboratorio disponibles para este tipo de mezcla asfáltica.

La Tabla 5-3 siguiente, expone todos los datos de entrada ingresados al modelo computacional y con los cuales se realizaron las respectivas tres simulaciones correspondientes para este tipo de material.



Tabla 5-3. Propiedades mecánicas de la Mezcla MDC-19 elaborada con asfalto convencional, como datos de entrada del modelo.

Parámetros Viscoelásticos (Burgers)	Valor	Unidades
E_1	300 000	kPa
n_1	800	kPa-s
E_2	40 000	kPa
n_2	25	kPa-s
Información del Ligante Asfáltico	Valor	Unidades
Densidad	1 029	kg/m ³
Penetración	65.0	mm/10
Contenido de Asfalto (peso)	5.2	%
Parámetros Agrietamiento (Interface Mastic/Agregado)	Valor	Unidades
S_{nmax}	1 600	kPa
K_{no}	4 000	kPa/mm
G_n	440	kPa-mm
S_{smax}	800	kPa
K_{so}	2 000	kPa/mm
G_s	220	kPa-mm

5.2.6 CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DEL AGREGADO MINERAL CONSTITUTIVO DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS.

Teniendo en cuenta que las mezclas asfálticas MAM-25 y MSC-19 modificada caracterizadas como patrón de validación del modelo computacional asociado al presente trabajo de grado, son fabricadas a partir de la explotación de los macizos rocosos localizados en la zona de ladera de la cordillera occidental del municipio de Yumbo y de Cali, y considerando que dichos macizos de acuerdo a la prospección geológica de la zona, corresponden a rocas de origen volcánico constituidos típicamente por diabasas y basaltos, los parámetros mecánicos necesarios como datos de entrada del modelo computacional de simulación por Elementos Discretos para el árido, son los relacionados en la Tabla 5-4.

De igual forma, la mezcla asfáltica tipo MDC-19 convencional según su caracterización, fue elaborada a partir de la trituración de agregados obtenidos de la explotación de playa de río, por lo cual el ambiente fluvial característico del material, debe ser considerado en la definición de los parámetros mecánicos, teniendo en cuenta los efectos de meteorización mecánica en su historia geológica. Los parámetros elásticos y gravimétricos de las rocas para efectos de la caracterización del agregado, fueron extraídos a partir de consultas realizadas en la literatura especializada tal como (Alejano Monge. & Ramírez Oyanguren, 2004).



Los parámetros de caracterización del modelo de agrietamiento elástico bilineal, fueron determinados a partir de información secundaria para matrices de materiales rocosos dispuesta en otras investigaciones y literatura especializada como (Kim et al., 2009) y (Mahabadi *et al.*, 2009).

Tabla 5-4. Propiedades mecánicas consideradas para el árido de las mezclas asfálticas.

Parámetros Elásticos y Gravimétricos	Valor	Unidades
Módulo de Elasticidad (E)	MAM-25 / MSC-19 80 240 000 MDC-19 75 240 000	kPa
Relación de Poisson (μ)	0.18	X por uno
Densidad (según caracterización)	2 828 (MAM-25) 2 863 (MSC-19) 2 630 (MDC-19)	kg/m ³
Parámetros del Modelo de Agrietamiento Bilineal (valores fijos)	Valor	Unidades
S_{nmax}	6 000	kPa
K_{no}	500 000	kPa/mm
G_n	45	kPa-mm
S_{smax}	5 000	kPa
K_{so}	400 000	kPa/mm
G_s	38	kPa-mm

5.2.7 CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LAS PLACAS DE CARGA.

De igual forma se consideró dentro del modelo de simulación, la discretización de las placas metálicas encargadas de transmitir los esfuerzos diametrales al espécimen asfáltico durante la prueba. Bajo lo anterior, se consideró una cadena de elementos discretos encargados de representar tales componentes dentro de la representación numérica del modelo.

Así las cosas, los parámetros mecánicos de la placa metálica requeridos como entradas para la simulación por Elementos Discretos del ensayo de tracción indirecta, fueron definidos a partir de información secundaria consultada en (*The Engineering ToolBox*,



2001), considerándose como material constitutivo, acero. En consecuencia, los parámetros mecánicos respectivos son los relacionados en la Tabla 5-5.

Tabla 5-5. Propiedades mecánicas consideradas para las placas de carga.

Parámetros elásticos y gravimétricos	Valor	Unidades
Módulo de Elasticidad (E)	204 8000 000	kPa
Relación de Poisson (μ)	0.28	x por uno
Densidad	7 900	kg/m ³

5.2.8 COEFICIENTES DE FRICCIÓN CINEMÁTICO ENTRE LOS DIFERENTES MATERIALES CONSTITUTIVOS DE LAS PRUEBAS SIMULADAS.

Para la definición de los modelos mecánicos asociados a las interacciones tangenciales entre partículas, se consideró el coeficiente de fricción cinemático asociado a las posibles combinaciones de los materiales constitutivos de las partículas o elementos en contacto. Bajo el marco anterior, los valores de dicho parámetro por defecto considerados para el desarrollo y ejecución del algoritmo asociado al presente trabajo de grado fueron asumidos a partir de consultas realizadas en fuentes técnicas correspondientes, y son los valores relacionados a continuación:

Tabla 5-6. Coeficientes de fricción cinemático asumidos para los diferentes contactos entre los materiales.

Interface	μ_k
Acero - Granular	0.35
Granular – Granular	0.60
Granular - Mastic	0.50
Mastic – Mastic	0.70
Mastic - Acero	0.60

Referencia: extractado de (*The Engineering ToolBox*, 2001)

5.3 RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES DEL ENSAYO DE RESISTENCIA A TRACCIÓN INDIRECTA Y COMPARACIÓN CON LOS DATOS EXPERIMENTALES.

Como resultados de las simulaciones del ensayo de tracción indirecta en 2D arrojados por el modelo computacional implementado y en referencia a las mezclas asfálticas consideradas, en este aparte del informe se presenta tanto gráficamente como de forma numérica lo relacionado a continuación. Es de tener en cuenta que en el [Anexo 02](#) del



presente informe, se entregan todos los resultados crudos de las simulaciones llevadas a cabo para cada material.

5.3.1 RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES DE TRACCIÓN INDIRECTA PARA LA MEZCLA ASFÁLTICA DE ALTO MÓDULO MAM-25.

Como resultado de las simulaciones del ensayo de tracción indirecta realizadas para la mezcla asfáltica de alto módulo tipo MAM-25, y de acuerdo a los parámetros de entrada definidos para este tipo de material y a las condiciones propuestas de ejecución de las simulaciones, las fuerzas máximas soportadas reportadas, las deformaciones asociadas a dichas fuerzas máximas y las respectiva Resistencia a la Tracción Indirecta, son la relacionadas en la Tabla 5-7.

