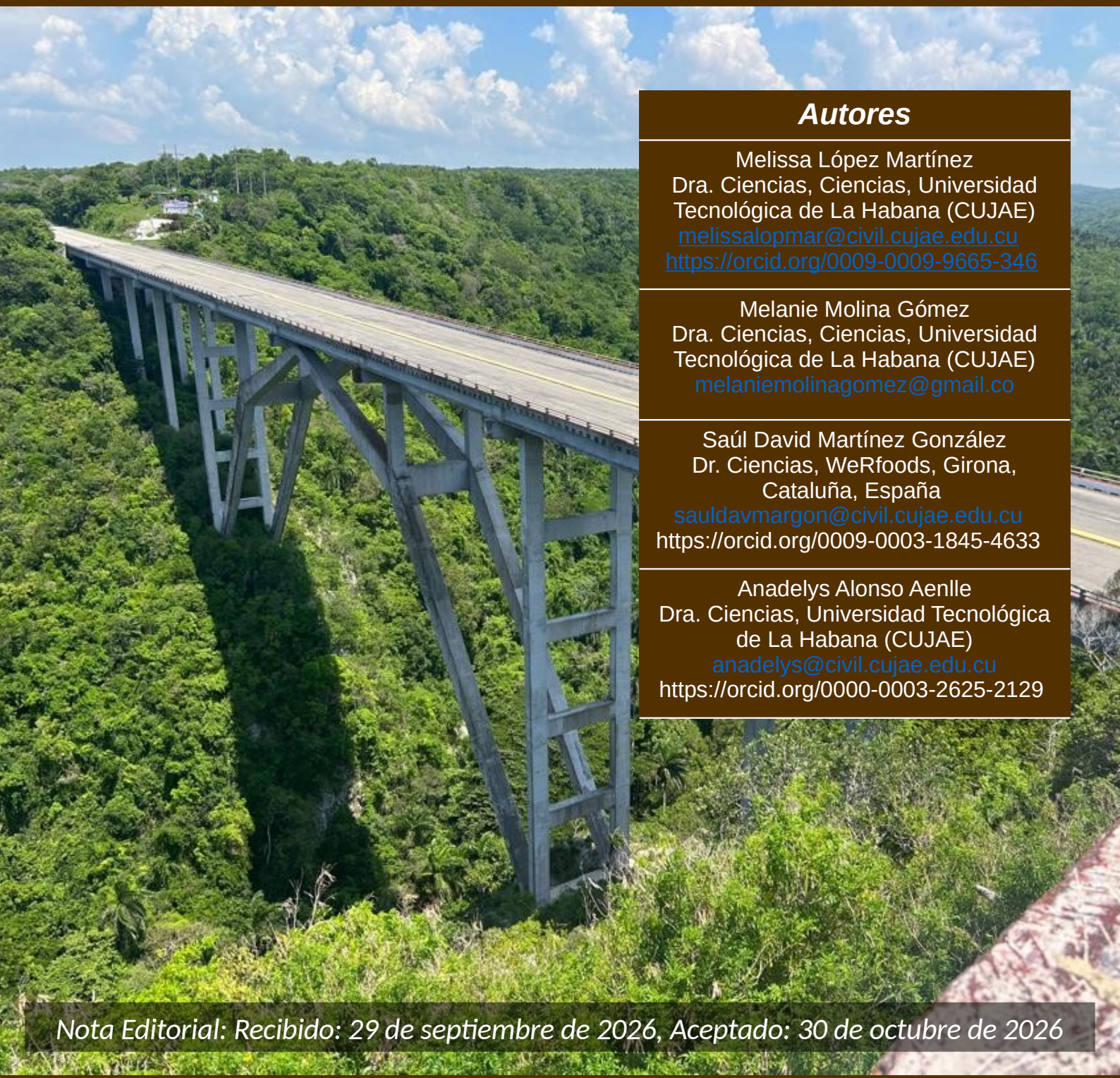
4

Evaluación De La Arena Y El Hormigón En El Comportamiento De Un Pavimento De Adocretos

Evaluation of Sand and Concrete on the Performance of a Concrete Paver Pavement



Autores

Melissa López Martínez
Dra. Ciencias, Ciencias, Universidad Tecnológica de La Habana (CUJAE)
melissalopmar@civil.cujae.edu.cu
https://orcid.org/0009-0009-9665-346

Melanie Molina Gómez
Dra. Ciencias, Ciencias, Universidad Tecnológica de La Habana (CUJAE)
melaniemolinagomez@gmail.co

Saúl David Martínez González
Dr. Ciencias, WeRfoods, Girona, Cataluña, España
sauldavmargon@civil.cujae.edu.cu
https://orcid.org/0009-0003-1845-4633

Anadelys Alonso Aenlle
Dra. Ciencias, Universidad Tecnológica de La Habana (CUJAE)
anadelys@civil.cujae.edu.cu
https://orcid.org/0000-0003-2625-2129

Nota Editorial: Recibido: 29 de septiembre de 2026, Aceptado: 30 de octubre de 2026

4 Evaluación De La Arena Y El Hormigón En El Comportamiento De Un Pavimento De Adocretos



Resumen

El empleo de pavimentos articulados con adocretos se ha incrementado en los últimos años en Cuba, particularmente en áreas de uso peatonal y en vialidades de tráfico ligero y medio, destacándose su aplicación en la Zona de Desarrollo Mariel. No obstante, a pesar de su creciente utilización, no existe actualmente una norma nacional que regule el diseño estructural de este tipo de pavimentos. En este contexto, la presente investigación se desarrolla como un antecedente a la futura elaboración de una norma de diseño para pavimentos de adocretos, con el objetivo de evaluar la influencia de los parámetros de diseño calidad de la arena y sus modelos constitutivos, y la calidad del hormigón y sus modelos de comportamiento, en el comportamiento tenso–deformacional de los pavimentos de adocretos. El estudio se apoya en un análisis estadístico multifactorial que incluye ANOVA, diagramas de Pareto, efectos principales y gráficas de interacción, evaluando de manera integral la influencia de cada factor sobre las tensiones verticales a compresión, las deformaciones verticales unitarias y la deflexión del sistema. Los resultados obtenidos evidencian que los parámetros asociados a la arena, en particular su calidad y el modelo constitutivo que se adopte, ejercen una influencia dominante en el comportamiento tenso-deformacional del pavimento articulado, mientras que los factores relacionados con el adocreto presentan una incidencia secundaria debido a la elevada rigidez de estos materiales.

Palabras Clave

Interlocking concrete block pavements, mechanical interlock, constitutive models, statistical analysis, numerical modeling.

Research Paper

4 *Evaluation of Sand and Concrete on the Performance of a Concrete Paver Pavement*



Abstract

The use of interlocking concrete block pavements has increased in Cuba in recent years, particularly in pedestrian areas and on roads with light to medium traffic, with notable applications in the Mariel Development Zone. However, despite their growing use, there is currently no national standard regulating the structural design of this type of pavement. In this context, this research serves as a precursor to the future development of a design standard for concrete block pavements; it aims to evaluate how design parameters—specifically sand quality and its constitutive models, as well as concrete quality and its behavioral models—influence the stress-strain behavior of these pavements. The study relies on a multifactorial statistical analysis—including ANOVA, Pareto charts, main effects, and interaction plots—to comprehensively evaluate the influence of each factor on vertical compressive stresses, vertical strains, and system deflection. The results demonstrate that parameters associated with the sand—particularly its quality and the chosen constitutive model—exert a dominant influence on the stress-strain behavior of the interlocking pavement, whereas factors related to the concrete blocks themselves have a secondary impact due to the high stiffness of these materials.

Keywords

Interlocking concrete block pavements, mechanical interlock, constitutive models, statistical analysis, numerical modeling.

1. INTRODUCCIÓN

Los pavimentos articulados con adocretos están constituidos por una capa de rodadura, conformada por bloques de hormigón (adocretos), dispuestos sobre una cama de arena, la cual a su vez se coloca sobre capas granulares (base y subbase), y estas sobre la subrasante [1-4]. Su comportamiento está determinado por el fenómeno de trabazón mecánica, definido como la imposibilidad del movimiento aislado de los adocretos, el cual funciona como un proceso eficiente de disipación de tensiones y control de desplazamientos [2, 5, 6]. El mismo depende de las características de sus componentes, tales como el espesor y la forma de los adocretos, el patrón de colocación, el ancho de las juntas y el espesor de la cama de arena, así como de los materiales de los adocretos, la capa de arena y las capas granulares. Estudios nacionales [2] e internacionales [7-11] han confirmado que las variaciones en estos parámetros influyen en las tensiones, deformaciones y deflexiones del pavimento.

