

Análisis de la resistencia a la compresión exigida por la especificación INV ART 510 -13 y de la resistencia a la flexotracción exigida NTC 2017 (segunda actualización) para adoquines rectangulares de concreto fabricados con materiales de la región.

Ing. Esp. HENRY MAURICIO MUÑOZ TROCHEZ

Universidad del Cauca

Facultad de Ingeniería Civil

Departamento de Geotécnia

Popayán 2018

Análisis de la resistencia a la compresión exigida por la especificación INV Art. 510 -13 y de la resistencia a la flexotracción exigida NTC 2017 (segunda actualización) para adoquines rectangulares de concreto fabricados con materiales de la región.

Ing. Esp. HENRY MAURICIO MUÑOZ TROCHEZ

Tesis de tipo profundización para optar al título de Maestría en Ingeniería de Pavimentos

Director: Ing. M.Sc. Eugenio Chavarro Barreto

Universidad del Cauca

Facultad de Ingeniería Civil

Maestría en Ingeniería de Pavimentos

Departamento de Geotécnia

Popayán

2018

Nota de aceptación

Firma del director

Firma del jurado

Firma del jurado

DEDICATORIA

A mi familia, incluidas Osa y Perla, a Juliana, por haberme acompañado en este proceso, a mis compañeros de estudio de la maestría en pavimentos, al Ingeniero Eugenio Chavarro por su orientación, a la ingeniera Julia Ruiz por su tiempo, al Ing. Phd. Sergio Preidikman por permitirme asistir a su curso de elementos finitos y brindarme asesoría sobre este tema, a mis compañeros y excompañeros del departamento de Geotecnia y personal de laboratorio por su apoyo, a la Universidad del Cauca, a los autores de la bibliografía consultada y a aquellas personas que influyeron de forma directa e indirecta en la elección de este trabajo.

Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 7.1 Tipos de trabazón en adoquines, horizontal, vertical y rotacional (Interlocking Concrete Pavement Institute, ICPI) | 13 |
| Figura 7.2 Transporte de adoquines de concreto después de retirarlos para realizar una reparación de la zona inferior en la ciudad de Ámsterdam (Fuente propia)..... | 17 |
| Figura 7.3 Almacenamiento de adoquines de concreto después de retirados, para reutilizarlos en la misma obra, ciudad de Ámsterdam (Fuente propia)..... | 18 |
| Figura 7.4 Patrones de colocación tipo espina de pescado a 45° y 90° (Interlocking Concrete Pavement Institute, ICPI)..... | 19 |
| Figura 7.5 Adoquines de concreto producidos por el Autor (Fuente propia) | 19 |
| Figura 7.6 Estructura de pavimento articulado (adoquinado) sometido a cargas en la ciudad de Nueva York (Fuente propia)..... | 19 |
| Figura 7.7 Ensayo de resistencia a la compresión de adoquines realizado por el autor en el laboratorio de materiales de la Universidad del Cauca (Fuente propia)..... | 20 |
| Figura 7.8 Ensayo de resistencia a la flexión de adoquines realizado por el autor en el laboratorio de materiales de la Universidad del Cauca (Fuente propia) | 21 |
| Figura 8.1 Adoquines utilizados en el proyecto después del ensayo de resistencia a la flexotracción. (Fuente propia)..... | 24 |
| Figura 9.1 Ensayo de resistencia a la flexotracción del proyecto (Fuente propia) | 28 |
| Figura 9.2 Ensayo de resistencia a la compresión del proyecto (Fuente propia)..... | 30 |
| Figura 9.3 Carga vehicular sobre un pavimento articulado. (The precast concrete paving and kerb association, 2007) | 31 |
| Figura 9.4 Carga de contenedores sobre pavimento articulado. (The precast concrete paving and kerb association, 2007) | 32 |
| Figura 9.5 Datos entrada: Geometría del adoquín y capas de la estructura del pavimento en el programa EverFe 2.24 (Fuente propia)..... | 35 |
| Figura 9.6 Datos entrada: Propiedades mecánicas del adoquín y de las capas de la estructura del pavimento en el programa EverFe 2.24 (Fuente propia) | 35 |
| Figura 9.7 Datos entrada: modelación de la carga en el programa EverFe 2.24 (Fuente propia). 36 | |
| Figura 9.8 Generación de la malla en el programa EverFe 2.24 (Fuente propia)..... | 36 |

| | |
|--|----|
| Figura 9.9 Resultado de los esfuerzos máximos encontrados en el programa EverFe 2.24 (Fuente propia)..... | 37 |
| Figura 9.10 Diagrama de distribución de esfuerzos de compresión en la superficie encontrado con en el programa EverFe 2.24 (Fuente propia) | 37 |
| Figura 9.11 Diagrama de distribución de esfuerzos de tensión en la superficie encontrado con en el programa EverFe 2.24 (Fuente propia)..... | 38 |
| Figura 9.12 Diagrama de distribución de esfuerzos máximos de compresión en la parte inferior encontrado con en el programa EverFe 2.24 (Fuente propia)..... | 38 |
| Figura 9.13 Diagrama de distribución de esfuerzos de tensión en la parte inferior encontrado con en el programa EverFe 2.24 (Fuente propia) | 39 |
| Figura 10.1 Resultados de resistencia a la flexotracción comparados con la norma NTC 2017 (Fuente propia)..... | 40 |
| Figura 10.2 Resultados de resistencia a la compresión comparados con la especificación del artículo 510 -13 del INVIAS (Fuente propia)..... | 41 |
| Figura 10.3 Correlación entre la resistencia a la compresión y resistencia a la flexotracción para todas las edades analizadas. (Fuente propia) | 46 |
| Figura 10.4 Correlación entre la resistencia a la compresión y resistencia a la flexotracción para todas las edades analizadas, eliminado valores extremos. (Fuente propia) | 47 |
| Figura 10.5 Correlación entre la resistencia a la compresión y resistencia a la flexotracción, eliminado valores extremos y con edades superiores a 28 días. (Fuente propia) | 48 |
| Figura 10.6 Correlación entre la resistencia a la compresión y resistencia a la flexotracción, eliminado valores extremos y con edades superiores a 28 días comparada con la correlación obtenida del concreto convencional.. (Fuente propia)..... | 50 |

1. Contenido

| | |
|--|----|
| 1. Contenido..... | 7 |
| 2. Resumen del Proyecto (abstrac): | 8 |
| 3. Introducción..... | 9 |
| 4. Descripción del problema..... | 10 |
| 5. Justificación..... | 10 |
| 6. Objetivos..... | 11 |
| 6.1 Objetivo General | 11 |
| 6.2 Objetivos específicos: | 11 |
| 7. Marco Referencial | 12 |
| 7.1 Marco Teórico | 12 |
| 7.2 Marco Conceptual | 18 |
| 8. Metodología y plan de trabajo..... | 21 |
| 9. Resultados..... | 26 |
| 9.1 Resultados de laboratorio | 26 |
| 9.2 Resultado del análisis por elementos finitos | 30 |
| 10. Análisis de los resultados..... | 39 |
| 10.1 Análisis de los resultados de laboratorio | 39 |
| 10.2 Análisis de los resultados obtenidos por modelación en elementos finitos..... | 50 |
| 11. Conclusiones | 56 |
| 12. Bibliografía | 58 |

2. Resumen del Proyecto (abstrac):

Los adoquines rectangulares de concreto utilizados en las obras de pavimentos, andenes, pisos, deben cumplir con un control durante los procesos de producción y construcción. En Colombia se venía realizando como parámetro de control con la prueba y especificación de resistencia a la flexotracción, exigida por la norma NTC 2017 o el artículo INV 510 -07, conforme a la actualización realizada por el Instituto Nacional de Vías en el año 2013 se cambió este parámetro a resistencia a la compresión. Debido al cambio de criterio para el control de calidad en los adoquines se encontró pertinente realizar un análisis comparativo de las dos especificaciones teniendo como referencia los esfuerzos que soportan los elementos cuando están sometidos a cargas importantes en pavimentos y en patios de contenedores. La revisión de los esfuerzos y la comparación con los estándares dados por las especificaciones, resulta de suma importancia dado que algunos de los métodos de diseño de pavimentos articulados asumen que la capa de rodadura es un material continuo y homogéneo, lo cual hace que en el proceso de diseño se omitan los esfuerzos que soportan los adoquines individuales. Razón por la cual en este trabajo se realizó un análisis comparativo entre la resistencia a la compresión exigida por la especificación INV E 510 -13 y la resistencia a la flexotracción exigida por la NTC 2017 para adoquines rectangulares de concreto fabricados con materiales de la región del municipio de Popayán, departamento del Cauca, en donde se determinó la resistencia a la compresión y flexotracción de estos adoquines utilizando los procedimientos descritos en las normas INV E - 426 y NTC 2017 respectivamente, con lo cual se plantearon posibles correlaciones entre la resistencia a la compresión y resistencia a la flexotracción, y además establecer si los adoquines que cumplen con la resistencia a la flexotracción exigida en la norma NTC, también cumplen con la resistencia a la compresión exigida por la especificación INV, una vez obtenida esta

información, se analizaron los resultados de los adoquines elaborados con la misma mezcla y edad, lo cual se complementó con el análisis del comportamiento teórico de los esfuerzos generados en un adoquín dentro de un pavimento articulado, para determinar cuáles eran los esfuerzos imperantes dentro de un adoquín.

3. Introducción

Debido a las inquietudes que se presentan en el gremio relacionado con los adoquines de concreto hidráulico, sobre los esfuerzos predominantes en servicio en este elemento, se propuso adelantar una investigación de tipo profundización, tomando como tema principal los esfuerzos más críticos generados dentro de un adoquín de concreto rectangular sometido a cargas externas en una estructura de pavimento, que a su vez se verían reflejados en las especificaciones vigentes, como la del Instituto Nacional de Vías (INV) que exige resistencia a la compresión y la de la Norma Técnico Colombiana (NTC) que exige flexotracción.

Con el propósito de obtener resultados de resistencia a la compresión y flexotracción, se adquirieron adoquines rectangulares de concreto, los cuales fueron elaborados por un fabricante en la ciudad de Popayán, quien utiliza materiales que normalmente se emplean en esta región.

Con los resultados obtenidos se pretende brindar gran ayuda a diseñadores, interventores y constructores que trabajen en proyectos en donde los adoquines de concreto formen parte de vías, pisos industriales, aeropuertos y espacio público, ya que podrá dar una luz a la hora de recomendar o analizar especificaciones y también se podrán tener criterios más específicos en el dimensionamiento de estructuras con adoquines, aunque cabe anotar que temas relacionados con la durabilidad no se estudiaron a detalle ni se midieron en este documento.

4. Descripción del problema

¿Es posible estimar si los adoquines rectangulares de concreto fabricados con materiales de la región que cumplen con la resistencia a la flexotracción establecida en la Norma NTC 2017, también satisfacen la exigencia de resistencia a la compresión establecida en el artículo exigida en el artículo 510-13 de las especificaciones del INVIAS?

5. Justificación

Como se mencionó anteriormente algunos métodos de diseño de pavimentos articulados, asumen que la capa de rodadura (en este caso adoquines de concreto), es un material continuo y homogéneo, por lo cual se omite el análisis de los esfuerzos que soportan los adoquines individuales, por lo que en este caso las especificaciones juegan un papel muy importante en la resistencia que soportan estos elementos. Una vez conocido el tipo de esfuerzo predominante en los elementos de adoquines o su conjunto, se podría considerar si algunos factores como rigidez o variación en el espesor del elemento serían significativos en el diseño del pavimento articulado.

Dado que la producción, construcción e interventoría de los pavimentos y obras con adoquines, anteriormente estaban enfocadas a realizar el control de calidad utilizando como parámetro, la resistencia a la flexotracción, se necesita conocer si los adoquines producidos utilizando este parámetro, cumplen o no con el valor de resistencia a la compresión establecido en la especificación 510 -13 del INVIAS, además es importante conocer las variables que puedan afectar la determinación de la resistencia a la compresión mediante el protocolo de ensayo INV E -426 de 2013, y con ello poder determinar la aplicabilidad o no de cada una de estas especificaciones dependiendo del tipo de obra a construir.

6. Objetivos

6.1 Objetivo General

Realizar un análisis entre la resistencia a la compresión exigida por la especificación INV Art. 510 -13 y la resistencia a la flexotracción exigida NTC 2017 (segunda actualización) para adoquines rectangulares de concreto fabricados con materiales de la región.