Tabla 5-7. Resultados de Simulaciones para la mezcla tipo MAM-25.

número de Simulación	Fuerza Máxima (N)	Deformación Asociada (mm)	RTI (kPa)
1	203.78	2.272	1 272.91
2	206.12	2.189	1 287.51
3	240.98	3.569	1 505.28
Promedio	216.96	2.677	1 355.23
Desviación Estándar (kPa)			130.15
Coeficiente de Variación (%)			9.60
Resultados Experimentales Resistencia a Tracción Indirecta			
Prueba 1 RTI Experimental (kPa) =			1 359.40
Prueba 2 RTI Experimental (kPa) =			1 353.30
Prueba 3 RTI Experimental (kPa) =			1 342.30
Desv. Estándar =	8.67	RTI Prom. (kPa) =	1 351.67
Coeficiente de Variación (%)			0.64

En consecuencia, el valor de la Resistencia a Tracción Indirecta del espécimen de mezcla asfáltica de alto módulo tipo MAM-25 fruto de la simulación computacional, y calculado en función de la carga máxima soportada, el diámetro del espécimen y el ancho unitario considerado para el elemento, se cuantificó en 1 272.91 kPa para la simulación número 1, 1 287.51 kPa para la simulación 2, y 1 505.28 kPa para la simulación 3, con un valor promedio de 1 355.23 kPa, asociado a una desviación estándar de 130.15 kPa y un coeficiente de variación de 9.60%.

De igual forma, la Figura 5-2 a la Figura 5-4, muestran las diferentes curvas de Fuerza vs Deformación y las visualizaciones respectivas de los tres especímenes de MAM-25, obtenidas en el instante final de cada simulación, donde se expone adicionalmente el correspondiente patrón de agrietamiento y de plastificación de los contactos.



Figura 5-2. Curva Fuerza vs Deformación y vista deformada del espécimen obtenidas de la simulación número 1 para la Mezcla asfáltica MAM-25.

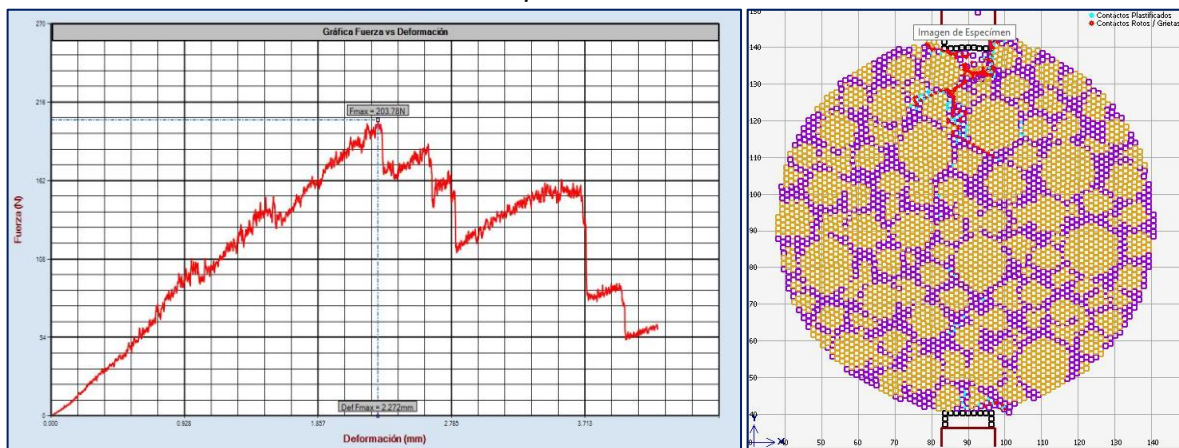


Figura 5-3. Curva Fuerza vs Deformación y vista deformada del espécimen obtenidas de la simulación número 2 para la Mezcla asfáltica MAM-25.

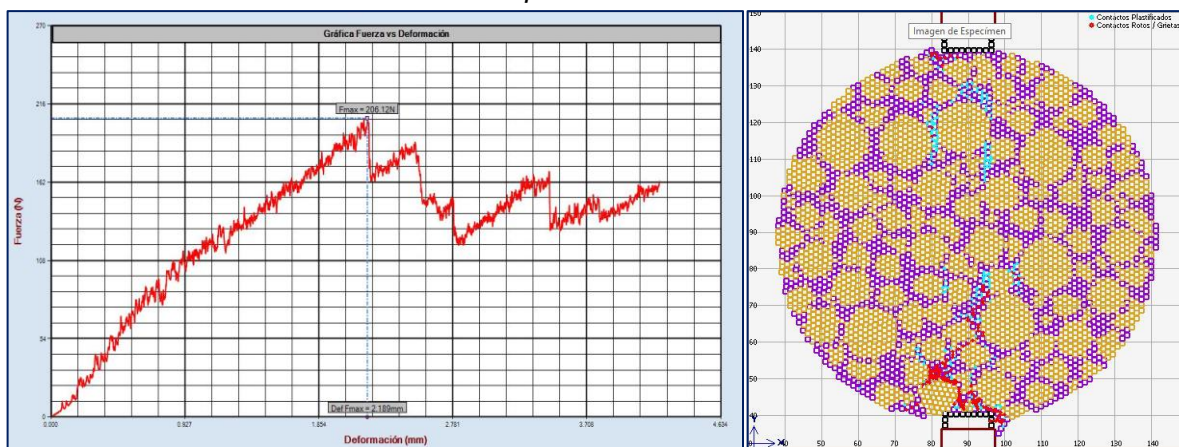
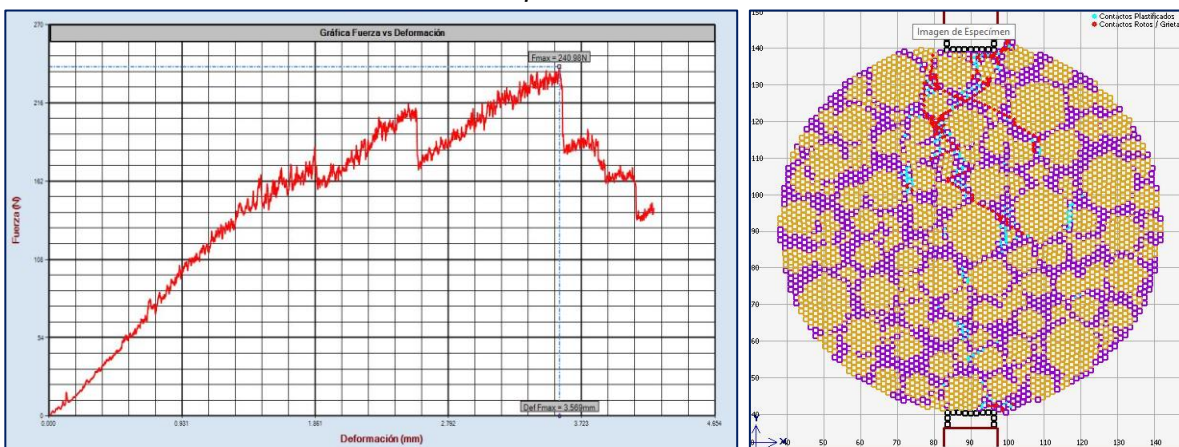


Figura 5-4. Curva Fuerza vs Deformación y vista deformada del espécimen obtenidas de la simulación número 3 para la Mezcla asfáltica MAM-25.