Se ha demostrado que el incremento del espesor de adocreto de 80 mm a 100 mm conduce a una disminución de tensiones [2, 12, 13], sin embargo, el uso de adocretos de 100 mm para tráfico ligero no aporta diferencias significativas [14, 15]. Los adocretos con forma rectangular se asocian a estados tensionales más desfavorables [2], mientras que las geometrías onduladas favorecen a la trabazón mecánica [2, 16]. Los adocretos colocados en forma perpendicular a la dirección del tráfico [17, 18] presentan mejor rendimiento. Panda y Gosh [14] compararon hormigones mayores a 30 MPa, encontrando que el aumento de la resistencia no reduce la deflexión total, sin embargo, este resultado podría estar asociado a que el análisis fue realizado dentro del rango elástico del material, lo cual limita la representación de los mecanismos reales de daño y plasticidad que caracterizan al hormigón bajo cargas repetitivas.

El ancho de las juntas debe mantenerse entre 2 y 7 mm [15, 19, 20]. El espesor de la cama de arena varía entre 20 y 60 mm [11, 21], el cual influye en la respuesta estructural del pavimento. Varios estudios [11, 15, 21] han demostrado que el uso de espesores superiores a 50 mm y menores de 30 mm afecta la capacidad estructural del pavimento. Martínez y otros [2] observaron que el incremento del espesor de 30 mm a 50 mm se asocia a mayores tensiones, deformaciones y deflexiones, lo que indica un comportamiento estructural desfavorable.

En cuanto a las capas granulares y la subrasante, Beaty [22] propone valores de CBR de 60% para la base y 40% para la subbase, asumiendo un CBR de la subrasante de entre 2% y 8%. Según Navarro y otros [5], la capacidad portante de la subrasante depende de su densidad, humedad y tipo de suelo, siendo determinante para definir el espesor de las capas granulares.

Tradicionalmente, los materiales de los pavimentos de adocretos han sido modelados bajo el supuesto de un comportamiento lineal elástico. Sin embargo, múltiples investigaciones [23, 24] han demostrado que tanto las capas granulares como la subrasante presentan un comportamiento no lineal [2]. Bajo cargas típicas de pavimentos articulados, los adocretos experimentan tensiones de tracción en la fibra inferior, esfuerzos cortantes localizados y rotaciones angulares en las zonas de contacto [22], concentrando elevadas tensiones en zonas estrechas [25]. Este estado tensional hace indispensable la utilización de modelos de daño que permitan caracterizar el deterioro progresivo del material [25]. El modelo elastoplástico desarrollado por Truty [26] permite describir el deterioro mediante variables de daño diferenciadas para tracción y compresión. Mientras que, modelos avanzados de daño plástico del hormigón [25, 27] describen las tensiones nominales que se definen sobre el área total, incluyendo zonas dañadas.

Houben y otros [28] demostraron que los pavimentos de adocretos presentan un proceso de endurecimiento con el tiempo debido a la repetición de cargas. Para describir el comportamiento de la arena se han desarrollado modelos constitutivos de tipo avanzado [29-32], destacando los modelos Mohr-Coulomb [29] y *Hardening Soil* (HS) [32]. Estos modelos incorporan características propias de la respuesta granular: elasticidad no lineal, rigidez variable según el nivel de tensiones, endurecimiento tanto volumétrico como desviador, comportamientos previos a la falla no lineales e incluso, efectos de dilatancia dependientes de la energía interna del material [33].

En pavimentos de adocretos, la evolución de la investigación ha conducido desde el empleo de modelos analíticos clásicos, como los de Boussinesq o Westergaard, hacia modelos numéricos avanzados, principalmente el método de los elementos finitos (MEF), debido a que permiten modelar con mayor exactitud cada una de las características de un pavimento de adocretos [2]. En pavimentos de adocretos, el MEF se emplea para representar la interacción tridimensional entre los adocretos, la arena de junta, la cama de asiento y las capas granulares subyacentes. Esto posibilita obtener tensiones y deformaciones en cada adocreto, así como estudiar mecanismos de transferencia de cargas, deformaciones diferenciales y efectos del patrón de colocación [34, 35]. Entre los softwares más utilizados para problemas de análisis tensodeformacional empleando el MEF se encuentran PLAXIS 3D, ABAQUS, DYNA 3D, entre otros [2, 34].

El objetivo de esta investigación es evaluar la influencia de los parámetros de diseño calidad de la arena y sus modelos constitutivos, y la calidad del hormigón y sus modelos de comportamiento, en el comportamiento tenso–deformacional de los pavimentos de adocretos.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se realiza un diseño de experimento para evaluar la influencia de los materiales arena y hormigón en el comportamiento estructural de un pavimento de adocretos. El estudio se concibe como un análisis paramétrico multifactorial, el cual se organiza utilizando un análisis factorial completo, lo que implica evaluar la influencia significativa de las variables independientes en las variables dependientes y la interacción entre ellas.

2.1. VARIABLES INDEPENDIENTES

Las variables independientes consideradas en esta investigación se centran en los parámetros mecánicos de los materiales que integran el pavimento, específicamente en la arena de la cama y la junta, y en el hormigón de los adocretos. A continuación, se describen cada una de ellas y los criterios que sustentan la definición de sus niveles.

Modelo constitutivo de la arena (Ma)

Dado que la arena presenta una respuesta elasto-plástica, se conciben dos modelos constitutivos de la arena con niveles de complejidad distintos. Como nivel -1 se encuentra Mohr-Coulomb (MC), pues es un modelo elastoplástico lineal, ampliamente utilizado como aproximación inicial; este permite describir el inicio de la plasticidad mediante la envolvente de falla, pero no reproduce la variación del módulo de elasticidad con el nivel de tensiones ni los efectos de rigidez secante. Como nivel +1 se desarrolla *Hardening Soil* (HS), modelo que describe un comportamiento no lineal en carga y descarga, dependiente del confinamiento y endurecimiento por deformación, este representa de manera más realista el comportamiento de la arena en los pavimentos de adocretos.

Modelo constitutivo del hormigón (Mh)

En el análisis numérico se comparan los efectos del nivel -1 modelo lineal elástico (LE), con el nivel +1 modelo de daño en el hormigón (CONC). El modelo lineal elástico es un modelo simplificado que asume que el hormigón se comporta de manera completamente elástica, independiente del nivel de carga. Mientras, el modelo de daño en el hormigón permite simular la degradación de la rigidez, el inicio de fisuras y la evolución del deterioro ante solicitaciones crecientes; representación más realista del comportamiento material.

Calidad de la arena (Ar)

Estudios experimentales sobre materiales granulares y arenas sometidas a ensayos triaxiales y cargas repetidas reportan módulos de elasticidad en rangos del orden de 20 a 100 MPa [36, 37], dependiendo del estado de compactación y nivel de confinamiento. En este estudio se consideran dos niveles de rigidez para la arena de asiento y de junta: 35 MPa (nivel -1) y 60 MPa (nivel +1). El valor inferior representa una arena de comportamiento más compresible, susceptible a mayores deformaciones locales y a un incremento de las tensiones transferidas hacia las capas inferiores. El nivel superior, por el contrario, simula un material granular con mayor calidad que reduce la deformabilidad del conjunto.

Calidad del hormigón (Ca)

El hormigón es un material compuesto altamente dependiente de su microestructura, por tanto, variaciones en su resistencia a la compresión modifican la magnitud de los esfuerzos admisibles y la capacidad del pavimento para soportar cargas repetidas. Se utilizan hormigones de resistencia 30 MPa (nivel -1) y 55 MPa (nivel +1), seleccionados a partir de la NC-998: 2014 [38].