6.2 Objetivos específicos:

- Analizar el comportamiento teórico de un adoquín de concreto rectangular en un pavimento articulado, teniendo en cuenta las cargas solicitantes y espesor del elemento.
- Determinar la resistencia a la compresión y flexotracción de adoquines rectangulares de concreto, a los 28 días fabricados con materiales de la región, mediante los procedimientos descritos en las normas INV E - 426 y NTC 2017 respectivamente.
- Plantear una posible correlación entre la resistencia a la compresión y resistencia a la flexotracción de adoquines rectangulares de concreto elaborados con materiales de la región, para el rango de resistencias obtenido con mezclas elaboradas bajo la norma NTC 2017, a partir de los resultados obtenidos en laboratorio.
- Determinar si los adoquines que cumplen con la resistencia a la flexotracción exigida en la norma NTC 2017, también cumplen con la resistencia a la compresión exigida por la especificación INV Art 510 -13.

7. Marco Referencial

7.1 Marco Teórico

Los adoquines se empezaron a utilizar en el Imperio Romano, los cuales inicialmente eran fabricados a partir de rocas, más recientemente en el año de 1940, en Holanda se conocen los primeros adoquines de concreto que finalmente se propagaron por toda Europa y ya para el año de 1970 llegaron a Norteamérica (Interlocking Concrete Pavement Institute, ICPI), ya en Colombia se empezaron a comercializar a partir del año 1975 (Instituto Colombiano de Productores de Cemento, ICPC).

Muchas de las investigaciones de este campo se han enfocado en el estudio de los pavimentos de adoquines como conjunto, pero muy pocas se detienen a analizar el elemento por sí solo, para citar algunos de los profesionales y entidades que se dedican a la investigación de este campo se encuentra el Profesor John Knapton, quien ha desarrollado un sin número de manuales y guías de diseño de pavimentos de adoquín para carreteras, aeropuertos y puertos (Knapton & Cook). Además, él y S.D. Barber realizaron investigaciones a escala de laboratorio en donde modelaron la capa de adoquines y el soporte, aplicando cargas que simulaban el tránsito, para así determinar los esfuerzos que le transmitía toda a la capa de adoquines a la capa subyacente (Knapton & Barber). Adicionalmente existen organizaciones de productores de adoquines como el Interlocking Concrete Pavement Institute en Norteamérica y Precast Concrete Paving and Kerb Association Interpave en el Reino Unido, pero sus investigaciones generalmente se enfocan al estudio del pavimento, esfuerzos entre adoquines y producción de adoquines, esto no quiere decir que no hayan realizado investigaciones similares a la de este trabajo.

En Colombia existen investigadores que han abarcado este tema en algunas exposiciones, pero enfocándose a los bloques de arcilla, es el caso del ingeniero Victor Manuel Aristizabal, quien realiza un análisis de los posibles esfuerzos que se pueden generar en estos elementos (Aristizabal Gil, 2005).

Normalmente los adoquines transmiten esfuerzos por la trabazón que se genera entre ellos, la cual puede ser vertical, horizontal y rotacional, en la Figura 7.1 se presentan los distintos tipos de trabazón que podrían generar distintos tipo de esfuerzos en el adoquín:

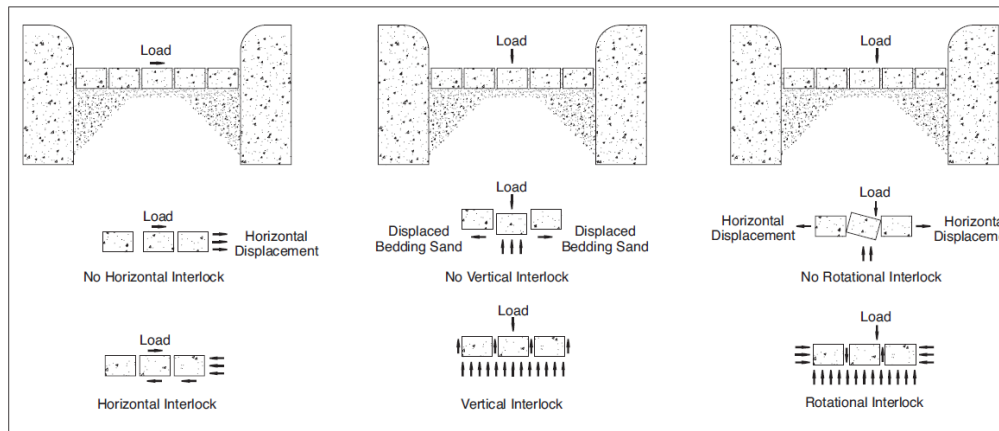


Figura 7.1 Tipos de trabazón en adoquines, horizontal, vertical y rotacional (Interlocking Concrete Pavement Institute, ICPI)

Por otro lado en Colombia existen al menos tres entidades que especifican la calidad de los adoquines de concreto, el Instituto Nacional de Vías, El ICONTEC con sus normas Técnico Colombianas y el Instituto de Desarrollo Urbano IDU, a manera de referencia internacional se encuentra la evolución de la norma internacional ASTM C936-C936M-16 (ASTM International, 2016), ASTM C 936-01 (ASTM International, 2011), ASTM C 936-96 (ASTM International, 1996), la cual siempre ha especificado los mismos valores de resistencia a la compresión, la norma India IS

15658:2 (Indian Standards, 2006), y los estándares Australianos (Pearson, A. and Shackel, B., Concrete Masonry Association of Australia, School of Civil and Environmental Engineering, University of New South Wales, 2003), en general se especifican principalmente requisitos de resistencia a la Compresión, y de forma secundaria u opcional flexión y tensión aunque los estándares australianos trabajan con una carga de ruptura, lo que podría indicar que aún no se podría hablar de un criterio unificado de resistencia para los adoquines.

Una tesis que podría servir también de referencia a este trabajo, es la realizada por los estudiantes de Maestría Lubina Cantarero y Douglas Méndez en Nicaragua (Cantarero & Méndez), quienes analizan a grandes rasgos el comportamiento de los pavimentos de adoquines en la red vial de Nicaragua.

Como valor de referencia, los manuales de diseño de carreteras del ICPI (Interlocking Concrete Pavement Institute, ICPI), los manuales de diseño de pavimentos de aeropuertos del ICPI, (Interlocking Concrete Pavement Institute (ICPI), 2012), el manual de Puertos y vehículos pesados de Interpave (The precast concrete paving and kerb association, 2007) especifican valores de resistencia a la compresión, generalmente valores mínimos de 55 MPa de acuerdo a los procedimientos de ensayo que ellos mencionan.

En el manual de diseño de pavimentos de adoquines de hormigón de Chile (Chile, Instituto del cemento y del hormigón de; Echaveguren Navarro, Tomás;, 2013), se analiza la influencia de ciertos factores como resistencia a la compresión, flexión y patrón de colocación de los adoquines, para el caso específico de la resistencia a la compresión se basan principalmente en la publicación de Bikasha Chandra Panda and

Ashok Kumar Ghosh, Structural Behavior of Concrete Block Paving. II: Concrete Blocks (Panda & Ghosh, 2002), quienes analizan las deflexiones de un modelo de pavimento articulado a escala de laboratorio, variando el valor de la resistencia a la compresión de los adoquines de concreto, encontrado que deflexiones medidas, no varían demasiado con el cambio de la resistencia a la compresión.

Asimismo, en este manual se analizan o explica la influencia de la resistencia a la flexión y compresión de los adoquines, además de otros parámetros de los pavimentos articulados.

Otro parámetro que se puede considerar es la durabilidad del elemento, la cual está estrictamente ligada a la resistencia, y en muchos casos a la resistencia a la compresión, como manera de ejemplo el reglamento Colombiano de construcción sismo resistente NSR -10 (Mnisterio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial;, 2010), en su título C, numeral C.4.3.1, presenta los requisitos que debe cumplir la mezcla de concreto de acuerdo a la clase de exposición, los cuales se presentan en la Tabla 7.1:

| Clase de Exposición | Rel. a/mc máx± | f'c min. MPa | Requisitos mínimos adicionales | | | |
|---------------------|----------------|--------------|--|---|---------------------------------------|----------------------------|
| | | | Contenido de aire | | | Limites en los cementantes |
| F0 | N/A | 17 | N/A | | | N/A |
| F1 | 0.45 | 31 | tabla C.4.4.1 | | | N/A |
| F2 | 0.45 | 31 | tabla C.4.4.1 | | | N/A |
| F3 | 0.45 | 31 | tabla C.4.4.1 | | | tabla C.4.4.2 |
| | | | Tipos de material cementante* | | | Aditivo cloruro de calcio |
| | | | ASTM C 150 | ASTM C 595 | ASTM C 1157 | |
| S0 | N/A | 17 | Sin restricción en el tipo | Sin restricción en el tipo | Sin restricción en el tipo | Sin restricción |
| S1 | 0.50 | 28 | II ^{II} | IP(MS), IS(<70) (MS) | MS | Sin restricción |
| S2 | 0.45 | 31 | V ² | IP(HS), IS(<70) (HS) | HS | No se permite |
| S3 | 0.45 | 31 | V puzolanas o escoria ^s | IP(HS) y puzolanas o escoria ^s o IS(<70) (HS) y puzolanas o escoria ^s | HS y puzolanas o escoria ^s | No se permite |
| P0 | N/A | 17 | Ninguna | | | |
| P1 | 0.50 | 28 | Ninguna | | | |
| | | | Contenido máximo de iones de cloruro (CF) soluble en agua en el concreto, porcentaje por peso de cemento | | Requisitos relacionados | |
| | | | Concreto reforzado | Concreto Preesforzado | | |
| C0 | N/A | 17 | 1.00 | 0.06 | Ninguno | |
| C1 | 0.50 | 17 | 0.30 | 0.06 | | |
| C2 | 0.40 | 35 | 0.15 | 0.06 | | |

Tabla 7.1 Requisitos para el concreto según la clase de exposición

En donde se evidencia que para cada tipo de exposición que puede comprometer la durabilidad de la estructura, se exige un valor mínimo de resistencia a la compresión (f'c min).

Nota: La forma de evaluar la resistencia a la compresión del concreto hidráulico en la NSR-10 es muy diferente a la forma como se evalúa la resistencia a la compresión de los adoquines de concreto, por lo tanto los resultados de cada uno de los ensayos son distintos.

En el caso de los adoquines, la eficiencia de este elemento es que pueda ser retirado de la estructura y volverlo a colocar en ella u otro lugar, por lo cual su durabilidad debe ser muy alta, en las siguientes imágenes se muestra una reparación de una zona

en donde la capa de rodadura son adoquines de concreto, los cuales van a ser reutilizados en la misma zona.



Figura 7.2 Transporte de adoquines de concreto después de retirarlos para realizar una reparación de la zona inferior en la ciudad de Amsterdam (Fuente propia)



Figura 7.3 Almacenamiento de adoquines de concreto después de retirados, para reutilizarlos en la misma obra, ciudad de Ámsterdam (Fuente propia)

7.2 Marco Conceptual

Adoquín de concreto rectangular: “Son elementos macizos, de concreto, prefabricados, de espesor uniforme e iguales entre sí, con forma de prismas rectos tal que, al colocarlos sobre una superficie, encajen unos con otros dejando solamente juntas, entre ellos. Además deben tener una resistencia adecuada para soportar las cargas, y en especial, el desgaste ocasionado por el tráfico.” (Instituto Colombiano de Productores de Cemento (ICPC), 1986). Adicionando que el desgaste no solo puede ser por el tráfico sino por otros tipos de cargas, factores ambientales y químicos. A parte de la forma rectangular existen adoquines cuadrados y con formas irregulares, algunos de estos últimos pueden presentar mejor trabazón entre elementos, pero el uso

más común para pavimentos son los de tipo rectangular colocados en forma de espina de pescado como se presenta a continuación en la figura Figura 7.4

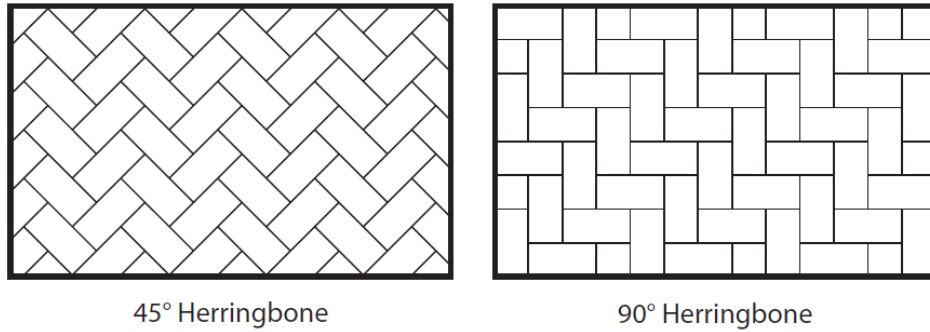


Figura 7.4 Patrones de colocación tipo espina de pescado a 45° y 90° (Interlocking Concrete Pavement Institute, ICPI)



Figura 7.5 Adoquines de concreto producidos por el Autor (Fuente propia)

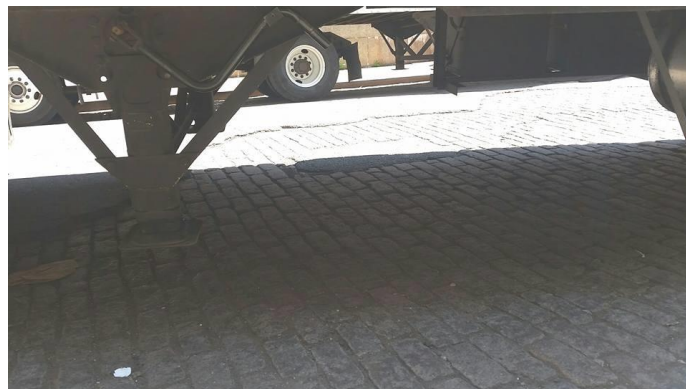


Figura 7.6 Estructura de pavimento articulado (adoquinado) sometido a cargas en la ciudad de Nueva York (Fuente propia)

Pavimento articulado: Estructura de pavimento conformada en su parte inferior por una capa de subrasante, la cual puede ser natural o mejorada, posteriormente puede contar con capas de sub base granular y base granular, así como capas de materiales ligados y en la capa de rodadura cuenta con adoquines de concreto o arcilla los cuales van colocados sobre una cama de arena y además posee juntas entre adoquines que se llenan con arena.

