



**EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES EN ESTADO
FRESCO Y ENDURECIDO DE UN CONCRETO PARA USO
EN PAVIMENTO RÍGIDO, ADICIONADO CON
NANOCOMPUESTOS DE CARBONO.**

presentado por

**RAISA ISABEL BOTTO LUGO
PAOLA ANDREA SANTACRUZ PACHÓN**

Trabajo de grado presentado a la

Maestría de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Civil
Pontificia Universidad Javeriana

Bogotá, Colombia, Enero 2017

Aprobado por

I.C. M.Sc. Ph.D. Fredy Alberto Reyes Liazcano

Director

Departamento de Ingeniería Civil

Pontificia Universidad Javeriana, Colombia

Químico. M.Sc. Ph.D. Alejandro Pérez Flórez

Co-director

Departamento de Química

Pontificia Universidad Javeriana, Colombia

I.C. M.Sc. Ph.D. Yezid Alexander Alvarado Vargas.

Co-director

Departamento de Ingeniería Civil

Pontificia Universidad Javeriana, Colombia

Vivian Andrea Ulloa Mayorga

Jurado 1

Departamento de Ingeniería Civil

Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia

Samuel Eduardo Arango Campo

Jurado 2

Cementos Argos, Medellín, Colombia

Aprobada en Bogotá, Enero de 2017

Bogotá D.C., 19 de enero de 2017

Ing. Vivian Andrea Ulloa Mayorga MSc., PhD

Departamento de Ingeniería Civil

Pontificia Universidad Javeriana

Bogotá D.C.

ASUNTO: Correcciones realizadas al trabajo de grado

Respetada Ingeniera,

Por medio de la presente nos permitimos informarle que se realizaron las correcciones sugeridas para la tesis titulada “EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO Y ENDURECIDO DE UN CONCRETO PARA USO EN PAVIMENTO RÍGIDO, ADICIONADO CON NANOCOMPUESTOS DE CARBONO.”, desarrollado por las estudiantes RAISA ISABEL BOTTO LUGO y PAOLA ANDREA SANTACRUZ PACHÓN, las cuales se enlistan a continuación:

- La paginación completa del documento.
- La definición de húmedo, se corrigió por húmedo total (página 7) según la revisión bibliográfica en Sánchez de Guzmán (2001), referenciado en el documento.
- En el diseño de mezcla al hablar de la relación agua/cemento (página 9), cuando se hacía referencia que se puede determinar por dos métodos, se cambió por: se debe determinar por dos métodos.
- En la gráfica de granulometría (página 28), se cambiaron los límites del eje vertical y los puntos se unieron por líneas rectas.
- En cuanto a la tabla 3.8 (páginas 28 y 29), la cual en su última columna presenta información de una investigación en donde se obtuvo reducción en la resistencia (-60%), en el párrafo se referenció este último resultado.
- En las figuras 4.16 a 4.18 (páginas 50 a 53) se cambió la palabra curvas de fatiga por leyes de fatiga, igual que en el texto en donde se hacía referencia de estas.
- El título de la figura 2.1 (página 4), que se encontraba en la parte superior, se modificó a la parte inferior como en todas las otras figuras del documento.
- En el numeral 3.2.5 apartado de correcciones por humedad (página 32), quedó en la misma página que su párrafo.

Agradecemos su colaboración.


Firma de Aprobación

Vivian Andrea Ulloa Mayorga

Bogotá D.C., 19 de enero de 2017

Ing. Samuel Eduardo Arango Campo MSc., PhD

Cementos Argos

Medellín, Antioquia

ASUNTO: Correcciones realizadas al trabajo de grado

Respetado Ingeniero:

Por medio de la presente nos permitimos informarle que se añadieron algunas sugerencias en el capítulo de TRABAJO FUTURO, en la tesis titulada “EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO Y ENDURECIDO DE UN CONCRETO PARA USO EN PAVIMENTO RÍGIDO, ADICIONADO CON NANOCOMPUESTOS DE CARBONO.”, desarrollado por las estudiantes RAISA ISABEL BOTTO LUGO y PAOLA ANDREA SANTACRUZ PACHÓN, las cuales se enlistan a continuación:

- Realizar el diseño de mezcla por métodos dirigidos hacia pavimentos.
- Evaluar la distribución de los vacíos de la matriz para poder clasificar la morfología de estos.
- En estado fresco, medir la exudación de las mezclas para verificar la pérdida de agua.

Agradecemos su colaboración.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Samuel Arango', is written over a horizontal line.

Firma de aprobación

Samuel Eduardo Arango Campo

Prefacio de las autoras

Dedicamos este trabajo de grado:

A Dios por darnos la oportunidad de realizar esta investigación y contar con todas las personas que participaron en la realización del mismo.

A nuestros padres Armando Botto, Raisa Lugo, Jesús Alberto Santacruz y Nazly Pachón, y hermanos Sarai Botto y Nicolás Santacruz por su apoyo incondicional durante la realización de la investigación.

A nuestros directores Fredy Reyes, Yezid Alvarado y Alejandro Pérez, por su apoyo a lo largo del proyecto y su amable colaboración.

Al Director de la Maestría de Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Javeriana Luis Felipe Prada, por su incondicional apoyo durante el proyecto.

A Argos por proveernos los agregados para la realización de la tesis.

Al laboratorio de Pruebas y Ensayos del Departamento de Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Javeriana y a los laboratoristas especialmente a Tito por su colaboración durante los ensayos experimentales.

Al Laboratorio de Química del Departamento de Ciencias Básicas de la Pontificia Universidad Javeriana.

Al laboratorio de Microscopia SEM del Instituto Geofísico de la Facultad de Ingeniería de la Pontificia Universidad Javeriana.

Raisa Isabel Botto Lugo y Paola Andrea Santacruz Pachón

Resumen

En el presente trabajo se modificó un concreto hidráulico para uso en pavimento rígido, con cuatro (4) porcentajes de adición de nanocompuestos de carbono (NCC) con respecto al peso del cemento, teniendo como principal objetivo, analizar su comportamiento sometido ante cargas monotónicas y dinámicas, evaluando propiedades mecánicas como, resistencia a la compresión, módulo de elasticidad de forma estática y dinámica, módulo de rotura y fatiga; igualmente, se evaluaron propiedades en estado fresco como la manejabilidad y el contenido de aire. La matriz cementante modificada está compuesta de agua, cemento, agregados y superplastificantes, con diferentes porcentajes de adición de NCC (0 %, 0.05 %, 0.10 % y 0.15 %, con respecto al peso del cemento), donde también se evaluaron diferentes relaciones molares Cu/Ni (0.33, 1.0 y 2.0). Estas relaciones molares permiten obtener NCC con diferentes longitudes, las cuales influyen en el comportamiento del material compuesto. Debido a que los NCC presentan un carácter hidrófobo, fue indispensable estudiar su dispersión especialmente en el agua, ante esto, el uso de un agente dispersante, facilitó el contacto entre la matriz cementante y los NCC, permitiendo su correcta interacción química y física. Bajo estos parámetros se obtuvo que la adición óptima se encuentra alrededor de 0.10 %.