2.2.PARÁMETROS GEOMÉTRICOS Y CONSTRUCTIVOS CONSTANTES EN EL ANÁLISIS DEL PAVIMENTO

En la tabla 1 se presentan los parámetros constructivos que inducen las condiciones de deflexión, deformación y tensiones más desfavorables según la bibliografía consultada [2, 14-16, 19, 39].

Tabla 1- Parámetros geométricos y constructivos constantes en el análisis del pavimento.

Parámetro	Característica
Forma de adocreto	Rectangular
Patrón de colocación del adocreto	Corredor
Espesor del adocreto	80 mm
Espesor de la cama de arena	50 mm
Consideración de interfase adocreto-junta de arena	Si

Mantener constantes estos parámetros garantiza que las variaciones observadas en las respuestas del pavimento se deban exclusivamente a los factores que constituyen el objetivo de esta investigación: la calidad de la arena y del hormigón, así como los modelos constitutivos utilizados para la representación de su comportamiento.

2.3. VARIABLES DEPENDIENTES

Las variables dependientes corresponden a las respuestas estructurales obtenidas del modelo 3D del pavimento, y constituyen los indicadores principales del estado tenso-deformacional: tensión normal de compresión, deformación vertical unitaria y deflexión a nivel de subrasante (figura 1).

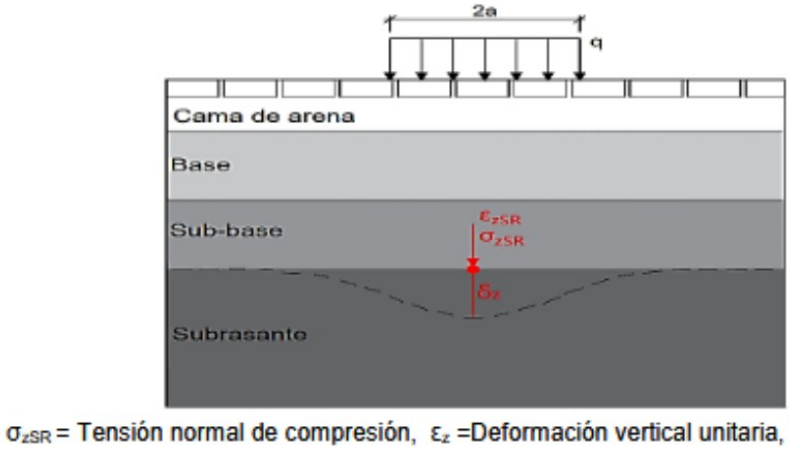


Fig. 1. Ubicación de las variables dependientes en el pavimento de adocretos.

2.4. DISEÑO DE EXPERIMENTO

El diseño del experimento responde a la necesidad de evaluar, de manera simultánea y sistemática, la influencia de los parámetros mecánicos seleccionados sobre el comportamiento tenso–deformacional del pavimento articulado. Para ello se empleó un diseño factorial completo 2^4, el cual permite estudiar todas las combinaciones posibles de las variables independientes definidas: la calidad de la arena (Ar), el modelo constitutivo de la arena (Ma), la calidad del hormigón (Ca) y el modelo constitutivo del hormigón (Mh).

Este tipo de diseño resulta particularmente adecuado cuando se pretende identificar no solo los efectos individuales de cada factor, sino también la manera en que interactúan entre sí para modificar la respuesta estructural. Los diseños factoriales completos ofrecen una base experimental sólida, evitando sesgos en la estimación de efectos y garantizando una adecuada interpretación estadística mediante modelos de análisis de varianza (ANOVA). Cada variable independiente se evalúa en 2 niveles representativos de las condiciones contrastantes de los materiales, como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2- Variables independientes del estudio.

Parámetro	Símbolo	Nivel (-)	Nivel (+)
Calidad del hormigón del adocreto (f'c)	Ca	30 MPa	55 MPa
Calidad de la arena (E)	Ar	35 MPa	60 MPa
Modelo constitutivo del hormigón	Mh	Lineal elástico (LE)	*Concrete* (CONC)
Modelo constitutivo de la arena	Ma	Mohr-Coulomb (MC)	*Hardening Soil* (HS)

La estructura factorial completa utilizada combina estos 4 factores con 2 niveles cada uno, generando un total de 16 variantes. Esta cantidad es suficiente para evaluar efectos principales e interacciones de primer y segundo orden, lo cual proporciona una caracterización integral del sistema sin pérdida de grados de libertad.

El procesamiento y análisis estadístico de los resultados se realiza mediante el software STATGRAPHICS CENTURION donde se genera la matriz experimental, la cual constituye la base para la creación de los modelos numéricos en PLAXIS 3D. La secuencia de simulaciones numéricas asegura que cada combinación de factores sea evaluada con independencia del orden de ejecución, preservando la aleatorización y reduciendo la influencia de sesgos asociados al software o al operador. La matriz presentada en la tabla 3 se compone mediante 4 columnas. Cada columna define una variable independiente, donde para la primera variable (A), se van alternando los dos niveles (-1 y 1) de uno en uno en cada una de las filas de la columna. Para la segunda variable (B) se alternan los niveles de la variable en cuestión de dos en dos. Luego, para la tercera (C) de cuatro en cuatro y para la cuarta (D) de 8 en 8, de esta forma quedan definidas las 16 combinaciones.

Tabla 3- Matriz de experimentación.

A	B	C	D	Modelo	No.
Ma	Mh	Ar	Ca		
-1	-1	-1	-1	Ca30_Ar35_LE_MC	1
+1	-1	-1	-1	Ca30_Ar35_LE_HS	2
-1	+1	-1	-1	Ca30_Ar35_CONC_MC	3
+1	+1	-1	-1	Ca30_Ar35_CONC_HS	4
-1	-1	+1	-1	Ca30_Ar60_LE_MC	5
+1	-1	+1	-1	Ca30_Ar60_LE_HS	6
-1	+1	+1	-1	Ca30_Ar60_CONC_MC	7
+1	+1	+1	-1	Ca30_Ar60_CONC_HS	8
-1	-1	-1	+1	Ca55_Ar35_LE_MC	9
+1	-1	-1	+1	Ca55_Ar35_LE_HS	10
-1	+1	-1	+1	Ca55_Ar35_CONC_MC	11
+1	+1	-1	+1	Ca55_Ar35_CONC_HS	12
-1	-1	+1	+1	Ca55_Ar60_LE_MC	13
+1	-1	+1	+1	Ca55_Ar60_LE_HS	14
-1	+1	+1	+1	Ca55_Ar60_CONC_MC	15
+1	+1	+1	+1	Ca55_Ar60_CONC_HS	16

El objetivo del contraste estadístico es determinar si las variaciones introducidas en las variables independientes y en sus interacciones generan cambios estadísticamente significativos en las variables dependientes que caracterizan el estado tenso–deformacional del pavimento de adocretos. Para el análisis estadístico se formulan las siguientes hipótesis:

Hipótesis nula (H_0): Las variables independientes consideradas y las interacciones entre ellas no influyen de manera significativa en el valor de las variables dependientes del estudio.

Hipótesis alternativa (H_1): Al menos una de las variables independientes consideradas o alguna de las interacciones entre ellas influye de manera significativa en el valor de las variables dependientes del estudio.

El contraste de hipótesis se realiza empleando un nivel de significancia del 5%, valor comúnmente aceptado en estudios de ingeniería y análisis experimental. Este establece un nivel de confianza del 95% para la aceptación o rechazo de la hipótesis nula.

Para evaluar la significancia estadística de los efectos se emplea el análisis de varianza (ANOVA), procedimiento mediante el cual la variabilidad total observada en las variables dependientes se descompone en componentes atribuibles a los efectos principales de las variables independientes, a las interacciones entre ellas y al error experimental [40].

El criterio de decisión se basa en el P-valor asociado a cada efecto. Aquellos efectos cuyo P-valor resulte menor que 0,05 se consideran estadísticamente significativos, rechazándose la hipótesis nula para dichos casos; identificando de manera objetiva los parámetros que ejercen mayor influencia sobre la respuesta estructural del pavimento.

Como complemento al análisis numérico del ANOVA se analizan: diagramas de Pareto para identificar significancia de cada factor e interacción, gráficos de efectos principales para predecir la tendencia y el sentido de la influencia de cada variable independiente, y los gráficos de interacción para verificar el efecto que genera la combinación de los factores en el comportamiento estructural del pavimento.