5.3.2 RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES DE TRACCIÓN INDIRECTA PARA LA MEZCLA ASFÁLTICA TIPO MSC-19 MODIFICADA.

De igual forma, como resultado de las diferentes simulaciones del ensayo de tracción indirecta realizadas para la mezcla asfáltica tipo MSC-19 elaborada con asfalto modificado tipo III, y de acuerdo a los parámetros de entrada definidos para este tipo de material y a las condiciones propuestas de ejecución de las simulaciones, las fuerzas máximas reportadas en conjunto con las deformaciones asociadas a dichas fuerzas máximas y los respectivos valores cuantificados de las Resistencias a Tracción Indirecta, son las relacionadas en la Tabla 5-8.

Tabla 5-8. Resultados de Simulaciones para la mezcla asfáltica tipo MSC-19 modificada con polímeros.

número de Simulación	Fuerza Máxima (N)	Deformación Asociada (mm)	RTI (kPa)
1	117.99	3.321	737.01
2	115.37	3.026	720.65
3	138.54	3.158	865.40
Promedio	123.97	3.168	774.35
Desviación Estándar (kPa)			79.27
Coeficiente de Variación (%)			10.24
Resultados Experimentales Resistencia a Tracción Indirecta			
Prueba 1 RTI Experimental (kPa) =			788.00
Prueba 2 RTI Experimental (kPa) =			703.00
Prueba 3 RTI Experimental (kPa) =			684.00
Prueba 4 RTI Experimental (kPa) =			801.00
Desv. Estándar =	59.06	RTI Prom. (kPa) =	744.00
Coeficiente de Variación (%)			7.94

Los valores de la Resistencia a Tracción Indirecta de los especímenes de mezcla asfáltica tipo MSC-19 modificada con polímero, obtenidas fruto de las tres simulaciones computacionales ejecutadas, se cuantificaron en 737.01 kPa para la simulación número 1, 720.65 kPa para la simulación 2, y 865.40 kPa para la simulación 3, con un valor promedio de 774.35 kPa, asociado a una desviación estándar de 79.27 kPa y un coeficiente de variación de 10.24%

La Figura 5-5 a la Figura 5-7, exponen las correspondientes curvas de Fuerza vs Deformación y las visualizaciones de los tres especímenes del material asfáltico MSC-19 modificado con polímeros en el instante final de cada una de las simulaciones, revelando la deformación respectiva de los especímenes y el referido patrón de agrietamiento y de plastificación de los contactos.



Figura 5-5. Curva Fuerza vs Deformación y vista deformada del espécimen obtenidas de la simulación número 1 para la Mezcla asfáltica MSC-19 modificada.

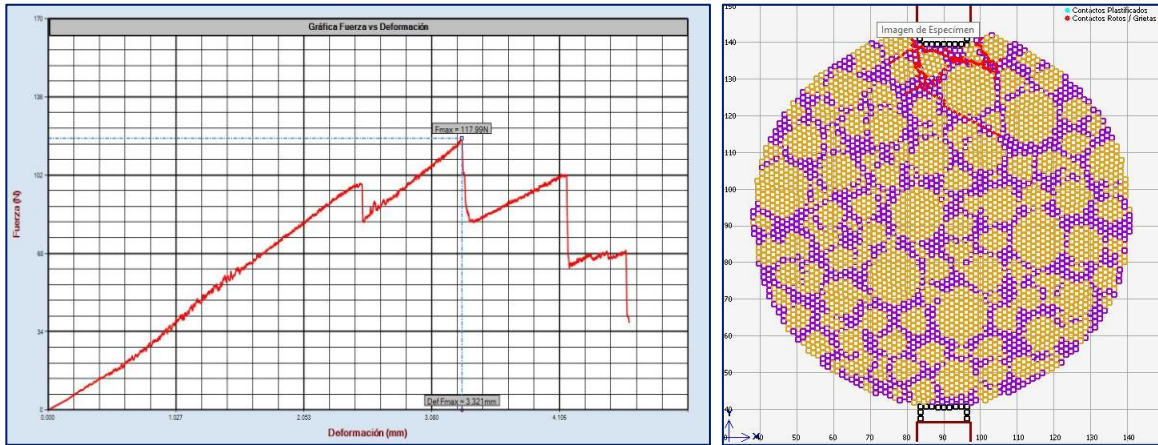


Figura 5-6. Curva Fuerza vs Deformación y vista deformada del espécimen obtenidas de la simulación número 2 para la Mezcla asfáltica MSC-19 modificada.