Resistencia a la compresión: Esfuerzo máximo generado sobre un adoquín cuando se le aplica una carga axial sobre toda su área. En este caso el adoquín debe garantizar ciertos criterios geométricos, como una relación de aspecto (espesor entre ancho del elemento), la cual es mucho más pequeña que la utilizada en los cilindros de concreto, por lo tanto los valores de resistencia a la compresión obtenidos en ensayos sobre adoquines no son comparables con los valores de resistencia a la compresión de cilindros de concreto hidráulico.



Figura 7.7 Ensayo de resistencia a la compresión de adoquines realizado por el autor en el laboratorio de materiales de la Universidad del Cauca (Fuente propia)

Resistencia a la flexotracción (módulo de rotura): Esfuerzo máximo generado sobre un adoquín simplemente apoyado, cuando se aplica una carga en la mitad del elemento que genere un momento máximo, lo que ocasiona que el elemento falle en la fibra sometida a tensión (flexotracción). La cual se calcula como el producto del momento máximo y la distancia al eje neutro del elemento, dividido su momento de inercia.



Figura 7.8 Ensayo de resistencia a la flexión de adoquines realizado por el autor en el laboratorio de materiales de la Universidad del Cauca (Fuente propia)

8. Metodología y plan de trabajo

El proyecto se realizó en dos etapas, la primera fue la etapa de laboratorio en donde se realizaron ensayos de resistencia a la compresión y flexotracción necesarios para cumplir los objetivos, y la otra fue la etapa teórica, en donde se revisó la información bibliográfica existente y se modelaron teóricamente los esfuerzos que se generan en un adoquín rectangular de concreto individual utilizando el programa de elementos finitos llamado EverFe 2.24 de la Universidad de Maine (Bill Davids, Ph.D., P.E. University of Maine Dept. of Civil and Environmental

Engineering, 2003) para lo cual se tuvo en cuenta la variación del soporte y el tipo y magnitud de las cargas sobre el adoquín.

Para poder obtener resultados de resistencia a la flexotracción y resistencia a la compresión, se obtuvieron adoquines rectangulares de concreto fabricados por un proveedor en la ciudad de Popayán, las dimensiones aproximadas de los adoquines obtenidos son las siguientes: 200 mm de largo, 100 mm de ancho y 60 mm de espesor o altura, las muestras corresponden a edades de 1 a 2 días y superiores a 28 días.

El número de muestras necesarias para obtener la correlación se obtuvo de acuerdo al procedimiento descrito en el Manual de Diseño de Pavimentos Flexibles Para Vías con Medios y Altos Volúmenes de Tránsito del Instituto Nacional de Vías del año 1998 (Instituto Nacional de Vías, 1998), el cual se basa en los niveles de confianza, y la descripción de la metodología se cita textualmente a continuación:

“La filosofía básica de estos niveles de confianza se explica por el concepto de la probabilidad o seguridad que la diferencia entre el valor medio de la muestra y el valor medio de la población esté dentro de los límites preestablecidos. Inicialmente se debe definir el error permitido es decir cuánto es conveniente que se aleje la media del muestreo (X_{med}) de la media de la población (μ), posteriormente escoger el nivel de confianza o probabilidad de que la diferencia entre ($X_{med} - \mu$) sea igual o menor que el valor establecido como máximo error permitido.

Se utilizó la expresión de intervalo de confianza de dos lados para una distribución Normal. En ningún caso el número de ensayos será menor a cuatro.

$$(X_{med} - \mu) = K_{\frac{\alpha}{2}} * (\sigma/n^{0.5}) = \text{Máximo Error Permitido} \quad \text{Ec. 8.1}$$

Dónde:

$K_{\frac{\alpha}{2}}$: Es el número de veces que se debe contemplar la desviación estándar para lograr un determinado grado de confiabilidad. Para el nivel de confianza de 95% es 1.96 y para el 90% es 1.645

α : Nivel de significación

σ : Desviación estándar encontrada ”

Para este trabajo se determinó lo siguiente:

| | |
|---|------|
| Resistencia a la flexotracción promedio (MPa) | 5 |
| Error permitido (MPa) | 0.30 |
| K (para confiabilidad del 95%) | 1.96 |
| Coefficiente de variación | 0.15 |
| desviación estándar (MPa) | 0.75 |
| Número de ensayos (n) | 25 |

Tabla 8.1 Cálculo del número de ensayos para resistencia a la flexotracción

| | |
|--|------|
| Resistencia a la compresión promedio (MPa) | 55 |
| Error permitido (MPa) | 3.2 |
| K (para confiabilidad del 95%) | 1.96 |
| Coefficiente de variación | 0.15 |
| desviación estándar (MPa) | 8.25 |
| Número de ensayos (n) | 25.0 |

Tabla 8.2 Cálculo del número de ensayos para resistencia a la compresión

Como mínimo se requieren 25 resultados de resistencia a la compresión y resistencia a la flexotracción, para poder obtener resultados más confiables, en este proyecto a cada adoquín se le realizó el ensayo de resistencia a la flexotracción y a la mitad sobrante de este ensayo se le realizó en ensayo de resistencia a la compresión, garantizando siempre los requerimientos de la norma.



Figura 8.1 Adoquines utilizados en el proyecto después del ensayo de resistencia a la flexotracción. (Fuente propia)

En este trabajo se obtuvieron 69 resultados de resistencia a la flexotracción y 51 resultados de resistencia a la compresión.

Los resultados de resistencia a la flexotracción se obtuvieron de acuerdo al procedimiento descrito en la Norma Técnico Colombiana NTC 2017 (segunda actualización), en donde el adoquín simplemente apoyado se falla aplicándole una carga ubicada en la mitad de su superficie, el valor de la resistencia a la flexotracción es el momento máximo generado

multiplicado por la distancia de la fibra inferior al eje neutro y dividido entre el momento de inercia.

De acuerdo a la norma los adoquines se deben fallar en estado saturado y superficialmente seco, lo cual se acató en este trabajo.

Los resultados de resistencia a la compresión se obtuvieron de acuerdo al procedimiento descrito en la norma de ensayo del Instituto Nacional de Vías, INV E 426-13, que consiste en someter al adoquín a una carga axial sobre toda su área superficial hasta llegar a su falla, con lo que se obtiene la resistencia a la compresión. Cabe anotar que la norma tiene un factor de relación de aspecto, el cual depende del espesor y ancho del adoquín, el cual se utiliza para normalizar la resistencia a la compresión a la de un adoquín rectangular de 60 mm de espesor, ancho 98mm y largo 198mm, como lo describe la norma.

De acuerdo a la norma los adoquines se deben fallar sin humedad visible y secos al aire, lo cual se acató en este trabajo.

9. Resultados.

9.1 Resultados de laboratorio

Aplicando la metodología propuesta anteriormente se determinaron en el laboratorio de materiales de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad del Cauca los resultados de resistencia a la compresión y flexotracción de los adoquines obtenidos para este proyecto, siguiendo los procedimientos descritos en las normas NTC 2017 e INV E 426-13, respectivamente.

En la Tabla 9.1 se presentan los resultados de la resistencia a la flexotracción obtenidos con el procedimiento descrito en la norma NTC 2017 para los adoquines de este proyecto:

| Adoquín No. | Resistencia a la flexotracción (MPa) | Adoquín No. | Resistencia a la flexotracción (MPa) | Adoquín No. | Resistencia a la flexotracción (MPa) |
|--------------------|---|--------------------|---|--------------------|---|
| 2 | 2.1 | 27 | 2.2 | 52 | 7.4 |
| 3 | 2 | 28 | 2.3 | 53 | 9.5 |
| 4 | 1.1 | 29 | 2.3 | 54 | 8.2 |
| 5 | 2.1 | 30 | 1.1 | 55 | 6.5 |
| 6 | 2.1 | 31 | 2.1 | 56 | 6 |
| 7 | 2.3 | 32 | 2.2 | 57 | 8.9 |
| 8 | 2.4 | 33 | 1.3 | 58 | 9.1 |
| 9 | 2.5 | 34 | 8.1 | 59 | 10 |
| 10 | 1.9 | 35 | 4.2 | 60 | 6.1 |
| 11 | 2 | 36 | 9.2 | 61 | 6.4 |
| 12 | 2.9 | 37 | 6 | 62 | 5 |
| 13 | 2 | 38 | 9.6 | 63 | 5.5 |
| 14 | 2 | 39 | 1.9 | 64 | 7 |
| 15 | 0.8 | 40 | 9.2 | 65 | 8.1 |
| 16 | 2.2 | 41 | 6.4 | 66 | 6.9 |
| 17 | 0.5 | 42 | 2.2 | 67 | 7.8 |
| 18 | 1.9 | 43 | 8 | 68 | 9.4 |
| 19 | 2.2 | 44 | 4.9 | 69 | 7.8 |
| 20 | 2.2 | 45 | 7.5 | 70 | 7.9 |
| 21 | 2 | 46 | 5.5 | | |
| 22 | 2.1 | 47 | 6.4 | | |
| 23 | 1.2 | 48 | 6.2 | | |
| 24 | 2.7 | 49 | 7.1 | | |
| 25 | 2.2 | 50 | 8.4 | | |
| 26 | 2.6 | 51 | 6.9 | | |

Tabla 9.1 Resultados resistencia a la flexotracción

Nota: los primeros adoquines cuentan con edades de 1 y 2 días y los demás con edades superiores a 28 días.



Figura 9.1 Ensayo de resistencia a la flexotracción del proyecto (Fuente propia)

En la tabla Tabla 9.2 se presentan los resultados de la resistencia a la compresión obtenida con el procedimiento descrito en la norma INV E -426 -13 para los adoquines de este proyecto:

| Adoquín No. | Resistencia a la compresión (MPa) | Adoquín No. | Resistencia a la compresión (MPa) | Adoquín No. | Resistencia a la compresión (MPa) |
|--------------------|--|--------------------|--|--------------------|--|
| 2 | 4.6 | 36 | 11.7 | 59 | 33.0 |
| 5 | 7.9 | 37 | 15.8 | 60 | 31.3 |
| 6 | 11.6 | 38 | 39.0 | 61 | 27.3 |
| 9 | 4.6 | 39 | 7.9 | 63 | 23.1 |
| 10 | 7.9 | 40 | 43.2 | 64 | 31.0 |
| 11 | 10.7 | 41 | 34.6 | 65 | 36.6 |
| 12 | 11.6 | 42 | 8.0 | 66 | 32.8 |
| 13 | 7.6 | 43 | 29.4 | 67 | 30.2 |
| 14 | 7.1 | 45 | 31.8 | 68 | 32.6 |
| 16 | 6.9 | 47 | 34.7 | 69 | 28.1 |
| 19 | 8.1 | 48 | 29.3 | 70 | 21.3 |
| 20 | 7.9 | 49 | 27.2 | | |
| 21 | 8.1 | 50 | 37.2 | | |
| 22 | 10.3 | 52 | 21.5 | | |
| 26 | 10.3 | 53 | 30.8 | | |
| 31 | 7.9 | 54 | 25.6 | | |
| 32 | 5.9 | 55 | 19.8 | | |
| 33 | 4.3 | 56 | 34.3 | | |
| 34 | 29.5 | 57 | 40.1 | | |
| 35 | 17.9 | 58 | 31.4 | | |

Tabla 9.2 Resultados de resistencia a la compresión

Nota: los primeros adoquines cuentan con edades de 1 y 2 días y los demás con edades superiores a 28 días.