2.5. MODELO COMPUTACIONAL DEL PAVIMENTO DE ADOCRETOS

El comportamiento global del sistema está estrechamente relacionado con la correcta interacción entre las diferentes capas del pavimento articulado. Cada material debe ser representado respetando sus propiedades mecánicas y características geométricas, con el objetivo de reproducir de manera adecuada su respuesta estructural frente a la acción de cargas externas.

En este sentido, el modelo computacional desarrollado en la presente investigación se enfoca en: la representación detallada de la geometría del sistema, las propiedades mecánicas de los materiales que lo componen y las condiciones de carga y contorno aplicadas. A partir del estudio bibliográfico realizado [2, 34], se establece que cada elemento del sistema debe ser modelado de forma precisa, respetando en la medida de lo posible su forma y dimensiones, y aplicando simplificaciones por simetría siempre que estas no comprometan la validez de los resultados, con el fin de reducir al máximo el tamaño del modelo y el tiempo de cálculo.

Definición geométrica del modelo

La geometría del modelo numérico desarrollado se establece a partir de criterios de calibración previamente validados en investigaciones antecedentes, particularmente en la investigación realizada por Martínez y otros [2], lo cual permite reducir el tamaño del modelo sin afectar la estabilidad de los resultados.

La longitud horizontal del modelo se define como 11 veces el valor del radio a la derecha del centro del área de aplicación de la carga. Por lo que la extensión horizontal del modelo es de 1,66 m a ambos lados del centro de la carga aplicada [2]. La profundidad o espesor total del modelo es de 2 metros [2].

El pavimento está conformado por una capa de rodadura articulada de adocretos de 80 mm de espesor, apoyados sobre una cama de arena de 50 mm y con juntas de arena de 3 mm; por debajo de la cama de arena se disponen las capas base y subbase, ambas con un espesor de 200 mm. La subrasante completa la estructura del pavimento con un espesor de 1,47 m alcanzado la profundidad total del modelo de 2 m.

Desde el punto de vista geométrico, los adocretos empleados en el modelo presentan dimensiones de 240 mm de longitud, 120 mm de ancho y 80 mm de espesor. Estos se disponen en forma de corredor según las características más desfavorables de la investigación de Martínez y otros [2].

La estructura fue modelada considerando como condiciones de borde la restricción de los desplazamientos horizontales y verticales para todas las direcciones del modelo, excepto para la dirección de aplicación de la carga [2]; lo que permite reproducir de forma adecuada el mecanismo de trabazón característico de estos pavimentos.

Se emplea una densidad de malla “muy fina” con un factor de variación de 0,5 para la capa de rodadura articulada, base y subbase, lo cual fue obtenido por Martínez y otros [2] midiendo la tensión de compresión, la deformación unitaria y la deflexión en la subrasante como variables de control.

Condiciones de carga

La carga aplicada al modelo representa la acción de un eje simple con ruedas duales. Dada la configuración del eje (ESRD) y la carga de cálculo empleada (100 kN) por cada extremo de este le corresponden 50 kN y por cada rueda de estos 25 kN, con una presión de inflado de 0,7 MPa o 700 kPa [2]. Esta carga queda distribuida sobre un área circular, con un radio de 0,15079 m, concentrándose de manera estática en la superficie del pavimento. En la figura 2 se presenta el modelo y mallado realizado en el PLAXIS 3D.

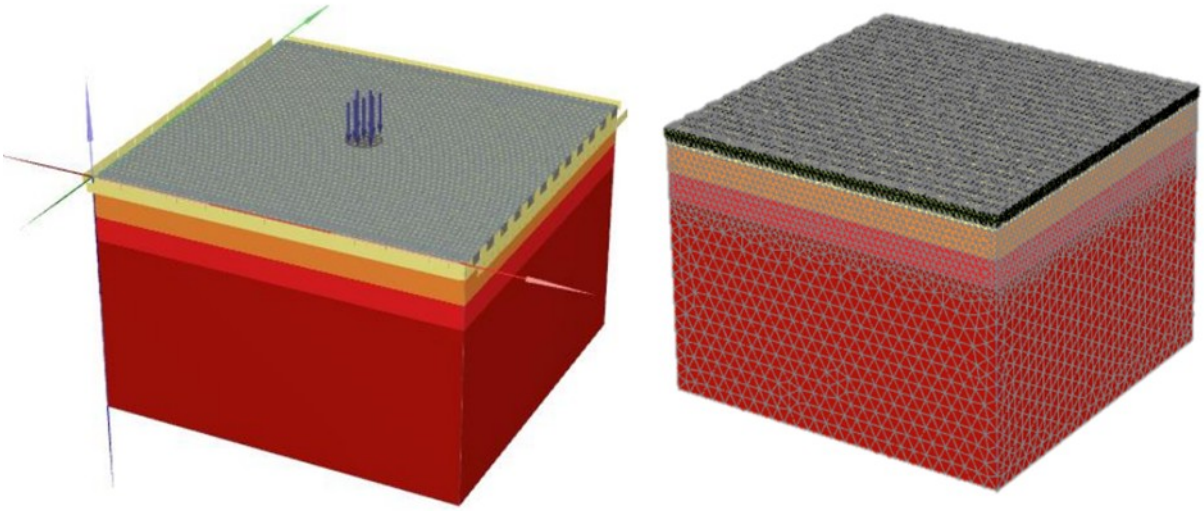


Fig. 2. Representación del modelo en PLAXIS 3D y el mallado utilizado.

Materiales

Los materiales modelados en el PLAXIS 3D obedecen a la definición de las variables independientes. En la tabla 4 se presentan los parámetros mecánicos que se mantienen constantes y la calidad asignada a cada capa.

Tabla 4- Parámetros mecánicos y calidad de los materiales empleados.

Material	Coeficiente de Poisson (υ)	Cohesión (c) (kPa)	Ángulo de fricción interna (φ) (º)	Calidad (MPa)
Hormigón de adocretos	0,15	-	-	f'c = 30 MPa
				f'c = 55 MPa
Arena	0,20	1	35	E = 35 MPa
				E = 30 MPa
Base	0,35	10	30	500
Subbase	0,35	10	30	300
Subrasante	0,35	10	30	150

Adicionalmente, se introduce un factor de interfase entre los adocretos y la arena con un valor de 0,67 y un modelo constitutivo de estado crítico simple [41]; con el fin de representar la reducción de la resistencia efectiva del contacto y simular de manera más realista el comportamiento de la interfase adocreto–arena.

3. RESULTADOS

Se presentan y analizan los resultados obtenidos (tensiones, deflexiones y deformaciones) a partir de la aplicación del MEF a través del PLAXIS 3D, considerando las diferentes combinaciones de los parámetros de diseño definidos anteriormente y empleando herramientas estadísticas como el análisis de varianza, y los diagramas de Pareto, análisis de efectos principales y de interacciones.

3.1. Comportamiento tenso-deformacional de un pavimento de adocretos

La tabla 5 muestra los valores de tensiones de compresión, deformaciones unitarias y deflexiones obtenidos a nivel de subrasante para las diferentes combinaciones de las variables independientes y sus niveles.

Los menores valores de tensiones y deformaciones se obtienen para combinaciones donde se mantiene la calidad de la arena de 60 MPa. La menor deflexión se obtiene en combinaciones de variables donde se emplea el modelo de daño como modelo constitutivo del hormigón.

Tabla 5- Valores de tensiones a compresión (σ_{zSR}), deformaciones verticales unitarias (ε_z) y deflexiones (δ_z).