Palabras clave: Nanocompuestos de carbono, nanotubos de carbono (NTC), nanofibras de carbono (NFC), concreto hidráulico, resistencia a la compresión, módulo elástico dinámico, módulo elástico estático, módulo de rotura y fatiga.

Abstract

In this investigation a hydraulic concrete was modified adding Carbon Nanocomposites (CNC) for its use in rigid pavement, the mass fraction of the CNC was varied from 0 to 0.15 % of the cement mass in the mixture. Having as main objective, to analyze its behavior under monotonic and dynamics loads, evaluating mechanical properties such as, compressive strength, static and dynamic modulus of elasticity, rupture modulus and fatigue. Also, fresh properties such as handling and air content were evaluated. The modified cement matrix is composed by water, cement, aggregates and superplasticizers, with different percentages of CNC addition, besides different Cu / Ni molar ratios (0.33, 1.0 and 2.0) were analyzed. These molar ratios allow to obtain CNC with different lengths, which tends to influence the behavior of the composite material. Because CNC have a hydrophobic character, it was indispensable to study its dispersion especially in water, that's why, there was necessary the use of a dispersing agent, in order to facilitate the contact between the cementing matrix and the CNC, allowing their correct chemical and physical interaction. Under these parameters the optimum addition was found to be around 0.10 %.

Keywords: Carbon nanocomposites, carbon nanotubes, carbon nanofibers, hydraulic concrete, compressive strength, dynamic elastic modulus, static elastic modulus, modulus of rupture and fatigue.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Hipótesis	2
1.2. Objetivos	2
2. Marcos de referencia	3
2.1. Marco conceptual	3
2.1.1. Nanocompuestos de carbono	3
2.1.2. Caracterización de agregados	5
2.1.3. Diseño de mezcla	8
2.1.4. Propiedades en estado fresco y endurecido	10
2.2. Marco teórico	17
2.2.1. Dispersión de NCC	17
2.2.2. Adición de NCC en matrices cementantes	19
3. Metodología	22
3.1. Primera etapa: Mortero	23
3.1.1. Procedimiento de dispersión	24
3.1.2. Ensayo en estado fresco	24
3.1.3. Ensayos en estado endurecido	25
3.2. Segunda etapa: Concreto	25
3.2.1. Selección del policarboxilato	25
3.2.2. Selección de los porcentajes de adición de NCC	27
3.2.3. Proceso de dispersión	28
3.2.4. Caracterización de agregados	28
3.2.5. Diseño de mezcla	32
3.2.6. Ensayos en estado fresco	34
3.2.7. Ensayos en estado endurecido	35
3.2.8. Ensayos de análisis	38

4. Resultados	39
4.1. Primera etapa: Mortero	39
4.1.1. Procedimiento de dispersión	39
4.1.2. Ensayo en estado fresco	40
4.1.3. Ensayos en estado endurecido	41
4.2. Segunda etapa: Concreto	42
4.2.1. Selección del policarboxilato	42
4.2.2. Ensayos en estado fresco	44
4.2.3. Ensayos en estado endurecido	45
5. Discusión de resultados	54
5.0.1. Fatiga	54
5.0.2. Ensayos de análisis	55
5.0.3. Interacción química de NCC con la matriz cementante	59
6. Conclusiones	62
7. Trabajo futuro	63
Bibliografía	64

Índice de figuras

2.1. (a) Hoja de grafeno, (b) fullereno C60 (c) SWCNT; (d) DWCNT, (e) MWCNT <i>Fuente: Grady (2011)</i>	4
2.2. Parámetros del modelo racional francés de curvas de fatiga	15
3.1. Primera etapa	22
3.2. Segunda etapa	23
3.3. Turbidímetro	26
3.4. Detector de absorbancia UV-VIS	27
3.5. Porcentajes de adición de NTC escogidos	28
3.6. Granulometría	32
3.7. Ensayos en estado fresco	34
3.8. Ensayos en estado endurecido	35
4.1. Vaso de precipitados después de vertida la solución en la mezcla <i>Fuente: Elaboración propia</i>	39
4.2. Fluidéz del mortero	40
4.3. Ensayo de fluidez en mortero	41
4.4. Resistencia a compresión y flexión de mortero	41
4.5. Inspección visual de soluciones con ambos aditivos superplastificantes luego de 15 días <i>Fuente: Elaboración propia</i>	43
4.6. Variación de la turbidez luego de 15 días	43
4.7. Absorbancia de las partículas en el rango ultravioleta-visible	44
4.8. Contenido de vacíos y Asentamiento	45
4.9. Resistencia a la compresión y a la flexión	46
4.10. Módulo de elasticidad estático	47
4.11. Módulo de elasticidad dinámico	48
4.12. Ensayos de fatiga con adición de 0.0 %	48
4.13. Ensayos de fatiga con adición de 0.05 %	49
4.14. Ensayos de fatiga con adición de 0.10 %	49
4.15. Ensayos de fatiga con adición de 0.15 %	50

4.16. Leyes de fatiga con 50 % de confiabilidad	51
4.17. Leyes de fatiga con 80 % de confiabilidad	52
4.18. Leyes de fatiga con 90 % de confiabilidad	52
5.1. Comparación pendiente con esfuerzo al millón de ciclos	54
5.2. Comparación esfuerzo al millón de ciclos con módulo de rotura	55
5.3. Ensayo de permeabilidad	56
5.4. Contenido de aire y profundidad de penetración	56
5.5. Micrografías NCC y Concreto	58
5.6. Interacción NTC con agente dispersante <i>Fuente: Guzman Suárez (2013)</i>	59
5.7. Falla de viga luego del ensayo de flexión de mezcla control	60
5.8. Falla de viga luego del ensayo de flexión de mezcla con adición de NCC	60