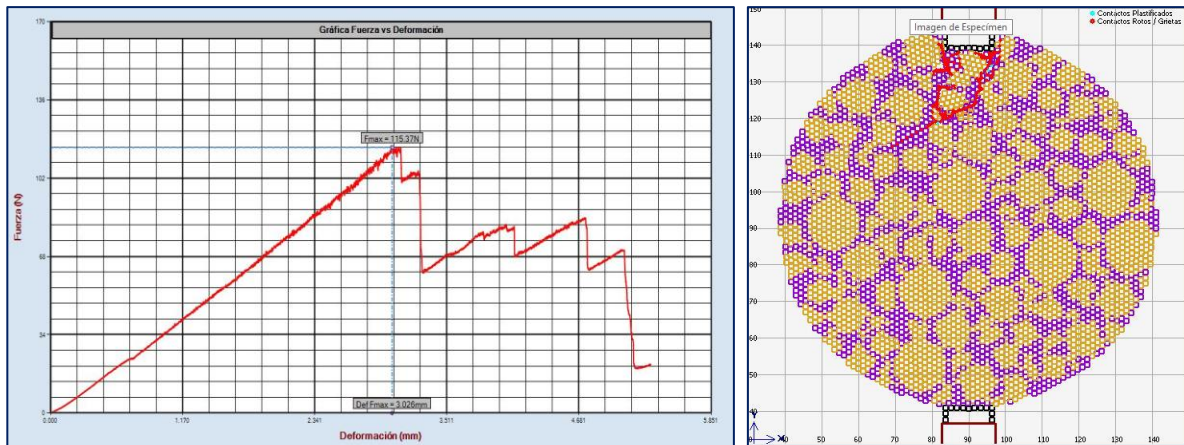
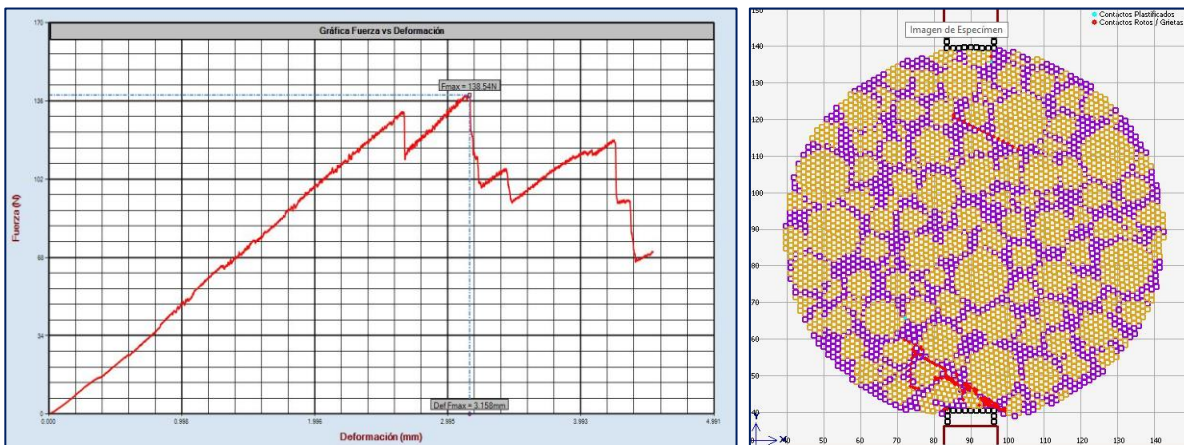


Figura 5-7. Curva Fuerza vs Deformación y vista deformada del espécimen obtenidas de la simulación número 3 para la Mezcla asfáltica MSC-19 modificada.



5.3.3 RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES DE TRACCIÓN INDIRECTA PARA LA MEZCLA ASFÁLTICA TIPO MDC-19 ELABORADA CON ASFALTO CONVENCIONAL.

Finalmente, como resultado de las tres simulaciones de la prueba de tracción indirecta realizadas para la mezcla asfáltica tipo MDC-19 (elaborada con asfalto convencional 60/70), en consistencia con los parámetros de entrada definidos para el material y con las condiciones iniciales planteadas para la ejecución de las simulaciones, las fuerzas máximas soportadas, las deformaciones asociadas a dichas fuerza máximas y los respectivos valores de Resistencias a Tracción Indirecta, son relacionados en la Tabla 5-9.

Tabla 5-9. Resultados de las Simulaciones para la mezcla tipo MDC-19 elaborada con asfalto convencional.

número de Simulación	Fuerza Máxima (N)	Deformación Asociada (mm)	RTI (kPa)
1	80.79	3.535	504.65
2	91.25	3.768	570.00
3	105.73	3.86	660.47
Promedio	92.59	3.721	578.37
Desviación Estándar (kPa)			78.25
Coeficiente de Variación (%)			13.53
Resultados Experimentales Resistencia a Tracción Indirecta			
Prueba 1 RTI Experimental (kPa) =			546.00
Prueba 2 RTI Experimental (kPa) =			574.20
Prueba 3 RTI Experimental (kPa) =			513.50
Desv. Estándar =	30.38	RTI Prom. (kPa) =	544.57
Coeficiente de Variación (%)			5.58

Los valores de la Resistencia a Tracción Indirecta de los especímenes de mezcla asfáltica tipo MDC-19 obtenidos de la simulaciones computacionales, y calculados en función de la carga máxima soportada, el diámetro del espécimen y el ancho unitario considerado para el elemento, se cuantificaron en 504.65 kPa para la primera simulación, 570.00 kPa para la segunda simulación, y 660.47 kPa para la última simulación, con un valor promedio de 578.37 kPa, asociado a un valor de 78.25 kPa de desviación estándar y un coeficiente variación de 13.53%.

De igual forma, la Figura 5-8 a la Figura 5-10, muestran las respectivas curvas de Fuerza vs Deformación Diametral y las visualizaciones correspondientes de los especímenes en el instante final de la simulación, exponiendo la condición de deformación de cada briqueta al igual que el patrón de agrietamiento y de plastificación de los contactos.



Figura 5-8. Curva Fuerza vs Deformación y vista deformada del espécimen obtenidas de la simulación número 1 para la Mezcla asfáltica MDC-19.

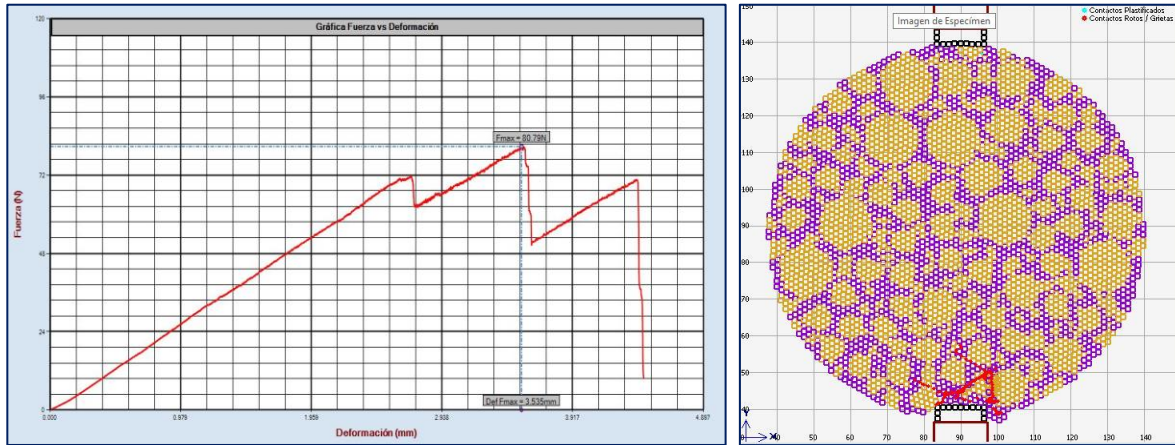


Figura 5-9. Curva Fuerza vs Deformación y vista deformada del espécimen obtenidas de la simulación número 2 para la Mezcla asfáltica MDC-19.