No.	Modelo	σ_z(kPa)	ε_z	δ_z(m)
1	Ca30_Ar35_LE_MC	116,9	0,001337	0,0003794
2	Ca30_Ar35_LE_HS	112,7	0,001299	0,0003829
3	Ca30_Ar35_CONC_MC	116,9	0,001337	0,0003794
4	Ca30_Ar35_CONC_HS	112,7	0,001299	0,0003829
5	Ca30_Ar60_LE_MC	112,1	0,001290	0,0003611
6	Ca30_Ar60_LE_HS	108,0	0,001207	0,0003641
7	Ca30_Ar60_CONC_MC	112,1	0,001290	0,0003611
8	Ca30_Ar60_CONC_HS	108,0	0,001207	0,0003641
9	Ca55_Ar35_LE_MC	116,9	0,001337	0,0003792
10	Ca55_Ar35_LE_HS	112,7	0,001299	0,0003829
11	Ca55_Ar35_CONC_MC	116,9	0,001337	0,0003792
12	Ca55_Ar35_CONC_HS	112,7	0,001299	0,0003829
13	Ca55_Ar60_LE_MC	112,0	0,001289	0,0003607
14	Ca55_Ar60_LE_HS	108,0	0,001207	0,0003641
15	Ca55_Ar60_CONC_MC	112,0	0,001289	0,0003607
16	Ca55_Ar60_CONC_HS	108,0	0,001207	0,0003641

Los resultados muestran la variación de la respuesta estructural del pavimento en función de los niveles considerados, observándose que los mayores valores de tensiones y deformaciones se obtienen para combinaciones que mantienen constantes la calidad de la arena en 35 MPa y el modelo constitutivo de la arena Mohr Coulomb, pero varían la calidad del hormigón del adocreto y su modelo constitutivo; asimismo las mayores deflexiones se obtienen para la misma calidad de arena (35 MPa) y esta vez el modelo constitutivo Hardening Soil; es decir, los mayores valores de las variables dependientes analizadas se obtienen para combinaciones que mantienen los mismos valores de calidad y modelo constitutivo de la arena, variando la calidad y el modelo constitutivo del hormigón.

3.2. ANÁLISIS DE VARIANZA ANOVA

Los resultados del análisis de varianza (ANOVA) para cada una de las variables dependientes analizadas se presentan en la tabla 6 (tensión a compresión), en la tabla 7 (deformación vertical unitaria) y la tabla 8 (deflexión).

Tabla 6- Análisis de varianza (ANOVA) para tensión a compresión (σ_{zSR}).

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Ma	68,0625	1	68,0625	136125,00	0,0000
B:Mh	0,0	1	0,0	0,0	1,0000
C:Ar	91,2025	1	91,2025	182405,00	0,0000
D:Ca	0,0025	1	0,0025	5,00	0,0756
AB	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
AC	0,0225	1	0,0225	45,00	0,0011
AD	0,0025	1	0,0025	5,00	0,0756
BC	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
BD	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
CD	0,0025	1	0,0025	5,00	0,0756
Error total	0,0025	5	0,0025		
Toral (corr.)	159,297	15			

En la tabla 6 se observa, que los factores: A: Ma (modelo constitutivo de la arena) y C: Ar (calidad de la arena) presentan influencia significativa, al mostrar valores-p inferiores a 0,05. Asimismo, la interacción AC (Ma*Ar) resulta significativa.

Tabla 7- Análisis de varianza (ANOVA) para deformaciones verticales unitarias (ε_z).

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Ma	1,45203E-8	1	1,45203E-8	290405,00	0,0000
B:Mh	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
C:Ar	1,94603E-8	1	1,94603E-8	389205,00	0,0000
D:Ca	0,0	1	0,0	5,00	0,0756
AB	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
AC	1,98025E-9	1	1,98025E-9	39605,00	0,0000
AD	0,0	1	0,0	5,00	0,0756
BC	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
BD	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
CD	0,0	1	0,0	5,00	0,0756
Error total	0,0	5	0,0		
Toral (corr.)	3,59618E-8	15			

El análisis de varianza ANOVA para la deformación, presenta a las variables A: Ma y C: Ar, así como la interacción AC (Ma*Ar) como las de mayor significancia estadística, al mostrar valores-p inferiores a 0,05.

Tabla 8- Análisis de varianza (ANOVA) para deflexiones (δ_z).

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Ma	4,624E-11	1	4,624E-11	23120,00	0,0000
B:Mh	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
C:Ar	1,38384E-9	1	1,38384E-9	691920,00	0,0000
D:Ca	0,0	1	0,0	45,00	0,0011
AB	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
AC	0,0	1	0,0	80,00	0,0003
AD	0,0	1	0,0	45,00	0,0011
BC	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
BD	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
CD	0,0	1	0,0	5,00	0,0756
Error total	0,0	5	0,0		
Toral (corr.)	1,430448E-9	15			

En la tabla 8 se evidencia, que los factores: A: Ma, C: Ar y D: Ca presentan influencia significativa, al mostrar valores-p inferiores a 0,05. Asimismo, las interacciones AC (Ma*Ar) y AD (Ma*Ca) resultan significativas. Para cada una de las variables analizadas, el resto de factores no presentan influencia. Además, se observa como la calidad y modelo constitutivo de la arena presenta mayor influencia en el comportamiento estructural del pavimento de un pavimento de adocretos.

3.3. ANÁLISIS DE DIAGRAMA DE PARETO

El análisis de los diagramas de Pareto correspondientes a la tensión vertical a compresión (figura 3), la deformación vertical unitaria (figura 4) y la deflexión (figura 5) permite identificar patrones comunes en la jerarquía de los factores que controlan la respuesta estructural del sistema.

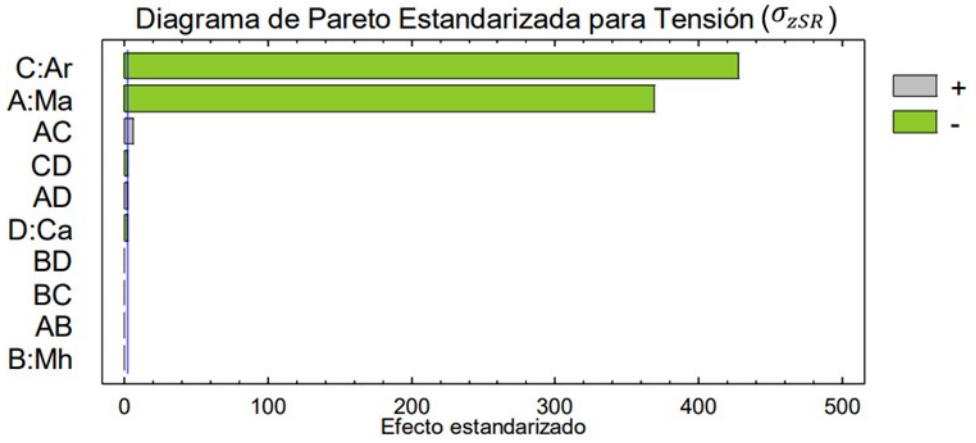


Fig. 3. Diagrama de Pareto estandarizado para tensión a compresión (σ_{zSR}).

En la figura 3 se corroboran los resultados del análisis de varianza, en el cual solo las variables A: Ma, C: Ar y la interacción entre ellas, presentan una influencia significativa. Sin embargo, el diagrama de Pareto evidencia que la calidad de la arena es la variable de mayor influencia, seguido por su modelo constitutivo. La orientación de las barras indica una relación inversa, donde el paso de la calidad de 35 MPa a 60 MPa reduce la tensión, asimismo sucede cuando se pasa de un modelo Mohr Coulomb a uno *Hardening Soil*. Además, se aprecia que la interacción entre A: Ma y C: Ar tiende a aumentar la tensión a compresión.

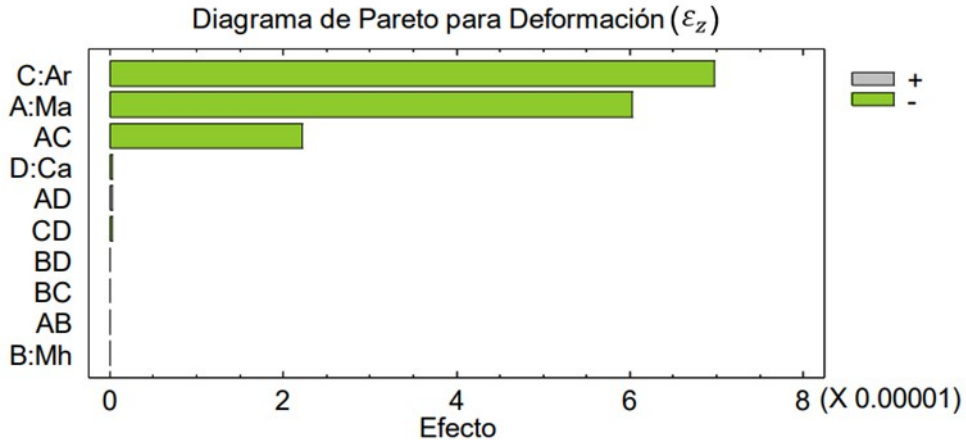


Fig. 4. Diagrama de Pareto estandarizado para deformaciones verticales unitarias (ε_z).