Índice de tablas

2.1. Propiedades de los NTC de carbono <i>Fuente: Kharissova et al. (2004)</i>	5
2.2. Valores de f según la fórmula de Bolomey	7
2.3. Resumen dispersiones realizadas por diferentes autores	21
3.1. Longitudes de NTC según relación atómica Cu/Ni de catalizador	24
3.2. Fluidéz recomendada para mortero <i>Fuente: Sanchez de Guzmán (2001)</i>	24
3.3. Especímenes realizados de mortero	25
3.4. Longitudes de NTC según relación atómica Cu/Ni de catalizador	25
3.5. Porcentajes de adición de NTC de diferentes autores	27
3.6. Límites pasantes agregado fino	29
3.7. Límites pasantes agregado grueso	29
3.8. Granulometría agregado fino	31
3.9. Granulometría agregado grueso	31
3.10. Diseño de mezcla	34
3.11. Especímenes realizados de concreto	36
4.1. Porcentaje de cambio de la fluidez en mortero	40
4.2. Porcentaje de cambio y C.V. de resistencias de mortero	42
4.3. Porcentaje de cambio del Contenido de vacíos y Asentamiento	45
4.4. Porcentaje de cambio y C.V de Resistencia a la compresión y a la flexión	46
4.5. Porcentaje de cambio y C.V. del Módulo de elasticidad estático	47
4.6. Datos y C.V. de ensayos de fatiga con adición de 0.0 %	49
4.7. Datos y C.V. de ensayos de fatiga con adición de 0.05 %	49
4.8. Datos y C.V. de ensayos de fatiga con adición de 0.10 %	50
4.9. Datos y C.V. de ensayos de fatiga con adición de 0.15 %	50
4.10. Parámetros de Weibull	51
5.1. Porcentaje de cambio y C.V. de la permeabilidad del concreto	56

Capítulo 1

Introducción

Los pavimentos rígidos se han convertido en una alternativa competitiva con diversos beneficios ambientales, sociales y económicos, estos últimos están relacionados con su vida útil, que incluyen su costo inicial y su mantenimiento (Salgado, 2013), y dado a que las cargas de transporte han aumentado, se han realizado investigaciones con respecto a la incorporación de diferentes materiales que mejoran las características mecánicas y/o químicas del pavimento rígido, encaminadas a evitar falencias en el desempeño del concreto, como lo son fisuras y grietas causadas por la fatiga de este material, por lo que es importante la incorporación de nuevos materiales, por ejemplo, investigaciones más recientes se han dirigido hacia materiales de tamaño nanométrico, dentro de estos materiales se encuentran la nanosilice. Mendoza Reales (2013), señala que la nanosilice es una de las nanopartículas más estudiadas que han sido incorporadas en el concreto, debido a que ha permitido mejorar la resistencia mecánica y la durabilidad de las mezclas cementantes. Otro de los materiales estudiados, son los nanotubos de carbono (NTC) ya que son considerados como uno de los materiales más prometedores para mejorar las propiedades mecánicas en una matriz cementante y aportar resistencia ante la propagación de fisuras debido a que presentan un módulo de elasticidad del orden de TPa y una resistencia a la tensión del orden de GPa, y al ser adicionados al concreto permitirían la mejora de sus propiedades mecánicas, complementando su buen comportamiento ante cargas a compresión (Ariza and Casas, 2013) (Makar et al., 2005).

Los NTC tienen una resistencia y rigidez inusual, añadido a esto son eléctricamente estables y conductores, características que los hacen bastante atractivos para ser utilizados en matrices cementantes, tal que éstos puedan transmitir dichas características a la mezcla (Sobolkina et al., 2012). Estos se consideran como uno de los nanomateriales más beneficiosos como nanorefuerzo, sin embargo, uno de los mayores retos asociados a su incorporación en mezclas hidráulicas, es lograr su dispersión debido al carácter hidrófobo de los mismos.

Es por ello, que en la presente investigación se pretenden complementar propiedades como

la resistencia a compresión, flexión, módulo de elasticidad estático, y especialmente el módulo de elasticidad dinámico y la fatiga, de un concreto para uso en pavimento rígido, adicionando nanocompuestos de carbono, ya que estas dos últimas propiedades no han sido evaluadas en investigaciones anteriores.

1.1. Hipótesis

La adición de nanocompuestos de carbono, mejora las propiedades en estado fresco y endurecido frente a cargas monotónicas y dinámicas, en un pavimento rígido.

1.2. Objetivos

Objetivo general

Evaluar la influencia de la adición de nanocompuestos de carbono sobre las propiedades en estado fresco y endurecido de un concreto para uso en pavimento rígido.

Objetivos específicos

- Seleccionar el procedimiento adecuado de dispersión de nanocompuestos de carbono en una matriz cementante
- Determinar la influencia de la adición de nanocompuestos de carbono sobre el contenido de vacíos y la manejabilidad del concreto.
- Determinar la influencia de la adición de nanocompuestos de carbono sobre la resistencia a la compresión, el módulo de elasticidad estático y dinámico, el módulo de rotura y la fatiga, del concreto.

Capítulo 2

Marcos de referencia

2.1. Marco conceptual

2.1.1. Nanocompuestos de carbono

Los materiales formados por dos o más fases donde al menos una de sus tres dimensiones se encuentra a escala nanométrica, es decir entre 1 y 100 nanómetros (nm), son conocidos como nanocompuestos (Mina, 2004). Uno de los mayores retos al momento de producir nanocompuestos, es construir una correlación proceso-estructura para predecir las propiedades finales del compuesto (Covarrubias Gordillo et al., 2013). En el caso de los NCC se pueden llegar a formar: NTC (pared simple o multiple), NFC, carbono amorfo y grafito.

Los NTC pueden estar constituidos por 1 capa, en cuyo caso se denominan Single Wall Carbon Nanotube (SWCNT), o de varias capas coaxiales, los cuales se denominan Multi Wall Carbon Nanotube (MWCNT), como se observa en la Figura 2.1, y sus propiedades se presentan a continuación (Chan and Andrawes, 2010) (Makar et al., 2005):

- Las láminas de grafeno que los componen, tienen grosores del tamaño de un átomo.
- Los diámetros de los NTC de pared simple están entre 0.4 y 10 nm y los de pared multiple están entre 40 y 100 nm.
- Las longitudes están en un rango entre micrómetros y centímetros.
- El módulo de elasticidad longitudinal o de Young es de aproximadamente 1 TPa.
- La densidad es menor a 1500 kg/m^3
- El esfuerzo máximo a tracción, para los NTC de pared simple está entre 20 y 60 GPa, y para los NTC de pared multiple varía entre 100 y 300 GPa.