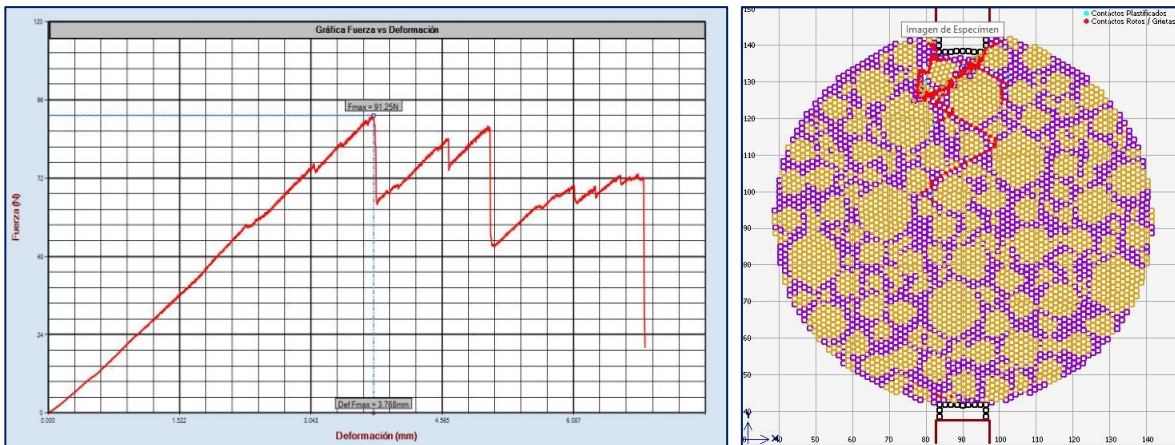
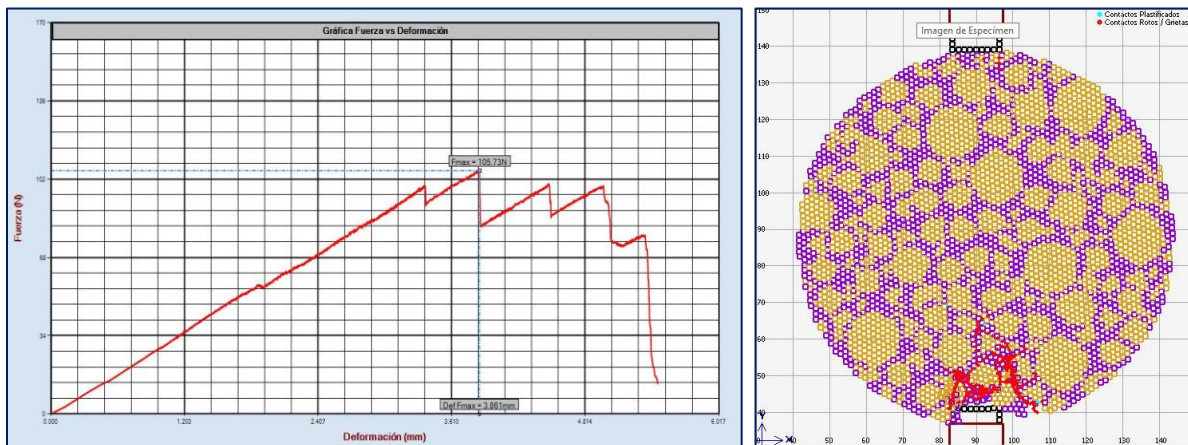


Figura 5-10. Curva Fuerza vs Deformación y vista deformada del espécimen obtenidas de la simulación número 3 para la Mezcla asfáltica MDC-19.



5.4 RESUMEN COMPARATIVO ENTRE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES Y SIMULADOS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA

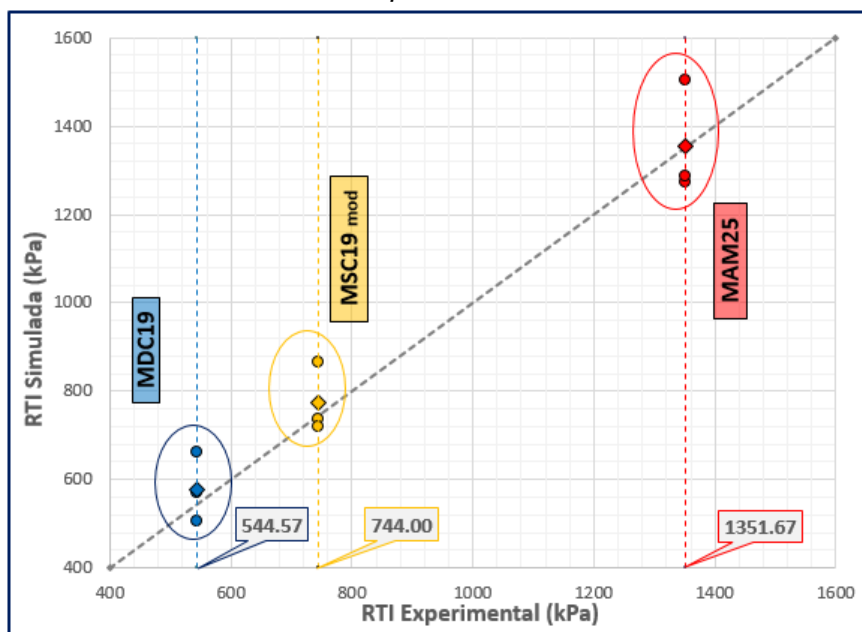
El consolidado de los resultados asociados a las simulaciones del ensayo de Resistencia a Tracción Indirecta promedio para los materiales asfálticos considerados dentro del proceso de validación del modelo computacional implementado, en conjunto con los respectivos valores experimentales extractados de información secundaria obtenida para mezclas asfálticas elaboradas y comercializadas por las plantas que surten del material en los proyectos de infraestructura vial para la ciudad de Cali y del departamento del Cauca, se presentan en la Tabla 5-10.

Tabla 5-10. Comparación de los resultados del ensayo de RTI simulado y de los valores Experimentales.

Tipo de Material Asfáltico	Simulación		Experimental	
	RTI promedio (kPa)	C.V. (%)	RTI Promedio (kPa)	C.V. (%)
MAM-25	1 355.23	9.60	1 351.67	0.64
MSC-19 modificada	774.35	10.24	744.0	7.94
MDC-19 convencional	578.37	13.53	554.57	5.58
Coeficiente de Determinación (R^2) = 0.943				

La Figura 5-11 corresponde a la gráfica de dispersión entre la Resistencia a la Tracción Indirecta Simulada contra la Resistencia a Tracción Indirecta Experimental, correspondientemente para las diferentes mezclas asfálticas propuestas en el proceso de validación del modelo computacional implementado.