La figura 4 muestra un comportamiento similar, identificando a C: Ar y A: Ma como los factores principales. Además, en esta variable la interacción AC adquiere una relevancia visual notable frente a las demás interacciones, sugiriendo que la deformación tiende a disminuir debido a la combinación del modelo constitutivo de la arena y su calidad de la arena. También, se observa que la calidad del adocreto y las interacciones AD y CD tienden en menor medida a disminuir esta variable.

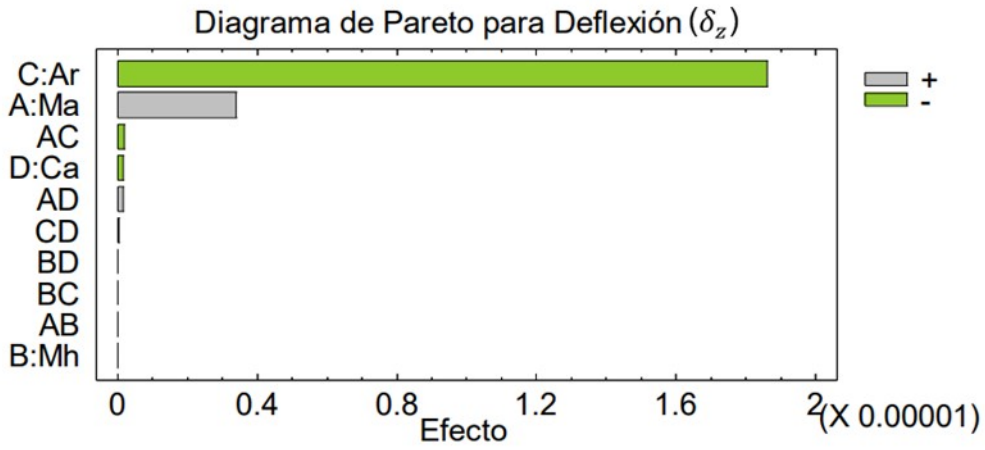
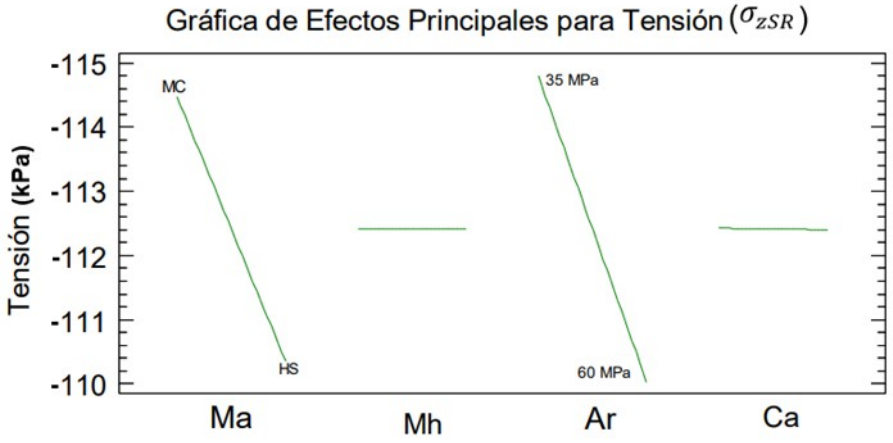


Fig. 5. Diagrama de Pareto estandarizado para deflexiones (δ_z).

Para la deflexión en la figura 5, el factor Ar se consolida como el parámetro más influyente en su disminución. El factor Ma mantiene su influencia, aunque con una magnitud diferente en comparación con las variables de tensión y deformación, ya que, en este caso al pasar del modelo Mohr Coulomb al *Hardening Soil*, aumenta la deflexión. Por otro lado, aparece de nuevo la influencia de la interacción AC, con la misma influencia que la calidad del hormigón del adocreto. Además, se observa, aunque en menor medida, que la interacción AD tiende a aumentar la deflexión.

3.4. ANÁLISIS DE EFECTOS PRINCIPALES

Las figuras 6-8 presentan los gráficos de efectos principales, para las variables dependientes tensión, deformación y deflexión respectivamente.



En la figura 6 se evidencia que la calidad de la arena (Ar) es el factor con la pendiente más pronunciada, mostrando que para la arena 35 MPa se alcanzan mayores tensiones; el modelo constitutivo de la arena también presenta una pendiente elevada, mostrando que para el modelo de Mohr Coulomb se obtiene mayor tensión que para el modelo de *Hardening Soil*.

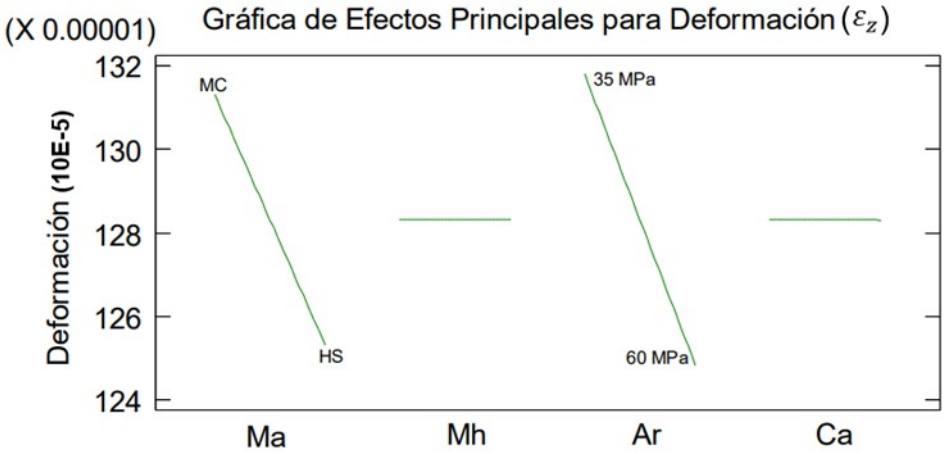


Fig. 7. Gráfica de efectos principales para deformaciones verticales unitarias (εz).

En la figura 7 se evidencia el mismo comportamiento de las variables calidad de la arena y sus modelos constitutivos, presentando las mayores deformaciones asociadas a los niveles 35 MPa y Mohr Coulomb de dichas variables.

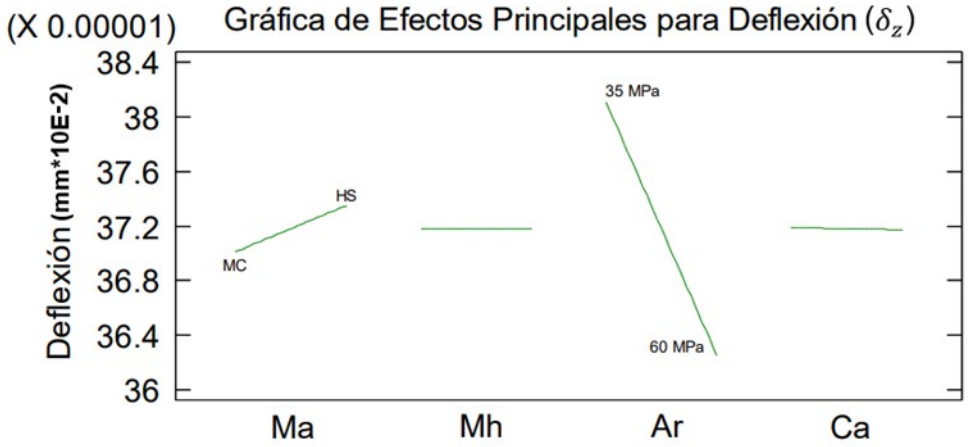


Fig. 8. Gráfica de efectos principales para deflexiones (δz).

En la figura 8 se aprecia el mismo comportamiento de la calidad de la arena que en los dos gráficos de efectos principales anteriores. En contraste, la influencia del modelo constitutivo de la arena presenta al modelo *Hardening Soil* como el nivel que genera mayores deflexiones.