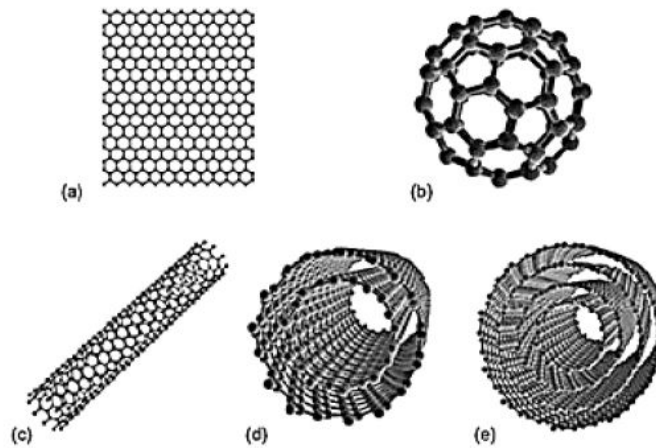


Figura 2.1: (a) Hoja de grafeno, (b) fullereno C60 (c) SWCNT; (d) DWCNT, (e) MWCNT
Fuente: Grady (2011)

Los NCC pueden resultar de la descomposición catalítica debida a la variación de la velocidad de una reacción química, en este caso, se realiza mediante la descomposición catalítica en fase de vapor (CDV) de una corriente de metano sobre catalizadores de Cu/Ni a temperaturas cercanas a los 700 °C. Debido a su pequeño tamaño, los NCC comienzan a auto-organizarse a temperatura ambiente y presión atmosférica, y se convierten en granos de tamaño micrométrico. La formación de estos granos se debe a la fuerza de Van der Waals que actúa entre las nanopartículas de carbono individuales, las cuales tienden a enlazarse formando fibras gruesas y no tienen la misma resistencia que los NTC de pared simple pero siguen siendo mayores que los otros materiales usados como adición. La superficie específica de los NCC disminuye sustancialmente y permite que se llenen los vacíos que el cemento no alcanza a llenar, lo que genera una mejora en las propiedades finales del concreto (Al-Saud et al., 2011).

2.1.1.1. Nanotubos de carbono

Los NTC desde su descubrimiento en 1991, han sido utilizados en diferentes campos de la ingeniería (Sharma and Kothiyal, 2016). Consisten en láminas de carbono enrolladas en forma de tubo con dos semi-cápsulas de fullereno en cada extremo, los cuales presentan electrones que pueden moverse libremente a lo largo de los anillos de carbono (Miravete and Chiminelli, 2002). Los NTC son sistemas unidimensionales (1D) únicos con propiedades físicas (mecánicas, térmicas, eléctricas y electrónicas) excepcionales y, por consiguiente, con un elevado número de aplicaciones potenciales en los diversos campos de la nanociencia y nanotecnología (Santoro and Domingo, 2007). En la Tabla 2.1, se realiza una comparación entre las propiedades de los NTC y otros materiales a base de fibras.

Tabla 2.1: Propiedades de los NTC de carbono *Fuente: Kharissova et al. (2004)*

Material	Módulo de rotura [MPa]	Módulo de Young [GPa]	Densidad [kg/m^3] Densidad [kg/m^3]	Velocidad de sonido [m/s]
Acero	1-5	200	7900	5000
Fibra de boro	3.5	400	2450	12778
Fibra de carbono	2-5	250	1850	11600
NTC	150	1000	1300	22014

2.1.1.2. Nanofibras de carbono

Son nanofilamentos generados catalíticamente, de dimensiones semejantes a los NTC, pero con una disposición diferente de los planos de grafeno. La diferencia entre los NTC y las NFC, no es del todo clara, sin embargo se tiende a considerar las Nanofibras de carbono (NFC) como materiales intermedios entre las fibras micrométricas y los NTC. La estructura interna de estas, es similar a la del grafito, presentando así propiedades como alta conductividad eléctrica y térmica, baja densidad, propiedades anticorrosivas, gran capacidad de adsorción y de lubricación, bajo coeficiente de expansión térmica y elevadas propiedades mecánicas (Galao, 2012). Entre las propiedades mecánicas de las NFC que han sido estudiadas, se encuentra el módulo de elasticidad (módulo de Young) en el orden de los 400 GPa y resistencia a tracción de 7 GPa (Zhou et al., 2009). Son consideradas sobrante de la producción de NTC, ya que cuentan con propiedades mecánicas inferiores a las de estos, sin embargo, su producción es más fácil y económica (Treacy et al., 1996).

2.1.1.3. Grafeno

El grafeno es considerado una estructura bidimensional, ya que presenta una superficie de hasta varios centímetros cuadrados, mientras que su espesor es del tamaño de un átomo de carbono, igualmente tiene propiedades mecánicas y electrónicas importantes (Castro-Beltrán et al., 2011), debido a que es 200 veces más fuerte que el acero, posee enlaces covalentes y es tan ligero que una lámina de un metro cuadrado pesa alrededor de 0.77 miligramos (Bolufer, 2013).

2.1.2. Caracterización de agregados

Cuando se realiza la mezcla, el concreto o mortero se comportan como materiales viscosos, por lo que en estado fresco se puede medir, por ejemplo, su consistencia y contenido de aire, para así verificar que la mezcla cumpla con los parámetros de diseño establecidos.

2.1.2.1. Granulometría

Es la distribución de tamaños de partículas que comprenden una masa de agregados, este análisis granulométrico se calcula dividiendo una muestra de agregado en fracciones del mismo tamaño, que pasan por una serie de tamices con aberturas cuadradas características establecidas por normas. La cuantía de cada fracción por tamiz se conoce como granulometría.

Los resultados del proceso de tamizado se obtienen en peso retenido por tamiz, en gramos. Con lo anterior es posible determinar el porcentaje retenido, porcentaje retenido acumulado y el porcentaje pasante, que finalmente es la unidad que se grafica con respecto a los tamaños de los tamices para conocer qué tan fina o gruesa es la masa de agregados que se tiene, igualmente es fácil detectar de esta forma, si hay excesos o deficiencias de un tamaño de agregados en particular. Al realizar el análisis granulométrico se pueden obtener otros factores que contribuyen con la caracterización de los agregados y posteriormente, al diseño de mezcla, estos factores son el módulo de finura, el tamaño máximo del agregado y el tamaño máximo nominal (Sanchez de Guzmán, 2001).

Módulo de finura

Es un factor que permite conocer qué tan fino o grueso es el material. Un mismo módulo de finura puede corresponder a diferentes curvas granulométricas, por lo cual no puede ser usado como descripción de la granulometría del material, sino un valor que determina si hay mayor cantidad de finos o gruesos en la distribución granulométrica, este valor puede variar entre 0 y 10, generalmente.

Cuando este valor es cercano a cero, corresponde a agregados finos, a medida que este aumenta, corresponde a agregados gruesos, por lo que este factor se ha limitado a la evaluación del grado de finura, generalmente con este factor se caracterizan los agregados finos (Sanchez de Guzmán, 2001).

Tamaño máximo del agregado

Es el mayor tamaño de partícula que se encuentra en la masa de agregados, y debe ser compatible con las especificaciones de la estructura en donde será utilizado (Sanchez de Guzmán, 2001).