Figura 9.2 Ensayo de resistencia a la compresión del proyecto (Fuente propia)

9.2 Resultado del análisis por elementos finitos

Para tratar de estimar cuales son los esfuerzos predominantes en un adoquín rectangular de 100 mm x 200mm de concreto, se utilizó la modelación de este elemento en una estructura de pavimento, utilizando una carga vehicular y posteriormente una carga de contenedores (para el caso de patios de contenedores en puertos), además se trabajó con dos espesores, uno de 60 mm y el otro de 80 mm, y por último se trató de variar la estructura de soporte de los adoquines, desde blanda, normal y rígida. Para realizar la modelación de utilizó el programa de elementos finitos llamado EverFe 2.24 de la

Universidad de Maine (Bill Davids, Ph.D., P.E. University of Maine Dept. of Civil and Environmental Engineering, 2003)

Adoquines modelados:

- Espesor: 60 mm, ancho: 100 y largo: 200 mm
- Espesor: 80 mm, ancho: 100 y largo: 200 mm

Cargas utilizadas:

Tipo: Vehicular

Presión: 0.800 MPa, la cual es la que se utiliza comúnmente como presión de inflado en el diseño de pavimentos.

Ubicación: La posición analizada fue cuando la rueda que tiene aproximadamente 100 mm de radio, pasa por la mitad del área del adoquín, ancho de 100 mm y largo de 100 mm, esto debido a que en la bibliografía revisada es cuando se podrían presentar a la vez esfuerzos de flexotracción y compresión considerables.



Figura 9.3 Carga vehicular sobre un pavimento articulado. (The precast concrete paving and kerb association, 2007)

Tipo: Contenedores

Presión: 12.5 MPa, la cual es la máxima presión de contacto por 8 contenedores apilados, según THE STRUCTURAL DESIGN OF HEAVY DUTY PAVEMENTS FOR PORTS AND OTHER INDUSTRIES (The precast concrete paving and kerb association, 2007).

Ubicación: La posición analizada fue cuando uno de los cuatro apoyos del contenedor que tiene aproximadamente 178mm x 162mm, queda en la mitad del área del adoquín, ancho de 100 mm y largo de 100 mm, esto debido a que en la bibliografía revisada es cuando se podrían presentar a la vez esfuerzos de flexotracción y compresión considerables.



Figura 9.4 Carga de contenedores sobre pavimento articulado. (The precast concrete paving and kerb association, 2007)

Tipos de soporte utilizados:

- Blando: El cual trata de asemejar una subrasante con un suelo fino débil y una capa granular sin ligar con bajo espesor y de bajo módulo.
- Normal: El cual trata de asemejar una subrasante con un suelo fino de resistencia aceptable y capas granulares sin ligar con espesores y módulos que normalmente se utilizan en pavimentos articulados.
- Rígido: El cual trata de asemejar una subrasante con un suelo fino de buena resistencia y capas granulares estabilizadas de gran rigidez.

Nota: Los espesores y módulos de las capas utilizados para representar estos tipos de apoyos se presentan en el Anexo 1.

En la Tabla 9.3 se presentan los resultados de los esfuerzos predominantes en los casos analizados con el programa de elementos finitos, tanto de compresión como de tracción:

| Espesor (mm) | Tipo carga | Tipo de soporte | Valor máximo Esfuerzo tensión (MPa) | Valor máximo esfuerzo compresión (MPa) |
|---------------------|-------------------|------------------------|--|---|
| 60 | Vehicular | Normal | 2.24 | 2.53 |
| 80 | Vehicular | Normal | 1.79 | 2.52 |
| 60 | Vehicular | Blando | 1.93 | 2.53 |
| 80 | Vehicular | Blando | 1.53 | 2.52 |
| 60 | Vehicular | Rígido | 0.32 | 1.03 |
| 80 | Vehicular | Rígido | 0.21 | 1.05 |
| 80 | Contenedores | Normal | 3.69 | 17.02 |
| 80 | Contenedores | Blando | 3.77 | 16.98 |
| 80 | Contenedores | Rígido | 3.23 | 16.26 |

Tabla 9.3 Resultado de los esfuerzos máximos encontrados utilizando el programa de elementos finitos

A manera de ejemplo se presenta los pantallazos de la corrida del software para una carga vehicular, soporte normal y espesor 60 mm, los demás resultados se presentan en el Anexo 1.

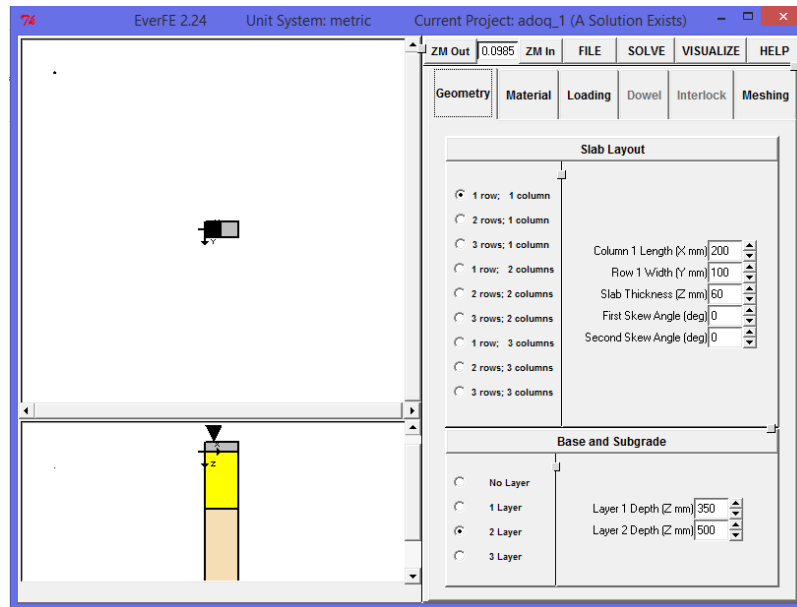


Figura 9.5 Datos entrada: Geometría del adoquín y capas de la estructura del pavimento en el programa EverFe 2.24 (Fuente propia)

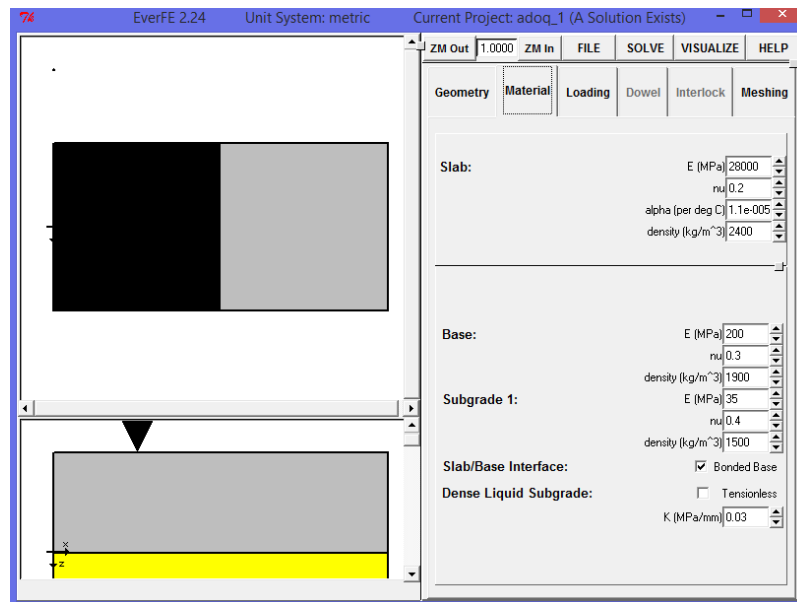


Figura 9.6 Datos entrada: Propiedades mecánicas del adoquín y de las capas de la estructura del pavimento en el programa EverFe 2.24 (Fuente propia)

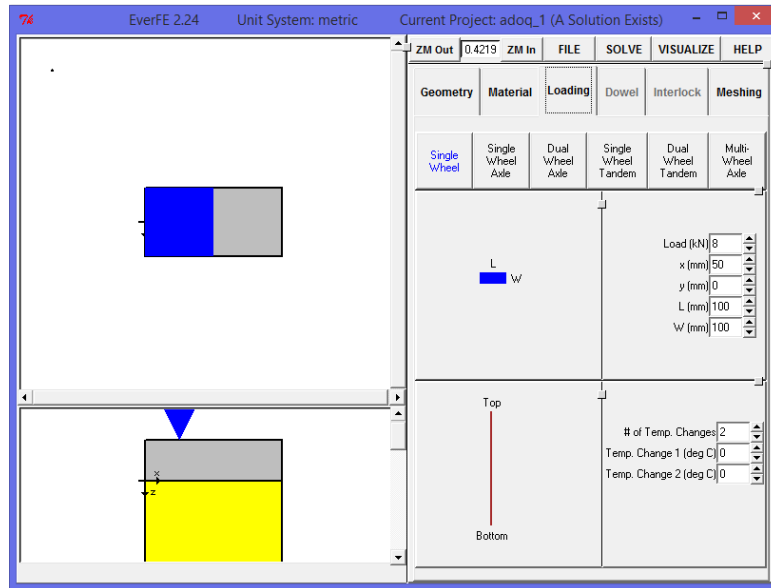


Figura 9.7 Datos entrada: modelación de la carga en el programa EverFe 2.24 (Fuente propia)

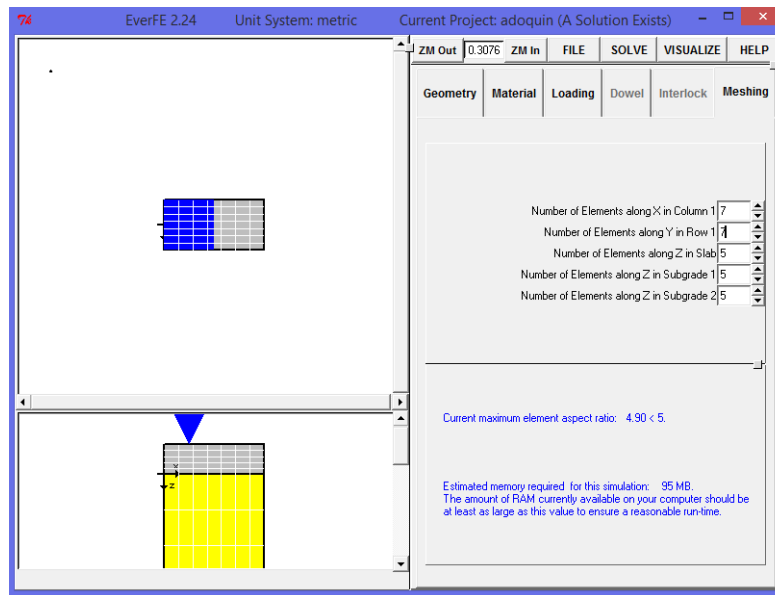


Figura 9.8 Generación de la malla en el programa EverFe 2.24 (Fuente propia)

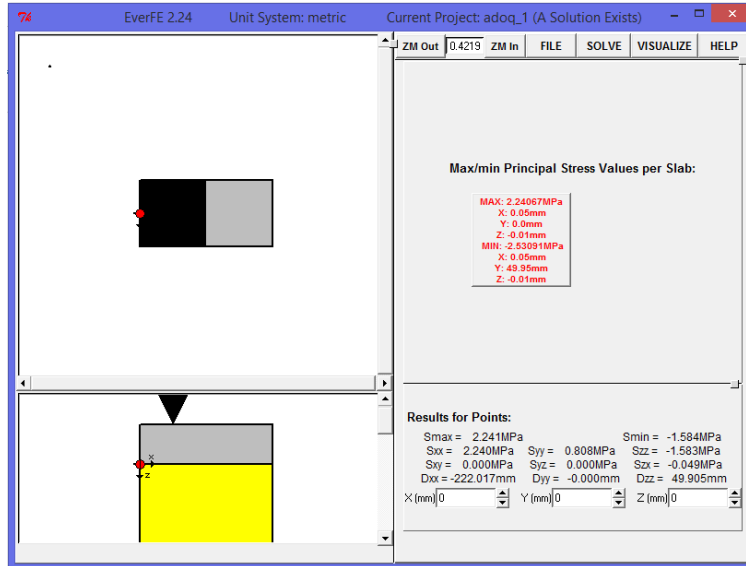


Figura 9.9 Resultado de los esfuerzos máximos encontrados en el programa EverFe 2.24 (Fuente propia)