Para las tres variables estudiadas las líneas correspondientes al modelo de daño del hormigón (Mh) y la calidad del hormigón (Ca) se presentan horizontales, de tal forma no se define influencia.

3.5. ANÁLISIS DE INTERACCIONES

El análisis de las gráficas de interacción correspondientes a la tensión vertical a compresión (figura 9), la deformación vertical unitaria (figura 10) y la deflexión vertical (figura 11) permite identificar que en las interaccione de variables donde las líneas son prácticamente paralelas el primer factor afectará la respuesta estructural sin importar si el segundo factor presenta un nivel alto o bajo, así también se puede apreciar que para el caso de las interacciones donde las líneas convergen o divergen, es decir, no son paralelas, el efecto del primer factor sí dependerá del nivel en el cual se encuentre el segundo factor.

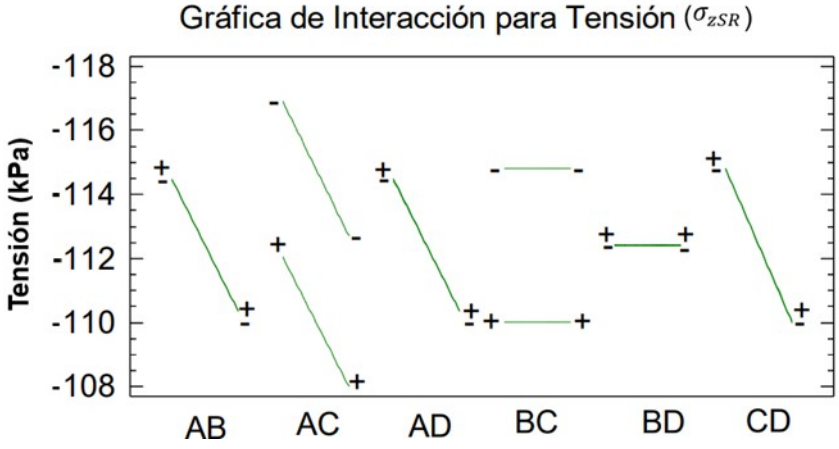


Fig. 9. Gráfica de interacción para tensión a compresión (σzSR).

En la figura 9 se observa que para AB (Ma*Mh) y AD (Ma*Ca) la tensión a compresión disminuye cuando se pasa de un modelo constitutivo Mohr Coulomb (MC) al *Hardening Soil* (HS), sin que este resultado se modifique con el paso de nivel -1 a nivel +1 del segundo factor, de manera similar se presenta CD (Ar*Ca) donde la tensión disminuye a medida que la calidad de la arena (Ar) pasa de 35 MPa a 60 MPa, independientemente de la calidad del hormigón del adocreto (Ca), es decir, en ambos casos no hay interacción. Con respecto a AC (Ma*Ar) se observan mayores tensiones cuando se usa como modelo constitutivo MC con calidad de arena 35 MPa, obteniéndose resultados mucho menores al utilizar HS como modelo constitutivo con 60 MPa de calidad de arena, en este caso sí hay interacción. Con respecto a BC (Mh*Ar), se observa que para la calidad de arena de 35 MPa la tensión será mayor sin importar el paso de un modelo de daño de Linear-Elástico a Concrete.

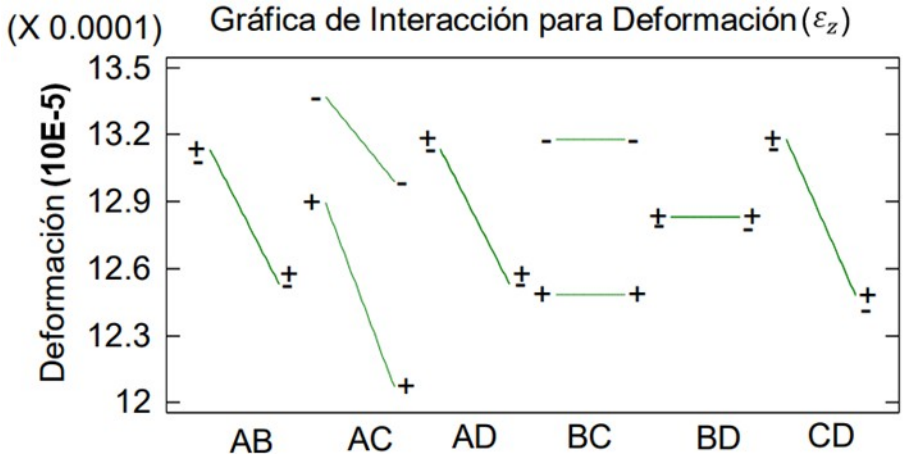


Fig. 10. Gráfica de interacción para deformaciones verticales unitarias (*εz*).

En la figura 10 se presenta similar comportamiento para AB, AD, BC y CD que en la para la tensión anteriormente analizada (Figura 3.7). En esta gráfica destaca que para AC el paso de MC a HS genera una menor deformación cuando la calidad de la arena es de 60 MPa, además se observa que los resultados de la calidad de arena de 35 MPa con HS se acercan a los resultados de 60 MPa con MC.

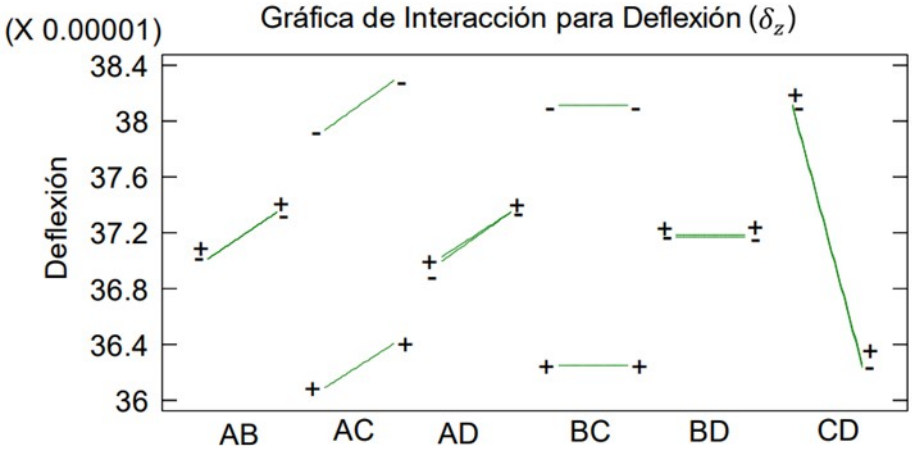


Fig. 11. Gráfica de interacción para deflexiones (*δz*).

En la figura 11 se observa un cambio de pendiente en el comportamiento AB, AC y AD, respecto a los gráficos de interacciones analizados anteriormente. Asimismo, se observa que para AB y AD, no hay interacciones, pues el paso de MC a HS aumenta las deflexiones independientemente del nivel del segundo factor. Sin embargo, para la AC, se evidencia que al pasar de MC a HS aparecen mayores deflexiones cuando la calidad de la arena es de 35 MPa. En CD, aparece el mismo sentido de pendiente que en los gráficos de interacciones anteriores, lo cual refleja que para Ar de 60 MPa la deflexión será menor sin importar el nivel de D.

4. CONCLUSIONES

A partir del análisis estadístico realizado se puede concluir que:

Los factores con mayor significancia estadística en el comportamiento del pavimento son la Calidad de la Arena (Ar) y el Modelo Constitutivo (Ma) empleado para representarla.

Al emplear el modelo *Hardening Soil* se obtienen menores valores de tensión a compresión y deformaciones verticales unitarias en comparación con Mohr-Coulomb.