Tamaño máximo nominal

Es el tamaño promedio de partículas más grandes que están dentro de la masa de agregados, este define el tamaño máximo de las partículas de la masa de agregados en su fracción gruesa, a diferencia del tamaño máximo del agregado, que solamente indica el tamaño máximo que tienen las partículas más grandes en la masa de agregados, lo que no requiere que sea la mayor cantidad de partículas. Tanto el tamaño máximo del agregado como el tamaño máximo nominal se utilizan para caracterizar agregados gruesos (Sanchez de Guzmán, 2001).

Teoría de Bolomey

Se han desarrollado diferentes curvas de gradación ideales como las de Weymouth, Fuller o Thompson, sin embargo, la aproximación de Bolomey es la curva más aceptada, debido a que tiene en cuenta mayor contenido de finos en la masa del agregado, para así aumentar la manejabilidad de la mezcla en estado plástico (Sanchez de Guzmán, 2001). La propuesta presentada por Bolomey para el porcentaje en peso que pasa por cada tamiz, se puede observar en la Ecuación 2.1.

$$P = f + (100 - f) * \sqrt{\frac{d}{D}} \quad (2.1)$$

En donde f es una constante empírica que indica el grado de trabajabilidad de una mezcla para una consistencia requerida según la forma del agregado, la cual se obtiene de la Tabla 2.2, d es la abertura de cada tamiz y D es el tamaño máximo del agregado.

Tabla 2.2: Valores de f según la fórmula de Bolomey

Forma de las partículas del agregado	Consistencia del concreto en estado plástico		
	Seca (tierra húmeda)	Normal (plástica)	Húmeda (fluida)
Redonda	6 - 8	10	12
Cúbica	8 - 10	12 - 14	14 - 16

2.1.2.2. Absorción de los agregados

Es la cuantificación de la influencia de la porosidad, lo cual tiene consecuencias en la adherencia, resistencia a compresión y a flexión principalmente, adicionalmente está relacionada con la capacidad de absorción de líquidos que tiene el agregado, en este caso de agua, según su tamaño de poros, permeabilidad y volumen total (Sanchez de Guzmán, 2001).

En cuanto a la absorción, los agregados pueden pasar por cuatro estados:

- **Seco:** Se presenta cuando el material ha sido secado al horno a 110° C.
- **Parcialmente seco:** Se consigue cuando el material ha sido secado al aire libre.
- **Saturado superficialmente seco:** Es un estado ideal, se presenta cuando los poros del material están llenos de agua pero están secos en superficie.
- **Húmedo total:** En este caso, tanto los poros como la superficie del material están llenos de agua.

2.1.2.3. Humedad de los agregados

El contenido de agua o humedad natural del material, está definida como la masa de agua libre, la cual llena los poros en la masa de las partículas sólidas (I.N.V.E-122-13, 2013). Debido a que los agregados se encuentran naturalmente a la intemperie, los vacíos entre ellos pueden estar llenos de agua, esta es la humedad natural que presentan los agregados. En el momento de realizar la mezcla, conocer este grado de humedad, permite saber si es necesario reducir o aumentar agua de la mezcla.

2.1.2.4. Masa unitaria

El peso volumétrico o masa unitaria de los agregados, es la relación entre el peso de una muestra de agregados con diferentes tamaños de partículas, ya gradado, y el volumen que ocupan estas dentro de un recipiente. Al colocar los agregados en el recipiente, estos van a tener un acomodamiento que depende del tamaño de partículas, la granulometría, su textura y forma. Existen dos tipos de masa unitaria, masa unitaria compacta y suelta (Sanchez de Guzmán, 2001).

Masa unitaria compacta

Es el grado de acomodamiento que tienen los agregados luego de ser sometidos a vibración, debido a que permite una mejor distribución de partículas y su masa unitaria aumenta, este factor es importante para el diseño de mezcla ya que dentro de la masa de concreto, los agregados van a estar confinados.

Masa unitaria suelta

Se determina cuando el material se encuentra sin proceso de vibrado, en su estado normal de acomodamiento de partículas o de reposo, el volumen que ocupa es mayor y su masa unitaria es menor. Se debe conocer este factor para el momento de transporte y almacenaje del material, ya que no será el mismo utilizado para la mezcla.

2.1.2.5. Equivalente de arena

Es la proporción del contenido de arcilla o polvo fino nocivo, en los agregados finos. Aunque este ensayo no es fundamental para realizar el diseño de mezcla, es importante conocer si los agregados podrían tener una mala influencia debido a la naturaleza plásticas de estos polvos, por lo que este método cuantifica el volumen total de material no plástico que se quiere en la muestra, denominando su proporción volumétrica (Pinto, 2016).

2.1.3. Diseño de mezcla

En el diseño de mezcla se determina la cantidad de materiales requeridos para producir un concreto o mortero con las propiedades en estado fresco y endurecido deseadas, como por

ejemplo, resistencia, trabajabilidad, durabilidad y costos. Otros factores a tener en cuenta, son los materiales disponibles, las proporciones de la mezcla, el ambiente y las técnicas de construcción, las cuales están relacionadas con métodos de colocación y curado (Sanchez de Guzmán, 2001).

Las propiedades en estado fresco se determinan por el tipo de construcción, las técnicas de transporte y colocación, las propiedades en estado endurecido tienen relación con la resistencia final, el módulo de elasticidad, la durabilidad, la porosidad y la estética del concreto o mortero. Pueden existir factores dentro del diseño de mezcla que afectan directamente las propiedades tanto en estado fresco como endurecido del material, como por ejemplo:

- La finura de la arena, la cual aumenta la trabajabilidad pero disminuye la resistencia.
- La relación grava/arena, la cual disminuye la trabajabilidad pero aumenta la resistencia.
- La cantidad de agua, la cual aumenta la trabajabilidad pero disminuye la resistencia.
- El tamaño máximo del árido, el cual disminuye la trabajabilidad pero aumenta la resistencia.
- El contenido de aire ocluido, el cual aumenta la trabajabilidad pero disminuye la resistencia.

Para realizar el diseño de mezcla en el concreto se deben tener en cuenta diferentes características, que se explicarán a continuación:

Relación agua/cemento

La relación agua/cemento se debe determinar por dos métodos, teniendo en cuenta la resistencia que se requiera y la durabilidad, esta última está relacionada con las condiciones de exposición, como por ejemplo, el ataque por sulfatos.

Agregado grueso

El tener mayor cantidad de agregados gruesos en la mezcla, permite minimizar la cantidad de agua requerida y reduce la cantidad de cemento en la mezcla. El tamaño máximo del agregado es fundamental, debido a las dimensiones de la estructura y la capacidad de los equipos, especialmente.

Trabajabilidad

Es la facilidad de colocación, acabado y consolidación del concreto fresco, la cual se determina según el tipo de construcción en donde será utilizado.

Contenido de agua

Con el asentamiento de la mezcla, se determina el contenido de agua el cual depende del tamaño máximo del agregado y de su forma.