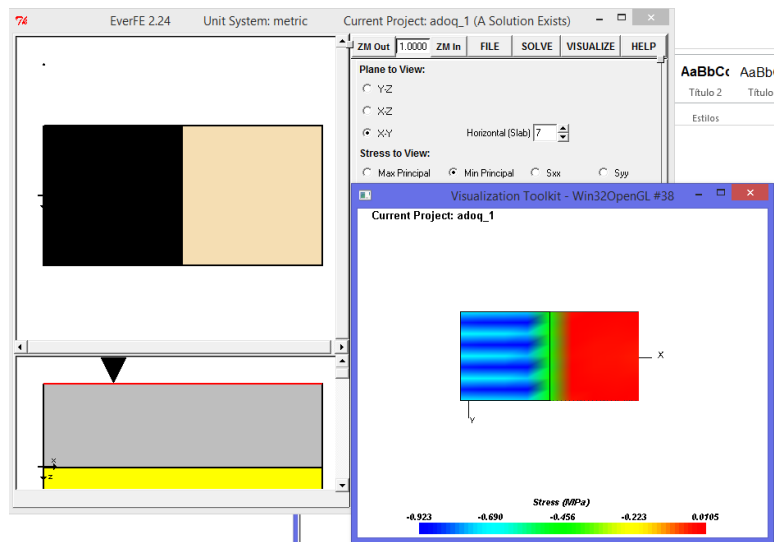


Figura 9.10 Diagrama de distribución de esfuerzos de compresión en la superficie encontrado con en el programa EverFe 2.24 (Fuente propia)

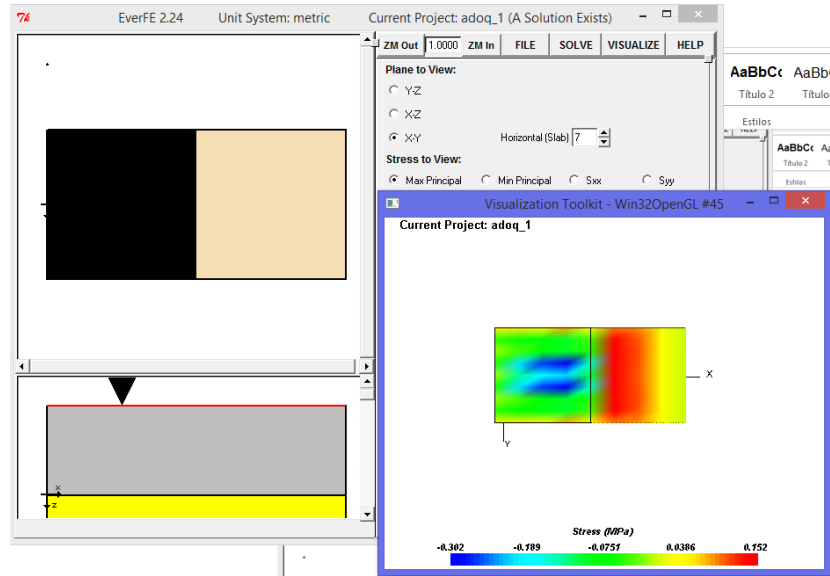


Figura 9.11 Diagrama de distribución de esfuerzos de tensión en la superficie encontrado con en el programa EverFe 2.24 (Fuente propia)

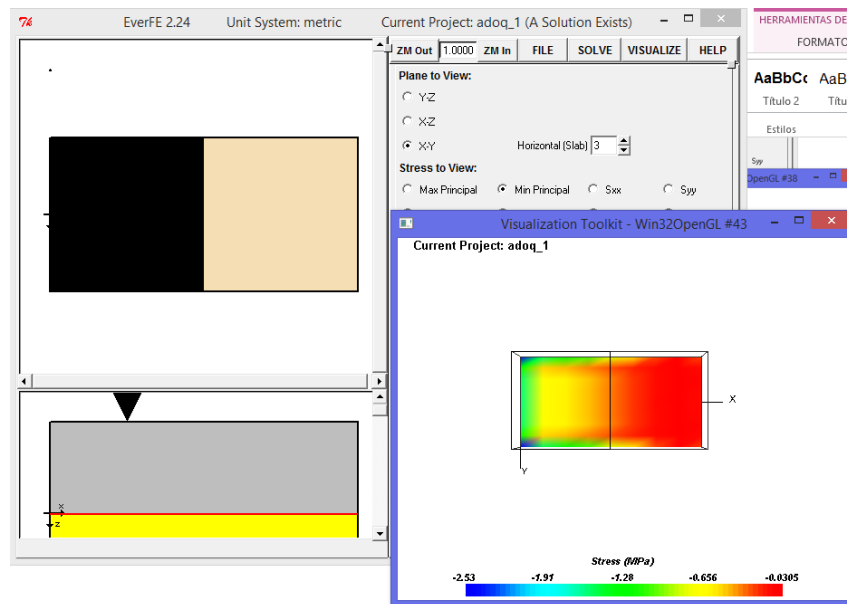


Figura 9.12 Diagrama de distribución de esfuerzos máximos de compresión en la parte inferior encontrado con en el programa EverFe 2.24 (Fuente propia)

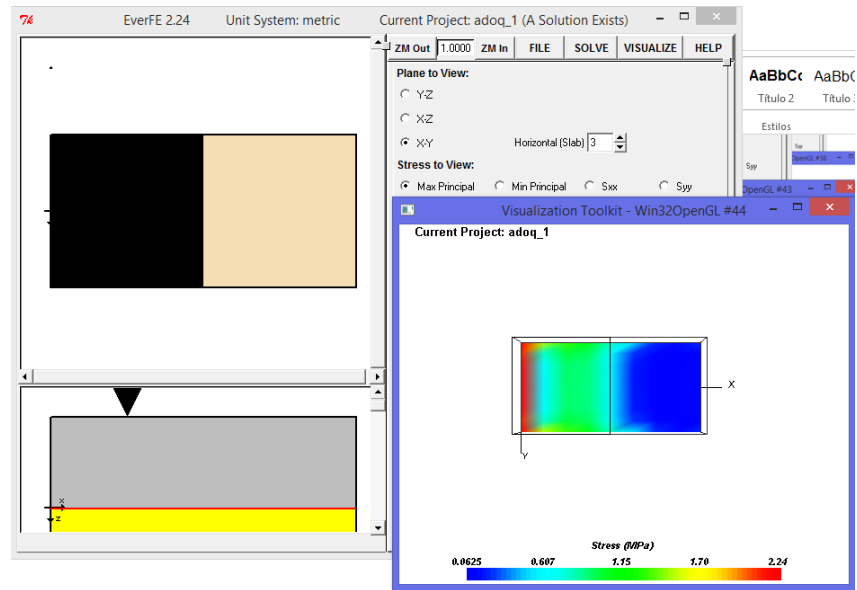


Figura 9.13 Diagrama de distribución de esfuerzos de tensión en la parte inferior encontrado con en el programa EverFe 2.24 (Fuente propia)

10. Análisis de los resultados

10.1 Análisis de los resultados de laboratorio

Primero se realizó el análisis comparativo entre los valores obtenidos en el laboratorio con los valores requeridos en las especificaciones. Para el caso de resistencia a la flexotracción la norma NTC 2017 exige que ningún valor individual este por debajo de 4.2 MPa y que el promedio de 5 especímenes se encuentre como mínimo en 5 MPa, esto para el caso en que no se tenga el resultado del ensayo de longitud de la huella. Para la resistencia a la compresión el Instituto Nacional de Vías en su especificación del artículo 510 de 2013, exige que ningún valor individual este por debajo de 50 MPa y que el promedio de 5 elementos se encuentre como mínimo en 55 MPa.

En la Figura 10.1 se presenta el análisis de los resultados de resistencia a la flexotracción comparados con la norma NTC 2017 para edades superiores a veintiocho (28) días:

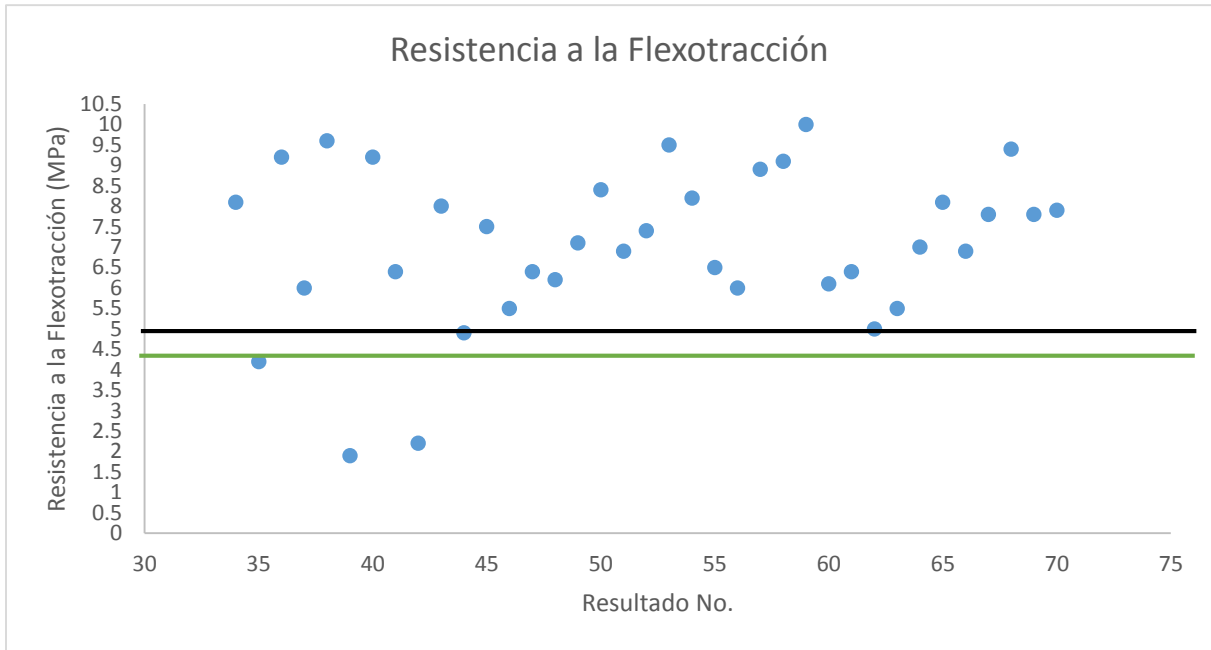


Figura 10.1 Resultados de resistencia a la flexotracción comparados con la norma NTC 2017 (Fuente propia)

Para los adoquines utilizados en este proyecto, los especímenes que tienen más de 28 días cumplen en su gran mayoría con los valores de resistencia a la flexotracción establecidos en la norma NTC 2018.

En la Figura 10.2 se presenta el análisis de los resultados de resistencia a la compresión comparados con la especificación del artículo 510 -13 del INVIAS para edades superiores a veintiocho (28) días:

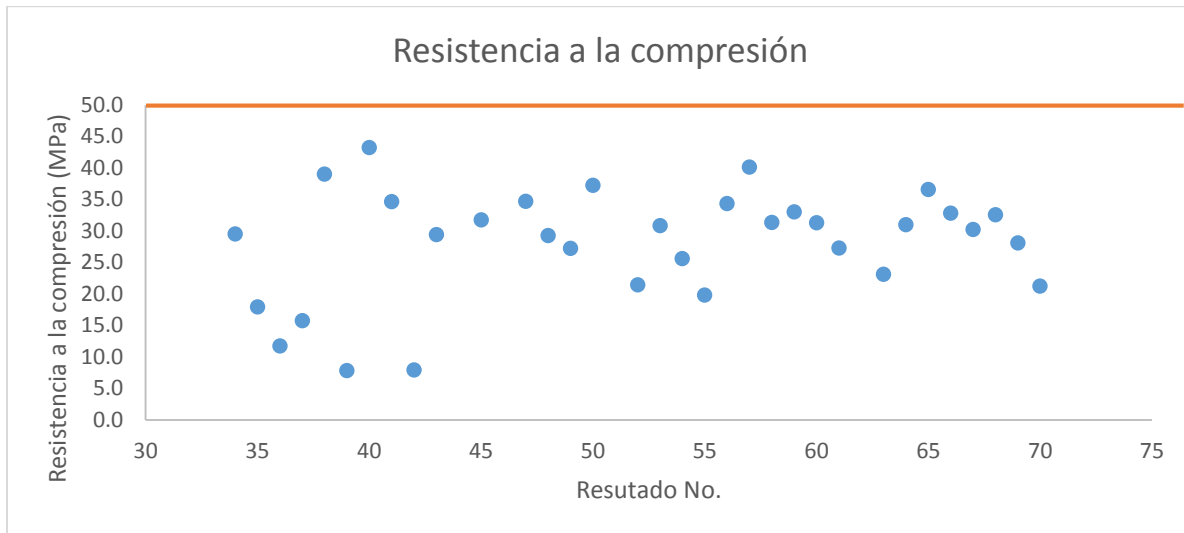


Figura 10.2 Resultados de resistencia a la compresión comparados con la especificación del artículo 510 -13 del INVIAS (Fuente propia)

Para los adoquines utilizados en este proyecto, se encontró que ninguno de los adoquines cumple con el valor mínimo individual especificado en el artículo 510 -13 del INVIAS y mucho menos con el valor del promedio de 5 elementos solicitado en esta especificación.