Figura 5-11. Gráfica de Dispersión de la RTI Simulada Vs RTI Experimental, para los materiales asfálticos considerados en el proceso de validación del modelo computacional.



Tal como se puede apreciar de la tabla y del gráfico de dispersión anterior, los valores obtenidos de la simulación del ensayo de resistencia a tracción indirecta para los materiales asfálticos considerados, se encuentran dentro del orden numérico y de tendencia de los resultados experimentales consultados para dichos materiales, permitiendo inferir que el modelo matemático implementado se acerca de manera razonable a los datos de laboratorio, es decir, se considera que se presenta una adecuada exactitud de los resultados del modelo implementado con los valores objetivo de laboratorio, expresándose estadísticamente lo anterior para un Coeficiente de Determinación (R^2) de 0.943. Lo anterior permite reflejar la bondad del ajuste de los datos experimentales de la RTI de las mezclas asfálticas, en comparación con los resultados simulados del ensayo mecánico pronosticado.

De igual forma, para las series de tres simulaciones de los mismos materiales asfálticos, se obtuvieron coeficientes de variación bajos (inferiores al 13.5%), por lo cual, para una misma condición de datos de entrada, el modelo computacional implementado presenta una baja dispersión de resultados, infiriendo entonces que dicho algoritmo lógico implementado, relaciona una óptima precisión en el proceso de simulación del ensayo de laboratorio considerado.

Las dos condiciones anteriores, tanto la exactitud del modelo numérico y computacional implementado como la precisión del mismo, fueron evaluadas en consistencia con los datos de entrada supuestos para cada tipo de mezcla asfáltica considerada dentro del proceso de validación.



6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Para la aplicabilidad de los métodos modernos de diseño de estructuras de pavimento empleados a nivel mundial, es de suma importancia adelantar trabajos de investigación que permitan inferir con mayor confiabilidad, la relación entre la naturaleza de los materiales constitutivos (composición, estructura) con sus propiedades y respuestas mecánicas.
- El Método de los Elementos Discretos (DEM), como método numérico basado en modelos de naturaleza discreta para la solución y estudio de problemas ingenieriles, es considerado el más adecuado para la simulación de fenómenos mecánicos de materiales adheridos que sufren el proceso de generación de discontinuidades múltiples, como los concretos asfálticos, los concretos hidráulicos y las rocas, materiales de empleo común en el campo de la ingeniería vial.
- La mayor dificultad en la aplicación del DEM para la modelación de problemas reales en el campo de la ingeniería vial y geotécnica, es el alto costo computacional que implica cuando se involucra un número importante de partículas dentro del medio discretizado. Por lo tanto, una simulación del DEM puede llegar a tomar días e incluso semanas, tal como ocurrió en el desarrollo del presente trabajo de grado, restringiendo en algunos casos su aplicabilidad, a análisis de problemas mucho más simples con un número inferior de elementos discretos, generalmente de forma simple.
- Para tratar de estimar la resistencia a tensión de mezclas asfálticas y para evaluar la adherencia entre los materiales constitutivos, se desarrolló un modelo numérico viscoelástico por el Método de Elementos Discretos en 2D que simulara una prueba de compresión diametral sobre un espécimen cilíndrico, como aproximación a un Ensayo de Resistencia a Tracción Indirecta para materiales asfálticos. Dicho modelo fue desarrollado en lenguaje Visual Basic. Net y fue montado sobre una aplicación como soporte del presente trabajo de Grado. El modelo computacional propuesto se evaluó con la comparativa de ensayos experimentales ejecutados a muestras de mezclas asfálticas reales. Para evaluar la pérdida de adherencia entre los materiales y por ende, la generación de microfisuras y el patrón de fisuración del espécimen, se consideró un modelo de deterioro o de agrietamiento de tipo elásto-plástico Bilineal.
- El desarrollo de este tipo de aplicaciones o *software* especializado en el área de la geotecnia vial y pavimentos, permite evaluar y predecir el desempeño y comportamiento mecánico de geomateriales de manera preliminar, como posible beneficio técnico para el diseño y construcción de pavimentos flexibles.
- Para propósitos de adelantar el proceso de validación del modelo computacional propuesto en el presente trabajo de grado, se consideraron tres (3) diferentes tipos de mezclas asfálticas elaboradas y comercializadas en la ciudad de Cali. Los tipos de mezclas asfálticas referidas fueron: Mezclas de Alto Módulo tipo MAM-25, Mezcla Semidensa en Caliente tipo MSC-19 modificada con polímero, y Mezcla Densa en Caliente tipo MDC-19 convencional, todas clasificadas como mezclas asfálticas de gradación continua según las especificaciones de construcción del INVÍAS.



- Dentro de la información recopilada para la caracterización de las mezclas asfálticas en referencia a la validación del modelo computacional, no fue posible disponer de parámetros referentes al modelo de agrietamiento y los correspondientes viscoelásticos. Dichos parámetros fueron definidos de manera iterativa de tal manera que generaran resultados de la resistencia a tracción simulada del orden del resultado referido experimentalmente para el material correspondiente.
- El consolidado de los resultados asociados a las simulaciones del ensayo de Resistencia a Tracción Indirecta para los materiales asfálticos considerados dentro del proceso de validación del modelo computacional implementado, en conjunto con los respectivos valores experimentales para las mezclas asfálticas consideradas, se presentan en la Tabla 6-1.

Tabla 6-1. Comparación de los resultados de RTI, simulados y experimentales.