Aditivos

Existen aditivos con diferentes propósitos como reducir agua y retardar o acelerar el fraguado, estos deben ser usados según las recomendaciones de los fabricantes, y deben ser incluidos como parte del peso de la mezcla para igualmente evaluar las propiedades de la misma.

Agregado fino

La dosificación de los agregados finos puede ser por relaciones de peso o por volumen absoluto. En el primer método, el peso del agregado fino es la diferencia del peso total con todos los otros pesos ya conocidos; en cuanto al segundo método, se deben convertir todos los pesos en volumen usando la gravedad específica, por lo que el volumen del agregado fino se determina restando del volumen total, los volúmenes de los otros materiales.

Correcciones por humedad

Finalmente se deben realizar las correcciones debidas a las propiedades de los materiales, si van a ser usados en su estado de humedad natural o van a ser secados al horno, para que el cemento logre la hidratación necesaria. El peso del agua y los agregados se deben ajustar para explicar el contenido de humedad real de los agregados.

2.1.4. Propiedades en estado fresco y endurecido

La evaluación de las propiedades en estado fresco y endurecido, permiten conocer el comportamiento del concreto durante sus diferentes etapas. Su manejabilidad y contenido de aire en cuanto a sus edades iniciales, y en edades mayores, su resistencia a compresión, flexión, módulo de elasticidad y fatiga; estas últimas centradas hacia uso en pavimento rígido, para verificar el cumplimiento de las deformaciones y los esfuerzos máximos que este soporta.

El concreto al ser un material poco homogéneo, no es posible establecer un criterio general para su análisis. En algunas situaciones es posible el desarrollo de fórmulas que estimen su comportamiento, basadas en unas pocas hipótesis iniciales, como es el caso del concreto sometido a flexión pura. En otras situaciones, la única herramienta con la que se cuenta para el diseño, son expresiones obtenidas al correlacionar resultados de gran cantidad de ensayos (Harmsen, 2005).

2.1.4.1. Ensayo de fluidez en mortero

El ensayo de fluidez no está incluido usualmente en las especificaciones del cemento hidráulico, pero se utiliza generalmente cuando se requiere que el mortero tenga un contenido

de agua con un valor de fluidez específico (Sanchez de Guzmán, 2001).

2.1.4.2. Asentamiento en concreto

La manejabilidad es una propiedad del concreto en estado fresco, se refiere a la facilidad con la que este puede ser: mezclado, transportado, colocado, compactado y terminado, sin que pierda su homogeneidad (exude o se segregue). El grado de manejabilidad apropiado para cada estructura, depende del tamaño y forma del elemento que se vaya a construir, de la disposición y del tamaño del refuerzo (Rivera, 1992). Es por ello, que en el caso de una losa de concreto la manejabilidad requerida es menor a la de elementos estructurales como vigas o columnas.

Un método indirecto para determinar la manejabilidad de una mezcla, consiste en medir su consistencia o fluidez por medio del ensayo de asentamiento o del cono de Abrams (NTC 396, 2010). Es una medida rápida para determinar la consistencia o fluidez de una mezcla de concreto, además sirve como parámetro para determinar la consistencia con el diseño, y para detectar posibles variaciones en la homogeneidad de una mezcla.

2.1.4.3. Contenido de aire

Una cantidad de aire variable en cuanto a cantidad, volumen y morfología de las burbujas, puede ser generada durante las operaciones de dosificación y mezclado. Normalmente es conocido como aire atrapado en la mezcla, si éste permanece dentro del concreto aun después del fraguado y ocupa un volumen considerable, lo cual llevaría a obtener descensos importantes en las resistencias mecánicas y en su durabilidad. Es por ello que ha de asegurarse una buena compactación del concreto.

Normalmente, el contenido de aire dentro de una mezcla de concreto aumentará cuando se presente una o varias de las siguientes situaciones (Sanchez de Guzmán, 2001):

- Mezclas pobres en cemento.
- Agregados con tamaño máximo menor.
- Mayor cantidad de arena.
- Consistencias más húmedas.
- Operaciones de mezclado más fuertes o prologadas.
- Inclusión de aditivos incorporadores de aire.

El contenido de aire, en una mezcla se puede determinar mediante el uso de un medidor de aire ocluido por presión, cuyo fundamento está basado en la ley de Boyle, la cual relaciona la presión con el volumen.

2.1.4.4. Proceso de fraguado

Debido a que en la hidratación del cemento se presentan los mayores enlaces internos de la matriz cementante, es necesario conocer sus procesos iniciales, los cuales comienzan cuando el aluminato tricálcico (C_3A) entra en contacto con el agua, y debido a que su proceso de hidratación es muy acelerado, se agrega yeso para regular la hidratación y el fraguado del concreto, originando una pasta en estado plástico, moldeable y trabajable, luego de esto la pasta adquiere rigidez. En esta hidratación se genera igualmente sulfato de calcio, el cual al reaccionar con el aluminato tricálcico, forman sulfoaluminato tricálcico o Etringita primaria, esta se dispersa homogénea y establemente por la pasta de cemento. Desde el momento en que se adiciona agua a la mezcla hasta que la pasta pierde viscosidad, aumenta su temperatura y está parcialmente hidratada, se conoce como fraguado inicial. Luego la pasta continua con el endurecimiento hasta que deja de presentar deformaciones con pequeñas cargas, se rigidiza, disminuye su temperatura y se encuentra mejor hidratada, esto se conoce como fraguado final. Lo anterior ocurre entre 10 y 24 horas desde el comienzo de la hidratación, en este momento el yeso ha finalizado su interacción y la etringita reacciona con el aluminato tricálcico, generando monosulfoaluminato de calcio hidratado, el cual es el producto final de los cementos Portland. Existe una etringita secundaria que se produce luego del fraguado del concreto, cuando este se encuentra en el proceso de endurecimiento y ganancia de resistencia, esta se presenta cuando el concreto se encuentra en estado endurecido pero en condiciones húmedas, la cual se produce por la recristalización de la primaria y genera expansión en el concreto debido a ataque de sulfatos internos (Cifuentes Girard, 2015) (Parra Barrientos, 2015).

2.1.4.5. Resistencia a compresión

El comportamiento de una estructura bajo carga, depende en gran medida de las relaciones esfuerzo-deformación del material con el cual está construida, para el tipo de esfuerzo al que está sometido el material dentro de la estructura.

Debido a que generalmente el concreto se utiliza para soportar cargas a compresión por su buena resistencia ante las mismas, resulta de gran importancia el análisis del comportamiento esfuerzo-deformación unitaria a la compresión (Sanchez de Guzmán, 2001).

Para muestras sometidas a una carga axial a compresión, lo que generalmente interesa saber de su comportamiento esfuerzo-deformación unitaria son, su resistencia, que se define como el esfuerzo máximo que puede soportar ante la carga de aplastamiento, y su módulo de elasticidad, como la pendiente de la curva en el rango elástico-lineal.