Como se mencionó anteriormente la metodología utilizada fue fallar inicialmente el adoquín a flexotracción y con la mitad obtenida de este ensayo se realizó el ensayo de resistencia a la compresión, garantizando así que un mismo adoquín tuviera resultados de resistencia a la flexotracción y compresión. Como se puede observar en la Figura 10.1, la mayoría de los especímenes con edades superiores a 28 días que es la estipulada en la especificación, cumplen con los criterios de flexotracción, pero al analizar los resultados

analizados en la Figura 10.2, se encuentra que los especímenes que cumplen los valores de resistencia que solicita la norma NTC 2017, no cumplen con los valores de resistencia requeridos en la especificación del artículo 510 -13 del INVIAS.

Esto marca una gran diferencia entre las especificaciones de estas dos entidades, ya que al parecer se estaría hablando de calidades diferentes entre los adoquines, siendo el INVIAS más exigente en temas de resistencia para los resultados obtenidos en esta investigación.

Un factor muy importante en la realización de este análisis, es la fabricación de los adoquines, en donde la compactación podría variar drásticamente dependiendo del tipo de maquinaria utilizada, ya que algunas podrían ejercer mayor presión que otras y por ende unos adoquines tener más vacíos (permeables y no permeables) que otros. Aparte de la forma de compactación, otro factor importante es la granulometría de los agregados ya que esta también puede influenciar el contenido de vacíos (permeables y no permeables).

Por lo tanto un aumento en la cantidad de vacíos podría disminuir la resistencia a la compresión, aunque también se podría ver una reducción en la resistencia a la flexotracción, pero esta última, para el caso de adoquines de concreto hidráulico podría estar más influenciada por la resistencia de la pasta, ya que es la pasta quien une a los agregados y la que se vería más solicitada por esfuerzos de flexotracción.

Como referencia en el libro de la PCA (Portland Cement Association, Steven H. Kosmatka and Michelle L. Wilson, 2011), se explica que la resistencia a la compresión disminuye con un aumento de la relación agua material cementante, ya que se presentarían mayores vacíos en la pasta por la evaporación del agua que no logra reaccionar con el cemento, también se informa que algunos aditivos inclusores de aire

pueden disminuir la resistencia a la compresión, aunque esto también se podría ver reflejado en una pérdida de resistencia a la flexión. Pero la gran diferencia entre la mezcla de concreto normal de la cual se habla en el libro, con la mezcla de concreto para adoquines, es que la primera en estado fresco presenta un comportamiento plástico y manejable debido a la gran cantidad de pasta, en cambio la segunda se cataloga como mezcla seca, por su baja cantidad de pasta, por lo tanto los adoquines podrían ser más sensibles a los cambios de vacíos, especialmente su resistencia a la compresión.

Adicionalmente en la revista Concrete Thecnology Today de la PCA, Volúmen 6, número 4 (PORTLAND CEMENT ASSOCIATION) se presentan gráficos de relación entre la resistencia a la flexión y resistencia a la compresión para concretos normales y concretos con aire incluido, en donde se evidencia que para valores similares de resistencia a la flexión se obtienen valores distintos de resistencia a la compresión, siendo el concreto que presenta aire incluido el que cuenta valores más bajos de resistencia a la compresión.

Para tratar de analizar más a fondo la relación entre la resistencia a la flexotracción y la resistencia a la compresión, en este trabajo se determinaron unas posibles correlaciones entre estos dos valores, lo cual se presenta a continuación en la Tabla 10.1:

| Adoquín No. | Resistencia a la flexotracción (MPa) | Adoquín No. | Resistencia a la compresión (MPa) | Adoquín No. | Resistencia a la flexotracción (MPa) | Adoquín No. | Resistencia a la compresión (MPa) |
|-------------|--------------------------------------|-------------|-----------------------------------|-------------|--------------------------------------|-------------|-----------------------------------|
| 2 | 2.1 | 2 | 4.6 | 37 | 6 | 37 | 15.8 |
| 3 | 2 | | | 38 | 9.6 | 38 | 39.0 |
| 4 | 1.1 | | | 39 | 1.9 | 39 | 7.9 |
| 5 | 2.1 | 5 | 7.9 | 40 | 9.2 | 40 | 43.2 |
| 6 | 2.1 | 6 | 11.6 | 41 | 6.4 | 41 | 34.6 |
| 7 | 2.3 | | | 42 | 2.2 | 42 | 8.0 |
| 8 | 2.4 | | | 43 | 8 | 43 | 29.4 |
| 9 | 2.5 | 9 | 4.6 | 44 | 4.9 | | |
| 10 | 1.9 | 10 | 7.9 | 45 | 7.5 | 45 | 31.8 |
| 11 | 2 | 11 | 10.7 | 46 | 5.5 | | |
| 12 | 2.9 | 12 | 11.6 | 47 | 6.4 | 47 | 34.7 |
| 13 | 2 | 13 | 7.6 | 48 | 6.2 | 48 | 29.3 |
| 14 | 2 | 14 | 7.1 | 49 | 7.1 | 49 | 27.2 |
| 15 | 0.8 | | | 50 | 8.4 | 50 | 37.2 |
| 16 | 2.2 | 16 | 6.9 | 51 | 6.9 | | |
| 17 | 0.5 | | | 52 | 7.4 | 52 | 21.5 |
| 18 | 1.9 | | | 53 | 9.5 | 53 | 30.8 |
| 19 | 2.2 | 19 | 8.1 | 54 | 8.2 | 54 | 25.6 |
| 20 | 2.2 | 20 | 7.9 | 55 | 6.5 | 55 | 19.8 |
| 21 | 2 | 21 | 8.1 | 56 | 6 | 56 | 34.3 |
| 22 | 2.1 | 22 | 10.3 | 57 | 8.9 | 57 | 40.1 |
| 23 | 1.2 | | | 58 | 9.1 | 58 | 31.4 |
| 24 | 2.7 | | | 59 | 10 | 59 | 33.0 |
| 25 | 2.2 | | | 60 | 6.1 | 60 | 31.3 |
| 26 | 2.6 | 26 | 10.3 | 61 | 6.4 | 61 | 27.3 |
| 27 | 2.2 | | | 62 | 5 | | |
| 28 | 2.3 | | | 63 | 5.5 | 63 | 23.1 |
| 29 | 2.3 | | | 64 | 7 | 64 | 31.0 |
| 30 | 1.1 | | | 65 | 8.1 | 65 | 36.6 |
| 31 | 2.1 | 31 | 7.9 | 66 | 6.9 | 66 | 32.8 |
| 32 | 2.2 | 32 | 5.9 | 67 | 7.8 | 67 | 30.2 |
| 33 | 1.3 | 33 | 4.3 | 68 | 9.4 | 68 | 32.6 |
| 34 | 8.1 | 34 | 29.5 | 69 | 7.8 | 69 | 28.1 |
| 35 | 4.2 | 35 | 17.9 | 70 | 7.9 | 70 | 21.3 |
| 36 | 9.2 | 36 | 11.7 | | | | |

Tabla 10.1 Resultados de resistencia a la flexotracción y resistencia a la compresión para los mismos especímenes

Como se pudo observar, no todos los adoquines que se fallaron a flexotracción, se pudieron fallar a compresión, esto debido a que algunas de las mitades obtenidas no cumplían con la relación de aspecto requerida en la norma INV E -426 -13, aun así se contó con más resultados de los requeridos en el análisis estadístico.

Para determinar la correlación, se realizó una regresión tratando de encontrar la ecuación que mejor describa el comportamiento, esto se ve reflejado en el coeficiente de determinación (r^2), el cual deberá estar lo más cercano posible a 1, generalmente las correlaciones más confiables son las que presentan un coeficiente de determinación mayor a 0.9.

Como se mencionó anteriormente se contó con resultados de 1 y 2 días y mayores a 28 días, por lo tanto se determinaron distintas correlaciones variando los resultados a utilizar en cada una de ellas, las ecuaciones aplican para resistencias a la flexotracción medidas mediante el procedimiento descrito en la norma NTC 2017 y para resistencias a la compresión medidas mediante el procedimiento descrito en la norma INV E -426 -13.

En la Figura 10.3 se presenta la correlación entre la resistencia a la compresión y resistencia a la flexotracción para todas las edades analizadas.

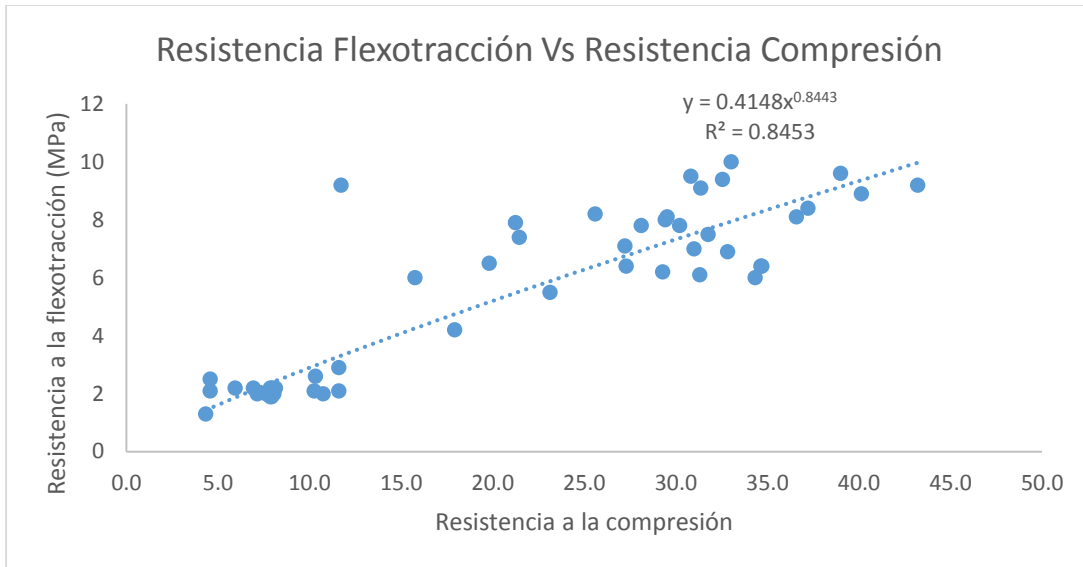


Figura 10.3 Correlación entre la resistencia a la compresión y resistencia a la flexotracción para todas las edades analizadas. (Fuente propia)

En este caso el mayor coeficiente de determinación (r^2) obtenido fue 0.8453, para una línea de tendencia de tipo potencial que presenta la siguiente ecuación:

$$\text{Resistencia a la flexotracción} = 0.4148 * \text{resistencia a la compresión}^{0.8443} \quad \text{Ec. 10.1}$$

Como se puede observar, para un mismo valor de resistencia a la flexotracción, se pueden encontrar varios valores de resistencia a la compresión, esto puede ser debido a los vacíos que presenta el elemento, los cuales afectan más drásticamente la resistencia a la compresión que a la resistencia a la flexotracción.