Tipo de Material Asfáltico	RTI de Simulación Promedio (kPa) (1)	RTI Experimental (kPa) (2)	Diferencia Porcentual Absoluta (3)=ABS(2-1)/(2)
MAM-25	1 355.23	1 351.67	0.26%
MSC-19 modificada	774.35	744.00	4.08%
MDC-19 convencional	578.37	554.57	4.29%

- Como conclusión principal del presente trabajo de grado, se tiene que los valores generales obtenidos de RTI simulados para las condiciones de parámetros mecánicos definidos de las diferentes tipologías de mezclas asfálticas consideradas, se encuentran dentro del orden numérico y de tendencia de los resultados experimentales consultados para dichos materiales, permitiendo inferir que el modelo matemático implementado se acerca de manera razonable a los datos de laboratorio. Lo anterior expresándose bajo condiciones apropiadas de precisión y de exactitud del modelo computacional (coeficientes de variación inferiores al 13.5%, R^2 de 0.943 y diferencia porcentual absoluta entre valores promedio simulados y experimentales por debajo del 4.29%), reiterándose por tanto que los resultados obtenidos se asocian con los datos de entrada asumidos para algunos parámetros mecánicos de cada tipo de mezcla asfáltica evaluada.
- En complemento a lo definido anteriormente, este trabajo de grado, enmarcado de manera complementaria dentro del campo de la mecánica computacional, pretende generar un nuevo abanico de posibilidades con la aplicación del Método de los Elementos Discretos, para la elaboración de futuros trabajos de investigación en el campo de la geotecnia vial y de las estructuras de pavimento.
- Bajo este entendido, se pretende a partir del empleo de conceptos físicos y matemáticos, y a través del manejo de herramientas lógicas y computacionales, entender y predecir de forma más representativa y real, el comportamiento mecánico de los materiales actualmente empleados para la construcción de obras viales, o proponer el uso de nuevos materiales o procesos de manejo y manipulación de los mismos. Lo anterior, buscando siempre proteger el medio



ambiente, aunado al empleo eficiente de los recursos disponibles y del tiempo. En consecuencia, dentro de las futuras líneas a investigar asociadas al objetivo del presente trabajo de grado, se proponen los siguientes tópicos:

- ✓ Elaborar mediante el empleo del Método de Elementos Discretos, modelos de simulación para diferentes pruebas de laboratorio, consideradas en la caracterización mecánica de materiales de construcción para infraestructura vial.
 - Leyes de fatiga o módulos de mezclas asfálticas.
 - Corte directo para suelos y rocas.
 - Resistencia a la compresión de rocas o concretos.
 - Triaxial cíclico para evaluación de potencial de licuación en arenas y módulos resilientes de suelos.
- ✓ Evaluar otros métodos numéricos adicionales al Método de los Elementos Discretos, para la simulación de pruebas y evaluación del comportamiento mecánico de materiales viales, tal como:
 - Método de Diferencias Finitas.
 - Método de Elementos Frontera.
 - Método de Volúmenes Finitos.
- ✓ Simular, por medio del uso de métodos numéricos, el comportamiento mecánico no deseable de ciertos materiales empleados en la construcción de carreteras, tal como:
 - Deformaciones permanentes de mezclas asfálticas y materiales no tratados.
 - Agrietamientos de materiales ligados y rocas.
 - Comportamiento mecánico de interfaces entre diferentes geomateriales.
 - Efecto del agua en su respuesta mecánica.



7 BIBLIOGRAFÍA

- Abbas, A., Masad, E., Papagiannakis, T., & Shenoy, A. (2005). Modelling asphalt mastic stiffness using discrete element analysis and micromechanics-based models. *International Journal of Pavement Engineering*, 6(2), 137–146. <https://doi.org/10.1080/10298430500159040>
- Alejano Monge., L., & Ramírez Oyanguren, P. (2004). *Mecánica de Rocas, Fundamentos e Ingeniería de Taludes*.
- ARDIÇ, Ö. (2006). *ANALYSIS OF BEARING CAPACITY USING DISCRETE ELEMENT METHOD* (Vol. 1999, Issue December).
- Arenas Lozano, H. L. (2003). *Tecnología del Cemento Asfáltico* (Segunda Ed).
- Barbosa, R., & Ghaboussi. (1992). Discrete Finite Element Method. *Journal of Engineering Computations*, 9, 253–266.
- Blanco, L. M. (2002). Programación en Visual Basic .NET. *Desarrollo de Software, Guía*, 91(34), 723.
- Cai, W., McDowell, G. R., & Airey, G. D. (2013). Discrete element modelling of uniaxial constant strain rate tests on asphalt mixtures. *Granular Matter*, 15(2), 163–174. <https://doi.org/10.1007/s10035-013-0396-x>
- Cai, W., McDowell, G. R., & Airey, G. D. (2014). Discrete element visco-elastic modelling of a realistic graded asphalt mixture. *Soils and Foundations*, 54(1), 12–22. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2013.12.002>
- Chen, J., Huang, B., Chen, F., & Shu, X. (2012). Application of discrete element method to Superpave gyratory compaction. *Road Materials and Pavement Design*, 13(3), 480–500. <https://doi.org/10.1080/14680629.2012.694160>
- Chen, J., Pan, T., Chen, J., Huang, X., & Lu, Y. (2012). Predicting the dynamic behavior of asphalt concrete using three-dimensional discrete element method. *Journal Wuhan University of Technology, Materials Science Edition*, 27(2), 382–388. <https://doi.org/10.1007/s11595-012-0470-y>
- Chen, J., Pan, T., & Huang, X. (2011). Discrete element modeling of asphalt concrete cracking using a user-defined three-dimensional micromechanical approach. *Journal Wuhan University of Technology, Materials Science Edition*, 26(6), 1215–1221. <https://doi.org/10.1007/s11595-011-0393-z>
- Cundall, P. A., & Strack, O. . (1979). A discrete Numerical Model for Granular Assemblies. *Geotechnique*, 29, 47–65. <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:A+dis+crete+numerical+model+for+granular+assemblies#0>
- Ding, X., Ma, T., Zhang, W., Zhang, D., & Yin, T. (2018). Effects by property homogeneity of aggregate skeleton on creep performance of asphalt concrete. *Construction and Building Materials*, 171, 205–213.



<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.150>

- Dondi, G., Simone, A., Vignali, V., & Manganelli, G. (2012). Discrete Element Modelling of Influences of Grain Shape and Angularity on Performance of Granular Mixes for Asphalts. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 53(1982), 399–409. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.891>
- Dondi, G., Vignali, V., Pettinari, M., Mazzotta, F., Simone, A., & Sangiorgi, C. (2014). Modeling the DSR complex shear modulus of asphalt binder using 3D discrete element approach. *Construction and Building Materials*, 54, 236–246. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.005>
- Feng, H., Pettinari, M., & Stang, H. (2015). Study of normal and shear material properties for viscoelastic model of asphalt mixture by discrete element method. *Construction and Building Materials*, 98, 366–375. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.116>
- Garnica Anguas, P., Gómez López, J. A., & Sesma Martinez, J. A. (2002). Mecánica de Materiales para Pavimentos. *Instituto Mexicano Del Transporte*, 197(197), 234. <https://bit.ly/3s6lGgu>
- Garnica, P., Flores, M., Delgado, H., & Gómez, J. (2005). Caracterización geomecánica de mezclas asfálticas. *Secretaría De Comunicaciones Y Transportes*, 267, 1–105.
- International Center for Numerical Method. (2012). *Continuum Modelling using the Discrete Element Method. Theory and Implementation in an Object –Oriented Software Platform*”.
- Kim, H., Wagoner, M. P., & Buttlar, W. G. (2009). Micromechanical fracture modeling of asphalt concrete using a single-edge notched beam test. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 42(5), 677–689. <https://doi.org/10.1617/s11527-008-9412-8>
- Labra Gonzalez, C. A. (2012). Advances in the development of the discrete element method for excavation processes. In *PhD thesis submitted to Universitat Politecnica de Catalunya* (Issue September).
- Lee, Y. W. (2006). *Discrete element modelling of idealised asphalt mixture* (Issue June). University of Nottingham.
- Leguizamo Echeverri, J., & Vega Duarte, J. (2016). *OBTENCIÓN DE LAS LEYES DE FATIGA POR REFLEXIÓN EN MEZCLAS ASFÁLTICAS MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS DISCRETOS* (Issue June). <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/21194/LeguizamoEcheverriJhonatanAlexander2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Liu, P., Chen, J., Lu, G., Wang, D., Oeser, M., & Leischner, S. (2019). Numerical simulation of crack propagation in flexible asphalt pavements based on cohesive zone model developed from asphalt mixtures. *Materials*, 12(8).