2.1.4.6. Resistencia a la flexión

La resistencia a la flexión se aproxima a la resistencia mecánica de la losa de pavimento, ante agresiones de diferente naturaleza como lo son, cargas dinámicas y estáticas, rodaduras e impactos.

La capacidad a la flexión del concreto se representa por el módulo de rotura (MR), que es el valor obtenido mediante el procedimiento indirecto, para determinar la resistencia a la tensión del concreto por el ensayo a la flexión de una viga (C-191-ONNCCE-2004, 2008). La propiedad más conocida del concreto hidráulico es la resistencia a la compresión, sin embargo, el módulo de rotura toma un papel muy importante al momento de diseñar pavimentos u otras estructuras apoyadas sobre suelo (Silva Flores et al., 2013).

El concreto hidráulico se caracteriza por su comportamiento poco eficiente a la flexión, debido a su alta fragilidad, baja capacidad de deformación o arqueamiento antes de la aparición de fisura. El MR es fundamental en el potencial de agrietamiento por fatiga de las losas de concreto, debido a que es el punto inicial de estas para evaluar la fatiga (Garnica Anguas and Sesma Martínez, 2002).

2.1.4.7. Módulo de elasticidad

Para el concreto al igual que para otros materiales, el comportamiento mecánico depende en gran medida de su deformación ante una carga o fuerza externa a la que está sometido. La propiedad que relaciona la deformación elástica con el esfuerzo, es el módulo de elasticidad, el cual puede tener diferentes definiciones dependiendo del tipo de carga o fuerza aplicada. Esta propiedad del material se puede medir de forma dinámica, ante ciclos de carga y descarga, o estática, en donde se somete el material a un esfuerzo conocido y al mismo tiempo se mide la deformación inducida (Alves, 2014).

Según Gutiérrez de López (2003), el valor del módulo de elasticidad en el concreto, al ser un material tan heterogéneo, no es una constante y es un valor que depende de:

- El tipo de agregado.
- La dosificación utilizada.
- El Contenido de aire.
- La velocidad de aplicación de la carga en el ensayo.
- La humedad de la muestra al momento de realizar el ensayo.

Módulo de elasticidad estático

El módulo de elasticidad, obtenido mediante la aplicación de una carga estática, se determina como la relación entre el esfuerzo soportado por el material y su respectiva deformación unitaria, en el campo elástico. Es la pendiente de la secante definida por dos puntos de la curva esfuerzo-deformación, dentro de dicha zona elástica. Estos puntos están definidos como 0 % y 40 % de la resistencia máxima del concreto (López Serrano, 2014)(ASOCRETO, 2000).

Módulo de elasticidad dinámico

Neville (1995) define el módulo dinámico, como aquel que puede ser determinado por medio de ensayos no destructivos, mediante la vibración de una probeta de concreto al aplicar un esfuerzo muy bajo, evitando el deterioro de la misma. Una de las formas de determinarlo, es mediante una prueba de resonancia (Malaikah et al., 2004), donde se utiliza un pulso ultrasónico y se mide la velocidad que tarda la onda en atravesar la muestra de concreto. Jameson and Howard (2012) sugiere que se generen pulsos de carga que no excedan el 40 % de la resistencia a flexión.

2.1.4.8. Fatiga

Uno de los problemas recurrentes en el pavimento rígido es el ocasionado por el exceso repetitivo de esfuerzos de flexión (fatiga), generados por las cargas de tránsito que inducen la desintegración del pavimento y el fracturamiento de la losa en grietas transversales, longitudinales, de esquina y de bloque, lo cual hace apropiado un diseño realista del comportamiento a fatiga (Altamirano, 2007). Entre los factores que afectan la fatiga en los pavimentos hidráulicos, se encuentran el número de aplicaciones de carga, la resistencia y módulo de rotura, el espesor de la losa de concreto, el espaciamiento entre juntas trasversales, el apoyo en el borde de las losas, los apoyos de la subrasante, los aditivos, el tiempo de curado y la edad del concreto (Garnica Anguas and Sesma Martínez, 2002).

El comportamiento a fatiga del concreto, experimentalmente, se determina mediante el número de ciclos necesarios para que el módulo de elasticidad inicial del material, se disminuya en un 50 % al aplicarse carga dinámica sobre una viga sometida a flexión (Jameson and Howard, 2012). También es estudiado en términos del esfuerzo aplicado, expresado como un porcentaje del módulo de rotura, contra el número de ciclos de carga aplicados a la falla (Shi et al., 1993). La relación de esfuerzos experimentada por un pavimento de concreto, se relaciona con el logaritmo de la cantidad de aplicaciones de carga necesarias para producir la falla por fatiga, y se expresa generalmente, como una relación de esfuerzos y no con el esfuerzo de rotura, para eliminar la influencia de la relación agua-cemento, tipo y granulometría de los agregados, y tipo de cemento (Lee and Barr, 2004).

Para relacionar el esfuerzo con el número de cargas que resiste hasta la falla, se han obtenido leyes de fatigas por diferentes entidades viales, utilizando como datos de entrada resultados

de laboratorio y de campo (Rao and Roesler, 2005). Entre estos métodos se encuentran: el modelo de cero mantenimiento (Federal Highway Administration), el modelo calibrado mecanicista (US Army Corps of Engineers) (Huang, 2004), el modelo Fosxworthy desarrollado por el cuerpo de ingenieros (COE), método racional francés (LCP, 1997), el modelo de fatiga presentado por la PCA (Portland Concrete Association) (Garnica Anguas and Sesma Martínez, 2002) (Boada Marcano and Pérez Niel, 2011).

Particularmente, el método racional francés de diseño de pavimentos caracteriza las curvas de fatiga con dos parámetros de fácil obtención, el esfuerzo de rotura para un millón de ciclos de carga y la pendiente de la curva de fatiga 'b', lo que hace permisible su fácil comparación con los resultados obtenidos por diferentes autores como se observa en la Figura 2.2 (Rodríguez Villareal, 2013).

Autor	Rango evaluado en Relación de esfuerzos (σ/MR)		MR (MPa)	σ_s (MPa)	b	-1/b	σ_s/MR
Byung Hwan, 1991	65%	85%	4.54	2.80	-0.052	20	0.62
Johnston et al., 1991	80%	90%	4.45	3.20	-0.040	25	0.72
Shi et al., 1993	65%	90%	6.04	3.50	-0.042	24	0.58
Goel et al., 2012	65%	90%	4.89	3.10	-0.045	23	0.63
LCPC - SETRA, 1997 (Clase 5)				2.15	-0.063	16	
LCPC - SETRA, 1997 (Clase 4)				1.95	-0.067	15	
LCPC - SETRA, 1997 (Clase 3)				1.63	-0.067	15	
LCPC - SETRA, 1997 (Clase 2)				1.37	-0.071	14	
PCA, 1984	45%	100%					0.50

Figura 2.2: Parámetros del modelo racional francés de curvas de fatiga

Distribución de Weibull

Debido a la heterogeneidad del concreto, los datos de fatiga muestran generalmente una alta variabilidad, por ello es pertinente emplear conceptos probabilísticos en el diseño, para asegurar una adecuada resistencia a la fatiga del material (Oh, 1991).