Para este caso no se obtuvo un coeficiente de determinación (r^2) superior a 0.9, por lo que se procedió a eliminar algunos valores extremos de los adoquines No 36, 41 y 56, lo cual se muestra en la Figura 10.4:

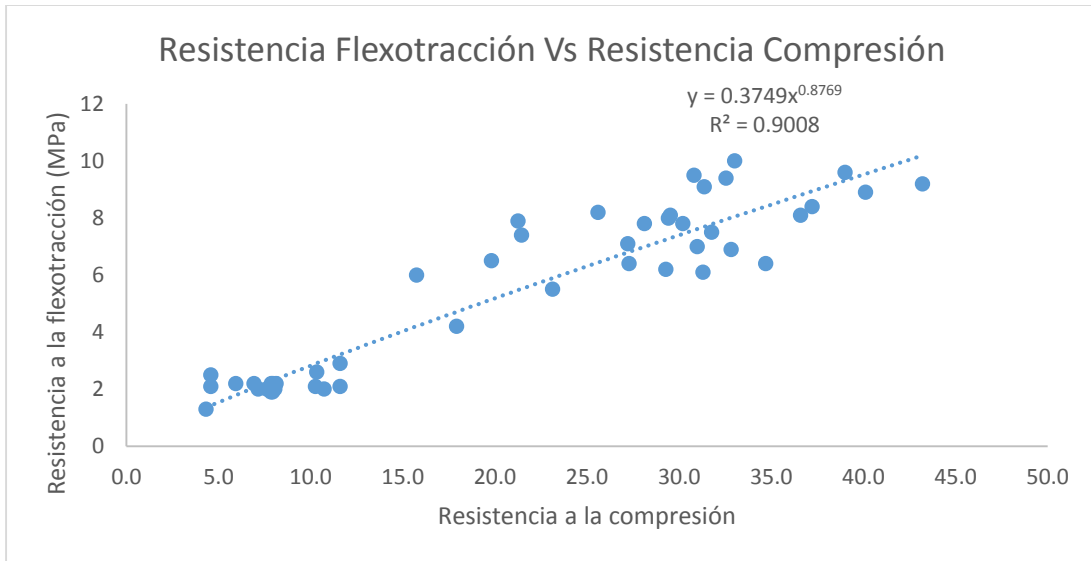


Figura 10.4 Correlación entre la resistencia a la compresión y resistencia a la flexotracción para todas las edades analizadas, eliminado valores extremos. (Fuente propia)

En este caso el mayor coeficiente de determinación (r^2) obtenido fue 0.9008, el cual es superior al anterior y a 0.9, para una línea de tendencia de tipo potencial que presenta la siguiente ecuación:

$$\text{Resistencia a la flexotracción} = 0.3749 * \text{resistencia a la compresión}^{0.8769} \quad \text{Ec. 10.2}$$

A continuación se procederá a trabajar con la información de resistencias obtenidas a edades superiores a 28 días, tal como se muestra en la Figura 10.5:

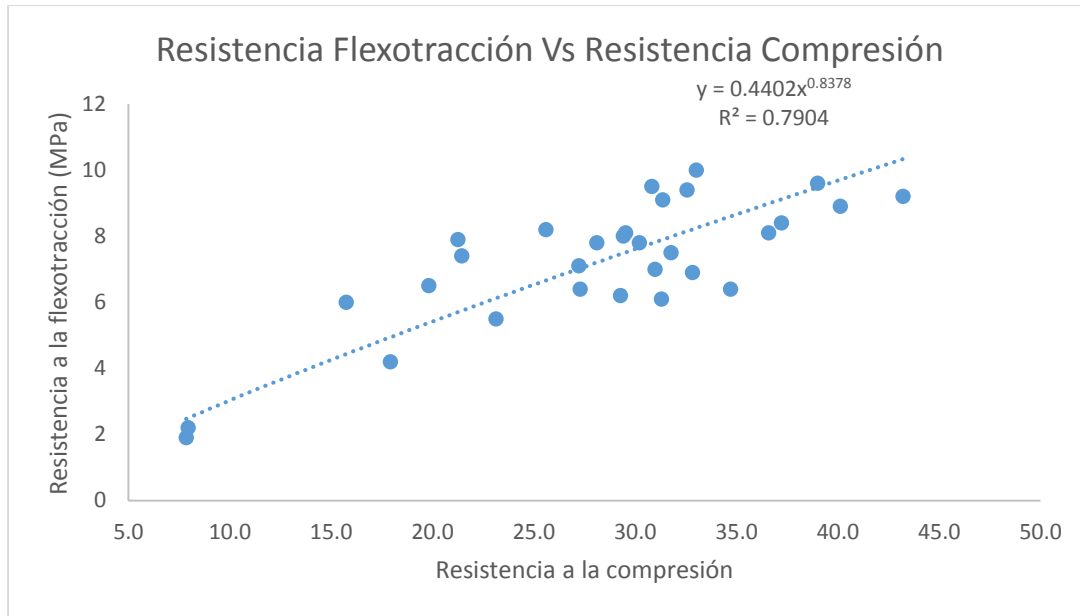


Figura 10.5 Correlación entre la resistencia a la compresión y resistencia a la flexotracción, eliminado valores extremos y con edades superiores a 28 días. (Fuente propia)

En este caso el mayor coeficiente de determinación (r^2) obtenido fue 0.7904, el cual es inferior a 0.9, para una línea de tendencia de tipo potencial que presenta la siguiente ecuación:

$$\text{Resistencia a la flexotracción} = 0.4402 * \text{resistencia a la compresión}^{0.8378} \quad \text{Ec. 10.3}$$

Adicionalmente como referencia se utilizó la misma metodología para determinar la correlación entre resistencia a la flexotracción y compresión de mezclas de concreto normales (convencionales), presentada en el libro Concreto simple (RIVERA LÓPEZ) y en la revista Concrete Thecnology Today de la PCA, Volumen 6, número 4 (PORTLAND CEMENT ASSOCIATION). Para este caso la ecuación general de esta correlación es la siguiente:

$$\text{Resistencia a la flexión} = K * \sqrt{\text{resistencia a la compresión}} \quad \text{Ec. 10.4}$$

Para resistencia a la compresión medida sobre cilindros de concreto con relación altura diámetro igual a 2 y para resistencia a la flexión usando una viga simplemente apoyada, cargada en los tercios de la luz libre.

El valor de K se encuentra entre 0.6 y 0.8 para unidades en MPa.

Como en este trabajo se conocen los resultados de resistencia a la flexotracción y resistencia a la compresión de adoquines (valores de edades superiores a 28 días y datos extremos eliminados), se procede a despejar el valor de K para cada caso y determinar un valor promedio como se realiza en el libro Concreto Simple y con este dato se obtiene la siguiente ecuación:

$$\text{Resistencia a la flexión} = 1.36 * \sqrt{\text{resistencia a la compresión (MPa)}} \quad \text{Ec. 10.5}$$

En este caso el valor de K sobrepasa los valores conocidos comúnmente, pero como se ha explicado anteriormente las mezclas de concreto para adoquines son muy distintas a las mezclas de concreto convencionales y además el ensayo de resistencia a la compresión en concreto hidráulico se realiza sobre un cilindro que tiene relación altura diámetro igual a 2, en cambio un adoquín tiene una relación altura ancho mucho más pequeña.

Esta correlación se compara con la encontrada anteriormente y se presenta a continuación en la Figura 10.6:

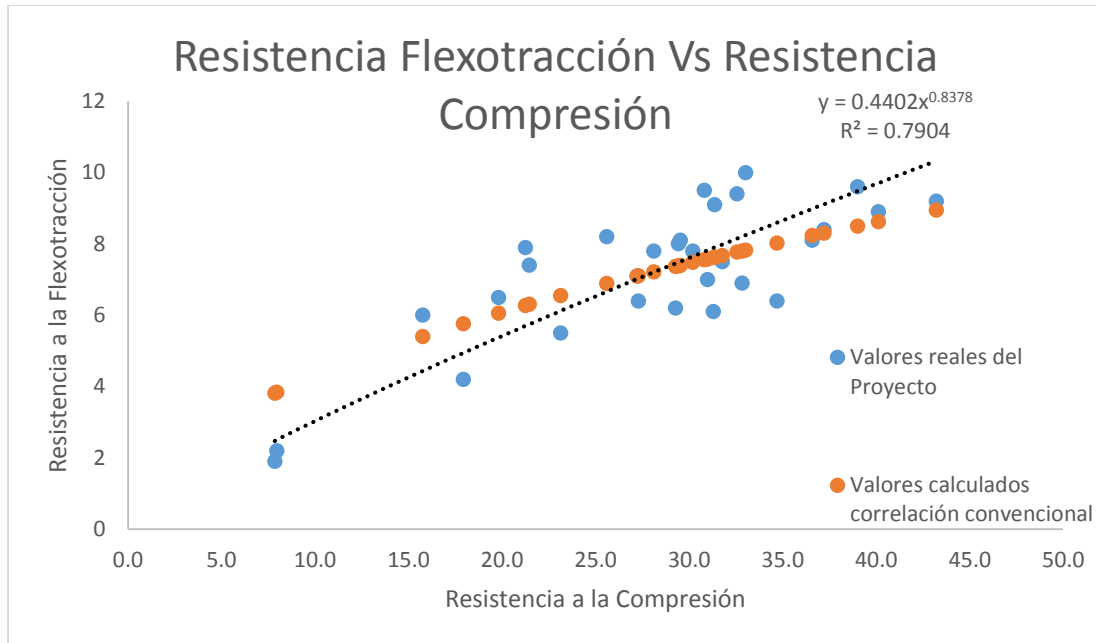


Figura 10.6 Correlación entre la resistencia a la compresión y resistencia a la flexotracción, eliminado valores extremos y con edades superiores a 28 días comparada con la correlación obtenida del concreto convencional.. (Fuente propia)

Se evidenció que la correlación convencional cuenta con una pendiente inferior a la última correlación obtenida en el proyecto, esto debido a que como ya se ha venido mencionando se cuenta con dos tipos de mezclas de concreto distintas y formas distintas de obtener las resistencias, especialmente en la resistencia a la compresión.

10.2 Análisis de los resultados obtenidos por modelación en elementos finitos.

Los resultados obtenidos por la modelación de un adoquín rectangular de largo 200 mm, ancho 100 mm y altura variable (60 mm y 80 mm), en el programa de elementos finitos EverFe 2.24 son los esfuerzos predominantes de compresión y tensión, los cuales se compararon con la resistencia del material para de determinar cuál sollicitación es más crítica en términos de esfuerzos mecánicos, por lo tanto los

esfuerzos de tensión se compararon con la resistencia individual a la flexotracción exigida en la norma NTC 2017 de 4.2 MPa, para los esfuerzos de compresión se compararon con el valor individual exigido en, en este caso de 50 MPa para espesores de 60 mm y de 43.7 MPa realizando la conversión a un espesor de 80 mm, adicionalmente como se ha mostrado en los resultados de laboratorio para este caso, los adoquines que cumplen con la NTC 2017, no cumplen con el artículo 510-13 de INVIAS, por lo que también se realizó la comparación para valores promedio de resistencia a la compresión obtenidos en este trabajo, 30 MPa y 26.2 MPa, para espesores de 60 mm y 80 mm respectivamente, lo cual se muestra en la Tabla 10.2, Tabla 10.3 y Tabla 10.4

| Espesor (mm) | Tipo carga | Tipo de soporte | Valor resistencia a la flexotracción NTC 2017 (MPa) | Valor máximo Esfuerzo tensión obtenido en EverFe (MPa) | % respecto al valor especificación |
|---------------------|-------------------|------------------------|--|---|---|
| 60 | Vehicular | Normal | 4.2 | 2.24 | 53.33 |
| 80 | Vehicular | Normal | 4.2 | 1.79 | 42.62 |
| 60 | Vehicular | Blando | 4.2 | 1.93 | 45.95 |
| 80 | Vehicular | Blando | 4.2 | 1.53 | 36.43 |
| 60 | Vehicular | Rígido | 4.2 | 0.32 | 7.62 |
| 80 | Vehicular | Rígido | 4.2 | 0.21 | 5.00 |
| 80 | Contenedores | Normal | 4.2 | 3.69 | 87.86 |
| 80 | Contenedores | Blando | 4.2 | 3.77 | 89.76 |
| 80 | Contenedores | Rígido | 4.2 | 3.23 | 76.90 |

Tabla 10.2 Comparación de esfuerzos obtenidos con elementos finitos y la resistencia exigida en la norma NTC 2017 (Fuente Propia)

| Espesor (mm) | Tipo carga | Tipo de soporte | Valor resistencia a la compresión art. INV 510-13 (MPa) e=60mm | Valor resistencia a la compresión art. INV 510-13 (MPa) convertida a e=80mm | Valor máximo esfuerzo compresión obtenido en EverFe (MPa) | % respecto al valor especificación |
|---------------------|-------------------|------------------------|---|--|--|---|
| 60 | Vehicular | Normal | 50 | 43.7 | 2.53 | 5.06 |
| 80 | Vehicular | Normal | 50 | 43.7 | 2.52 | 5.77 |
| 60 | Vehicular | Blando | 50 | 43.7 | 2.53 | 5.06 |
| 80 | Vehicular | Blando | 50 | 43.7 | 2.52 | 5.77 |
| 60 | Vehicular | Rígido | 50 | 43.7 | 1.03 | 2.06 |
| 80 | Vehicular | Rígido | 50 | 43.7 | 1.05 | 2.40 |
| 80 | Contenedores | Normal | 50 | 43.7 | 17.02 | 38.95 |
| 80 | Contenedores | Blando | 50 | 43.7 | 16.98 | 38.86 |
| 80 | Contenedores | Rígido | 50 | 43.7 | 16.26 | 37.21 |