Los parámetros analizados para el hormigón de los adocretos (calidad y modelo constitutivo) no muestran influencia significativa en el estado tenso-deformacional dentro de los rangos estudiados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. L. P. Machado, B. M. Tamayo, D. d. l. C. F. Alpizar, C. P. Mijenes, and A. A. Aenlle, "Empleo de adoquines de concreto en la construcción de pavimentos," Revista de Arquitectura e Ingeniería, vol. 16, no. 2, pp. 1-11, 2022.
2. S. D. M. González, A. A. Aenlle, and W. C. Cristiá, "Design Method for Interlocking Concrete Block Pavements on Granular Base," in Advances in Technical Sciences and Architecture: Selected Contributions of CCIA 2024, Springer, Ed., 2026, pp. 153-169.
3. H. A. R. Quintana and F. A. R. Lizcano, Pavimentos: materiales, construcción y diseño, 2da Edición ed. Bogotá, Colombia, 2022.
4. I. Simpson, R. Winston, and A. Tirpak, "Assessing maintenance techniques and in-situ pavement conditions to restore hydraulic function of permeable interlocking concrete pavements," Journal of Environmental Management, vol. 294, pp. 11-29, 2021.
5. T. E. Navarro, Análisis de métodos de diseño de pavimentos de adoquines de hormigón. Chile, 2013.
6. J. Babu, A. Anil, A. Kumar, A. Vijayan, and T. S. Thomas, Interlocking concrete block pavement as an alternative to flexible and rigid pavement in medium traffic condition: comparative assessment based on sustainability. Kerala, India, 2023.
7. A. S. Rathan, V. Sunitha, and A. Sai, "Mechanical and structural performance evaluation of previous interlocking paver blocks," Construction and Building Materials, vol. 292, 2021.
8. A. S. Rathan and V. Sunitha, "Development of effective wearing layer elastic modulus for interlocking concrete block pavements," Construction and Building Materials, vol. 341, 2022.
9. A. S. Rathan, V. Sunitha, M. Pathath, J. Lekshmipathy, and V. Anusudha, "Experimental and Numerical Evaluation of the Parameters Influencing the Shear-Stress Behavior of Interlocking Paver Blocks–Bedding Sand Interface Using Large-Scale Direct Shear Test," Journal of Materials in Civil Engineering, vol. 33, no. 6, 2021.
10. V. B. Rojas, W. Y. Vallejo, and E. H. Grande, "Multivariate Analysis for Prediction of Splitting Tensile Strength in Concrete Paving Blocks," Applied Sciences, vol. 13, no. 19, 2023.
11. W. Lin, Y. Dong, Y. Jung, H. Zheng, and Y.-h. Cho, "Performance Evaluation of Bedding Sand and Load Transfer Characteristic of Concrete Block Pavements," Applied Sciences, vol. 11, no. 21, 2021.
12. I. Kim, C.-K. Chung, and J.-H. Ryu, "Evaluation of interlocking block pavement performance under varying construction conditions by model chamber test," Case Studies in Construction Materials, vol. 22, pp. 40-67, 2025.
13. I. Kim, J.-H. Ryu, B.-H. Jo, Y.-W. Song, and C.-K. Chung, "Load-resisting mechanisms and performance evaluation of heavy-duty block pavements: insights from laboratory and field tests," Road Materials and Pavement Design, vol. 25, no. 1, 2025.
14. B. C. Panda and A. K. Ghosh, "Structural Behavior of Concrete Blocks Paving. II: Concrete Blocks," Transportation Engineering, vol. 128, no. 2, pp. 130-135, 2002.
15. B. C. Panda and A. K. Ghosh, "Structural Behavior of Concrete Blocks Paving. I: Sand in Bed and Joints," Transportation Engineering, vol. 128, no. 2, pp. 123-129, 2002.
16. A. S. Rathan and V. Sunitha, "Development of design procedure for interlocking concrete block pavement," International Journal of Pavement Engineering, vol. 23, no. 14, pp. 5015-5029, 2022.
17. T. M. Hashim, M. Z. Al-Mulali, F. F. Al-Khafaji, A. A. A. Alwash, and Y. A. Ali, "An Experimental Comparison between Different Types of Surface Patterns of Permeable Interlocking Concrete Pavement for Roadway Subsurface Drainage," Case Studies in Constuction Mateials, vol. 17, pp. 12-27, 2022.
18. A. Shubbar, M. S. Nasr, A. Kadhim, T. M. Hashim, and M. Sadiique, "Performance Comparison of 45º and 90º Herringboned Permeable Interlocking Concrete Pavement," Infraestructures, vol. 8, no. 5, 2023.
19. I. Kim, S.-W. Hong, M. Oh, and Choong-Ki, "The effect of joint properties on interlocking block pavement performance," International Journal of Pavement Engineering, vol. 25, no. 1, 2024.
20. I. Kim, J.-H. Ryu, T.-K. Chung, C.-K. Chung, and B.-H. Jo, "An experimental study on interlocking mechanisms in concrete block pavement," International Journal of Pavement Engineering, vol. 27, no. 1, 2026.
21. I. Kim, J.-H. Ryu, M. Oh, and C.-K. Chung, "The effect of bedding tickness on interlocking block pavement performance," International Journal of Pavement Engineering, vol. 25, no. 1, 2024.
22. A. Beaty, "Laying Course Materials: Specifications and Performance," presented at the 5th international Conference on CBP, Israel, 1996.
23. G. Jameson and K. Sharp, Technical Basis of Austroads Pavement Design Guide. Sydney, Australia, 2004.
24. J. Yoder and M. Witczak, Pavement Type, Wheel Loads, and Desing Factors. Principles of pavement desing. New York, USA, 1976.
25. H. Madkour, "Thermodynamic modeling of the elastoplastic-damage model for concrete," Journal of Engineering Mechanics, vol. 147, 2021.
26. A. Truty, "Elastic-plastic damage model for concrete," Switzerland2021.
27. L. Jason, G. Pijaudier-Cabot, A. Huerta, R. Crouch, and S. Ghavamian, "An elastic plastic damage formulation for the behavior of concrete," Fracture Mechanics of Concrete Structures vol. 2, no. 2, pp. 549-556, 2004.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

28. J. M. Houben, "The Dutch Design Method for Concrete Blocks Road Pavement," presented at the 3rd International Conference on CBP, Australia, 1988.
29. O. Mohr, "Welche Umstande bedingen die Elastizitatsgrenze und den Brunc eines Materials," Zeitschrift des Vereins Deutcher Ingenieure, vol. 46, pp. 1524-1530, 1900.
30. D. C. Drucker and W. Prager, "Soil mechanics and plastic analysis or limit design," Quartely of Applied Mathematics, vol. 10, no. 2, pp. 157-165, 1952.
31. F. DiMaggio and I. Sandler, "Material model for granular soils," Journal of the Engineering Mechanics Division, vol. 97, no. 3, pp. 935-950, 1971.
32. T. Schanz, P. Vermeer, and P. Bonnier, "The Hardening Soil Model: Formulation and Verification," in Beyond 2000 in computational geotechnics, Books, Ed., 1999, pp. 281-297.
33. R. Obrzud, Constitutive models for geotechnical practice. Switzerland, 2018.
34. A. S. Rathan and V. Sunitha, "Numerical modeling and optimization of the geometric properties influencing the deflection behavior of interlocking concrete block pavement," Journal of Trasnportation Engineering, Part B: Pavements, vol. 148, no. 3, 2022.
35. A. S. Rathan and V. Sunitha, "Development of Deflection Prediction Model for INterlocking Concrete Block Pavements," Trasportation Research Record, vol. 2676, no. 3, pp. 292-314, 2022.
36. P. D. Mascio, L. Moretti, and A. Capannolo, "Concrete block pavements in urban and local roads: Analysis of stress-strain condition and proposal for a catalogue," Journal of Traffic and Transportation Engineering, vol. 6, no. 6, pp. 557-566, 2019.
37. M. D. Braja and N. Sivakugan, Principles of Foundation Engineering, 9th Edition. Boston: Cengage Learning, Inc., 2018.
38. Adoquines de hormigón (adocretos) - Especificaciones, N. O. N. d. N. (NC), 2014.
39. A. S. Ratha, V. Sunitha, and V. Anusudha, "Parametric study to investigate the deflection and stress behavior of Interlocking Concrete Block," Road Materials and Pavement Design, vol. 23, no. 10, pp. 2293-2316, 2022.
40. R. Walpole, R. Myers, and S. Myers, Probability and Statistics for Engineers and Scientists, 6th Edition. Mexico: Prentice-Hall, Inc., 1999.
41. A. Qannadizadeh, P. Shourijeh, and A. Lashkari, "Laboratory investigation and constitutive modeling of the mechanical behavior of snd-GRP interfaces," Acta Geotehnica, vol. 17, no. 10, pp. 4253-4275, 2022.