<https://doi.org/10.3390/ma12081278>

Liu, Y., & You, Z. (2008). Simulation of Cyclic Loading Tests for Asphalt Mixtures Using User Defined Models within Discrete Element Method. *GeoCongress 2008*, 742–749. [https://doi.org/10.1061/40972\(311\)92](https://doi.org/10.1061/40972(311)92)

Liu, Y., & You, Z. (2011). Accelerated Discrete-Element Modeling of Asphalt-Based Materials with the Frequency-Temperature Superposition Principle. *Journal of Engineering Mechanics*, 137(5), 355–365. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)em.1943-7889.0000234](https://doi.org/10.1061/(asce)em.1943-7889.0000234)

Luna, F. O. (2011). *Guía Definitiva Del Programador*.

Ma, T., Zhang, D. yu, Zhang, Y., Zhao, Y. li, & Huang, X. ming. (2016). Microstructure modeling and virtual test of asphalt mixture based on three-dimensional discrete element method. *Journal of Central South University*, 23(6), 1525–1534. <https://doi.org/10.1007/s11771-016-3204-z>

Ma, T., Zhang, D., Zhang, Y., Wang, S., & Huang, X. (2018). Simulation of wheel tracking test for asphalt mixture using discrete element modelling. *Road Materials and Pavement Design*, 19(2), 367–384. <https://doi.org/10.1080/14680629.2016.1261725>

Mahabadi, O. K., Grasselli, G., & Munjiza, A. (2009). Numerical modelling of a Brazilian Disc test of layered rocks using the combined finite-discrete element method. *Proceedings of the 3rd CANUS Rock Mechanics Symposium, 2009(May)*, 1–9.

Mahmoud, E., Masad, E., & Nazarian, S. (2010). Discrete Element Analysis of the Influences of Aggregate Properties and Internal Structure on Fracture in Asphalt Mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22(1), 10–20. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0000005](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000005)

Matuttis, H. G., Luding, S., & Herrmann, H. J. (2000). Discrete element simulations of dense packings and heaps made of spherical and non-spherical particles. *Powder Technology*, 109, 278–292.

Mintransporte, & Invías. (2008). *Guía Metodológica para el Diseño de Obras de Rehabilitación de Pavimentos Asfálticos de Carreteras*.

Mintransporte, & Invías. (2013). *Normas de Ensayos de Materiales*.

Mintransporte, & Invías. (2022). *Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras*.

Nian, T., Ge, J., Li, P., Wang, M., & Mao, Y. (2021). Improved discrete element numerical simulation and experiment on low-temperature anti-cracking performance of asphalt mixture based on PFC2D. *Construction and Building Materials*, 283, 122792. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122792>

Papagiannakis, A. T., & Masad, E. A. (2008). *Pavement Design and Materials*.



- Qian, G., Hu, K., Li, J., Bai, X., & Li, N. (2020). Compaction process tracking for asphalt mixture using discrete element method. *Construction and Building Materials*, 235, 117478. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117478>
- Rieth, M., & Schommers, W. (2005). Overview of Multiscale Simulations of Materials. In *Handbook of theoretical and computational nanotechnology: Vol. X*.
- Romanel, L. J. M. M., & Valverde, C. (2011). *Simulación del fisuramiento en mezclas asfálticas por el método de elementos discretos*.
- Santasusana, I. M. (2012). Continuum modelling using the Discrete Element Method. Theory and implementation in an object-oriented software platform. *Cimne*, 381.
- The Engineering ToolBox*. (2001). <https://www.engineeringtoolbox.com/>
- Wang, H., Behnia, B., Buttlar, W. G., & Reis, H. (2020). Development of two-dimensional micromechanical, viscoelastic, and heterogeneous-based models for the study of block cracking in asphalt pavements. *Construction and Building Materials*, 244, 118146. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118146>
- Wang, H., Huang, W., Cheng, J., & Ye, G. (2021). Mesoscopic creep mechanism of asphalt mixture based on discrete element method. *Construction and Building Materials*, 272, 121932. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121932>
- Xue, B., Pei, J., Zhou, B., Zhang, J., Li, R., & Guo, F. (2020). Using random heterogeneous DEM model to simulate the SCB fracture behavior of asphalt concrete. *Construction and Building Materials*, 236, 117580. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117580>
- You, Z., & Buttlar, W. G. (2004). Discrete Element Modeling to Predict the Modulus of Asphalt Concrete Mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 16(2), 140–146. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0899-1561\(2004\)16:2\(140\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0899-1561(2004)16:2(140))
- Zhang, Y., Ma, T., Ding, X., Chen, T., Huang, X., & Xu, G. (2018). Impacts of air-void structures on the rutting tests of asphalt concrete based on discretized emulation. *Construction and Building Materials*, 166, 334–344. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.141>
- Zhou, X., Chen, S., Ge, D., Jin, D., & You, Z. (2020). Investigation of asphalt mixture internal structure consistency in accelerated discrete element models. *Construction and Building Materials*, 244, 118–272. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118272>



ANEXOS

- Anexo 01 - Manual de usuario del aplicativo asociado al modelo computacional propuesto.
- Anexo 02 - Resultados crudos de las simulaciones ejecutadas del ensayo de tracción indirecta.
- Anexo 03 - Código Fuente desarrollado en Visual Basic .NET.
- Anexo 04 – Video explicativo para el empleo de la aplicación.
- Anexo 05 – Resultados de ensayos de caracterización para efectos de validación del modelo computacional.
- Anexo 06 – Instalador.