Tabla 10.3 Comparación de esfuerzos obtenidos con elementos finitos y la resistencia exigida en el artículo 510 -13 del INVIAS (Fuente Propia)

| Espesor (mm) | Tipo carga | Tipo de soporte | Valor promedio resistencia a la compresión Obtenido en este trabajo (MPa) e=60mm | Valor promedio resistencia a la compresión Obtenido en este trabajo (MPa) convertida a e=80mm | Valor máximo esfuerzo compresión obtenido en EverFe (MPa) | % respecto al valor promedio obtenido |
|---------------------|-------------------|------------------------|---|--|--|--|
| 60 | Vehicular | Normal | 30 | 26.2 | 2.53 | 8.43 |
| 80 | Vehicular | Normal | 30 | 26.2 | 2.52 | 9.62 |
| 60 | Vehicular | Blando | 30 | 26.2 | 2.53 | 8.43 |
| 80 | Vehicular | Blando | 30 | 26.2 | 2.52 | 9.62 |
| 60 | Vehicular | Rígido | 30 | 26.2 | 1.03 | 3.43 |
| 80 | Vehicular | Rígido | 30 | 26.2 | 1.05 | 4.01 |
| 80 | Contenedores | Normal | 30 | 26.2 | 17.02 | 64.96 |
| 80 | Contenedores | Blando | 30 | 26.2 | 16.98 | 64.81 |
| 80 | Contenedores | Rígido | 30 | 26.2 | 16.26 | 62.06 |

Tabla 10.4 Comparación de esfuerzos obtenidos con elementos finitos y la resistencia promedio a la compresión obtenida (Fuente Propia)

Se encontró que los valores más altos de esfuerzos se presentan cuando un adoquín de espesor 80 mm (que es el espesor utilizado comúnmente en este tipo de estructura) soporta la carga de contenedores en un piso industrial, en estos casos se encuentra que el mayor esfuerzo de compresión es de 17.02 MPa para el caso de un apoyo normal y el mayor esfuerzo de tensión es de 3.77 MPa para el caso de un apoyo blando. En general para las cargas de contenedores la variación del soporte no genera cambios significativos entre los esfuerzos.

Para el caso de cargas vehiculares se encontró que los valores más altos de esfuerzos se presentan cuando un adoquín tiene espesor 60 mm y un apoyo de tipo normal, en estos

casos se encontró que el mayor esfuerzo de compresión es de 2.53 MPa y el mayor esfuerzo de tensión es de 2.24 MPa. En estos casos los esfuerzos presentados para apoyos normales y blandos no difieren bastante, pero si se presenta una gran disminución cuando se trabaja con un apoyo de tipo rígido.

Cuando se compararon los esfuerzos obtenidos con los valores de la especificación y promedios obtenidos se obtuvo que la mayor relación de esfuerzos en porcentaje es de 89.76%, para el caso esfuerzos de flexotracción con un adoquín de 80 mm de espesor, carga de contenedores, apoyo blando, y valor de resistencia a la flexotracción para un valor individual de la especificación NTC 2017 de 4.2 MPa, en este caso se estaría llegando al límite de falla del adoquín.

Para cargas vehiculares se obtuvo que la mayor relación de esfuerzos en porcentaje es de 53.33%, para el caso esfuerzos de flexotracción con un adoquín de 60 mm de espesor, apoyo normal, y valor de resistencia a la flexotracción para un valor individual de la especificación NTC 2017 de 4.2 MPa, en este caso se estaría superando el valor de 45% el cual es el recomendado por la PCA para que no exista daño por fatiga en una losa de concreto con esfuerzos de flexotracción (Huang, Yang H .; University of Kentucky, 2004) y ya se tendría una vida muy limitada a la fatiga, en cambio la mayor relación de esfuerzos de compresión en porcentaje para este caso fue de 9.62%, valor que no ocasionaría daño al elemento.

Al analizar estos resultados se podría estimar que el mayor esfuerzo mecánico solicitante en un adoquín de concreto en un pavimento o piso industrial sería el esfuerzo de flexotracción, por lo tanto hablando solo de esfuerzos mecánicos, las especificaciones deberían solicitar valores de resistencia a la flexotracción, pero como se ha mencionado

en este documento el INVIAS, entidades internacionales como la ASTM y organizaciones dedicadas a la investigación de pavimentos articulados, solicitan que el adoquín cumpla con cierto valor de resistencia a la compresión, esto puede deberse a varios factores, el primero es que el parámetro que por excelencia ha caracterizado al concreto hidráulico, morteros, pavimentos compactados con rodillo, mezclas de estabilización de subrasantes con cemento, suelo cemento y bases tratadas con cemento es la resistencia a la compresión, adicionalmente como lo menciona la PCA (Portland Cement Association, Steven H. Kosmatka and Michelle L. Wilson, 2011), la resistencia a la compresión está directamente relacionada con la resistencia a la abrasión, además como se ha mencionado en este documento la resistencia a la compresión está influenciada por la cantidad de vacíos, a mayor cantidad de vacíos menor será la resistencia a la compresión, y los vacíos están relacionados con la durabilidad, especialmente en temas de permeabilidad y ataques químicos, cabe resaltar que los vacíos que afectan la durabilidad son los que tienen tamaño de partícula superiores a aproximadamente 1.5 mm de diámetro (RIVERA LÓPEZ), y como se expresó anteriormente la resistencia a la flexión no se vería tan afectada por el aumento de vacíos en la mezcla como lo hace la resistencia a la compresión, por esta razón podría estimarse que cuando se exige como control de calidad resistencia a la compresión en un adoquín se estarían controlando esfuerzos mecánicos y durabilidad.

11. Conclusiones

- La realización de esta tesis permitió adaptar los equipos del laboratorio de materiales de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad del Cauca para poder realizar los ensayos de flexotracción y compresión descritos en las normas INV E - 426 y NTC 2017 respectivamente.
- Con este trabajo se pudo determinar el comportamiento teórico de un adoquín de concreto rectangular de largo 200 mm y ancho 100 mm sometido a esfuerzos mecánicos, utilizando como herramienta el programa de elementos finitos EverFe 2.24, teniendo como variables el espesor del elemento, tipo de carga y tipo de soporte, en donde se encontró que la falla estructural del adoquín estaba controlada por esfuerzos de tensión (generados por la flexión).
- Al analizar los resultados obtenidos de los adoquines utilizados en este trabajo se encontró que la correlación que más se ajusta es la que relaciona la resistencia a la compresión y resistencia a la flexotracción en la cual se eliminaron los valores extremos y con edades superiores a 28 días, representada por la siguiente ecuación:

$$\text{Resistencia a la flexotracción} = 0.4402 * \text{resistencia a la compresión}^{0.8378} \quad \text{Ec. 10.3}$$

Cabe anotar que el resultado de la correlación aplica para los especímenes utilizados en este proyecto, pero si se requiere conocer una correlación para un rango distinto de resistencias o materiales se podrá utilizar la misma metodología utilizada en este trabajo.

- Con los resultados de resistencia a la compresión y resistencia a la flexotracción se obtuvieron las siguientes correlaciones: una para todas las edades analizadas presentando valores de coeficiente de determinación superiores a 0.9 (cuando se eliminaron valores atípicos), otra para valores superiores a 28 días en donde se obtuvo un coeficiente de

determinación igual a 0.79 el cual es inferior a 0.9 pero similar a los obtenidos en trabajos similares, y además encontró una correlación basada en el método utilizado comúnmente para mezclas de concreto convencionales, para este trabajo la correlación más representativa podría ser la que se obtuvo con valores de resistencia superior a 28 días y eliminando los valores atípicos.

- En este trabajo se determinó que para los adoquines analizados, los especímenes que cumplían con la especificación de resistencia a la flexotracción exigida en la norma NTC 2017 no cumplían con la resistencia a la compresión exigida por la especificación INV Art 510 -13.
- Si lo que se requiere es controlar esfuerzos mecánicos generados dentro de un adoquín, se recomendaría utilizar especificaciones que exijan el cumplimiento de valores de resistencia a la flexotracción, pero en este caso no podría afirmarse que se estén cumpliendo parámetros de durabilidad, ya que este tema no fue analizado en este trabajo.
- Una posible línea de investigación para futuros trabajos podría ser el análisis de la relación entre la resistencia a la compresión y flexotracción con los parámetros de durabilidad exigidos a los adoquines de concreto.

12. Bibliografía

- Aristizabal Gil, V. (Julio de 2005). Adoquines de Arcilla Resistencia a Compresión y flexión, otros aspectos relacionados con la durabilidad. Medellín, Antioquia, Colombia: Instituto de desarrollo Urbao IDU.
- ASTM International . (2016). ASTM C 936/936M -16 Standard Specification for Solid Concrete Interlocking Paving Units.
- ASTM International. (1996). ASTM C 931 -96, Standard Specification for Solid Concrete Interlocking Paving Units.
- ASTM International. (2011). ASTM C 931 -01, Standard Specification for Solid Concrete Interlocking Paving Units.
- Bill Davids, Ph.D., P.E. University of Maine Dept. of Civil and Environmental Engineering. (February de 2003). EverFE Theory Manual.
- Cantarero, L., & Méndez, D. (s.f.). Análisis y Evaluación de las Características Geométricas de los Pavimentos de Adoquín en las vías rurales de Nicaragua.
- Chile, Instituto del cemento y del hormigón de; Echaveguren Navarro, Tomás;. (2013). Manual de diseño de pavimentos de adoquines de hormigón. Chile.
- Huang, Yang H .; University of Kentucky. (2004). *Pavement Analysis and Design 2Ed.* Pearson Education, Inc.
- ICONTEC. (MARZO de 2004). NORMA TECNICO COLOMBIANA NTC 2017-ADOQUINES DE CONCRETO PARA PAVIMENTOS SEGUNDA ACTUALIZACIÓN.
- Indian Standars. (2006). Precast concrete Blocks for pavign, specification.
- Instituto Colombiano de Productores de Cemento (ICPC). (1986). Especificaciones para pavimentos de adoquines de concreto 2Ed. Medellín, Antioquia, Colombia.
- Instituto Colombiano de Productores de Cemento, ICPC. (s.f.). Notas Técnocas: Ventajas y aplicaciones de los pavimentos de adoquines de concreto. 4-18-167.
- Instituto Nacional de Vías. (1998). *Manual de Diseño de Pavimentos Flexibles Para Vías con Médios y Altos Volúmenes de Tránsito.*
- Instituto Nacional de Vias. (2013). *Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras.*
- Interlocking Concrete Pavement Institute (ICPI). (2012). Airfield Pavement Design with concrete pavers.
- Interlocking Concrete Pavement Institute, ICPI. (s.f.). Structural Design of Interlocking Concrete Pavement.
- Knapton, J., & Barber, S. (s.f.). UK research into concrete block pavement design.

- Knapton, J., & Cook, I. (s.f.). Design methods for clay and concrete block paving.
- Mnisterio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial;. (Enero de 2010). Reglamento Colombiano de construcción sismo resistente, NSR 10. Bogotá, Colombia.
- Panda, B., & Ghosh, A. (2002). Structural Behavior of Concrete Block Paving. *JOURNAL OF TRANSPORTATION ENGINEERING*.
- Pearson, A. and Shackel, B., Concrete Masonry Association of Australia, School of Civil and Environmental Engineering, University of New South Wales. (2003). AUSTRALIAN NATIONAL STANDARDS FOR SEGMENTAL AND. *Proceedings of the 7th International Conference on Concrete Block Paving (PAVE AFRICA 2003)*.
- PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. (s.f.). VOLUME 6, NUMBER 4,. *CONCRETE TECHNOLOGY TODAY, using concrete technology*.
- Portland Cement Association, Steven H. Kosmatka and Michelle L. Wilson. (2011). *Design and Control of Concrete Mix, The guide to applications, methods, and materials 15 Ed.*
- RIVERA LÓPEZ, G. (s.f.). *CONCRETO SIMPLE*. Universidad del Cauca.
- The precast concrete paving and kerb association. (2007). Heavy Duty pavements , The structural design of heavy duty pavements for ports and other industries 4Ed.