Una función de distribución, es la probabilidad de que una variable tome valores iguales o menores que x , para este análisis se utilizó la función de distribución de probabilidad de Weibull, ya que es una distribución asociada el tiempo de vida de falla, lo cual se está analizando. Weibull en 1951 propuso una ecuación empírica que representa la confiabilidad de una gran variedad de datos reales, la se expresa en la Ecuación 2.2

$$R(t) = \exp \left[- \left(\frac{t - t_0}{\eta} \right)^\beta \right] \quad (2.2)$$

- En donde t es el valor específico de la variable aleatoria, en este caso el número de ciclos en la falla.

- t_0 es el parámetro inicial de localización en unidad de tiempo, es decir, la vida mínima que es de 0 y es el punto de partida de la distribución.
- Cuando se presentan fallas después de este tiempo, entonces $t_0 > 0$.
- Cuando se presentan fallos antes de que se realice el ensayo entonces $t_0 < 0$
- η es la vida característica o parámetro de escala, es decir, la extensión de la distribución a lo largo de los ciclos.
- β es un parámetro de forma que representa la pendiente de la recta que describe el grado de variación de la relación de las fallas.

Teniendo en cuenta el $t_0 = 0$, entonces la Ecuación 2.2, continúa como se muestra en la Ecuación 2.3.

$$R(t) = \exp \left[- \left(\frac{t}{\eta} \right)^\beta \right] \quad (2.3)$$

Con la función de distribución de Weibull se requiere determinar el número de ciclos que resiste el pavimento con un nivel de confianza determinado, por lo que la variable a despejar es t , que al hacer el doble logaritmo natural en ecuación se tiene la Ecuación 2.4

$$\ln \left[\ln \left(\frac{1}{R} \right) \right] = \beta \ln(t) - \beta \ln(\eta) \quad (2.4)$$

Obteniendo finalmente la Ecuación 2.5

$$t = \eta * \left(\left[\ln \left(\frac{1}{R} \right) \right] \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (2.5)$$

Para hallar los valores de la curva η y β , y conociendo que la función de distribución de Weibull sigue una función de distribución gamma; con las variables de esta distribución, se sabe que la media está dada por la Ecuación 2.6, el cuadrado de la media es la Ecuación 2.7, el coeficiente de variación al cuadrado se presenta en la Ecuación 2.8 y finalmente al despejar β se obtiene la Ecuación 2.9, en donde COV es el coeficiente de variación de los datos de fatiga al nivel de esfuerzos evaluado (Singh and Kaushik, 2003)(Pertuz C., 2004)(Rodríguez Villareal, 2013).

$$E(t) = \eta * Gamma \left(\frac{1}{\beta} + 1 \right) \quad (2.6)$$

$$E(t^2) = \eta^2 * Gamma \left(\frac{2}{\beta} + 1 \right) \quad (2.7)$$

$$\left(\frac{\sigma}{\mu} \right)^2 = \frac{Gamma \left(\frac{2}{\beta} + 1 \right)}{Gamma \left(\frac{1}{\beta} + 1 \right)} - 1 \quad (2.8)$$

$$\beta = COV^{-1,08} \quad (2.9)$$

Finalmente para obtener el valor de la variable η se tiene la Ecuación 2.10

$$\eta = \frac{\mu}{Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right)} \quad (2.10)$$

2.2. Marco teórico

Se han realizado investigaciones sobre la adición de nanomateriales de carbono en materiales cementantes, tal como Al-Saud et al. (2011), que adicionaron nanomateriales en pasta de cemento, compuestos por: NTC estructurados, NFC, carbón amorfo, partículas de grafito e incluso impurezas metálicas (los porcentajes en la composición tienen gran variabilidad, dependiendo del régimen de trabajo del reactor); y llegaron a la conclusión que la resistencia máxima a la compresión, se presenta con un porcentaje de adición de 0.05 % sobre la masa del cemento, incrementando la resistencia a compresión en un 15 % y a flexión en un 20 %. Otros nanomateriales utilizados son las nanoarcillas, como el estudio realizado por Morsy et al. (2011), en donde encontraron que existen porcentajes óptimos de adición, que no existe una relación directa entre el aumento del porcentaje de adición de este nanomaterial, con el aumento a la resistencia a compresión de en los morteros.

De los nanomateriales de carbono usados, los NTC han sido empleados como uno de los materiales de refuerzo más populares (en escala nanométrica), adicionados a materiales poliméricos y cementantes, debido a sus excelentes propiedades mecánicas, incluyendo su alto módulo de elasticidad y resistencia a la tensión. Sin embargo, al unirse con otros materiales sus propiedades se ven limitadas, algunos de los factores a los que se atribuye este comportamiento son: la forma de los NTC, daños en los enlaces, la falta de dispersión y su orientación (Yang et al., 2014).

A continuación se realizará una descripción de estudios realizados por diferentes autores en cuanto a dispersantes y porcentajes de adición de NTC utilizados, los cuales se presentan en la Tabla 2.3.

2.2.1. Dispersión de NCC

La dispersión de los NCC puede estar asociada a la alta atracción de las fuerzas de Van der Waals entre las partículas, al área superficial considerable y a la alta relación longitud/diámetro de los mismos, lo cual causa que estos tiendan a aglomerarse, dificultando su dispersión y conduciendo la formación de defectos de los NTC en la mezcla, limitando la eficiencia de éstos en la matriz (Collins et al., 2012) (Morsy et al., 2011). Debido a este gran reto y la necesidad de

buscar soluciones para optimizar la dispersión de los NCC, se han utilizado diversos métodos y agentes dispersantes, los cuales han permitido que las partículas queden suspendidas en el medio acuoso, ya sea por métodos mecánicos o por métodos que alteran la energía superficial del sólido, de forma física (tratamiento no covalente) o química (tratamiento covalente) (Vaisman et al., 2006). Un tratamiento mecánico mediante baño de ultrasonido o mezclado de alto cizallamiento, puede lograr una correcta separación de los NTC, pero esta técnica puede llegar a fragmentarlos o alterar sus propiedades mecánicas (Jung et al., 2012). Es importante tener en cuenta que un mal esparcimiento de las partículas, puede originar la formación de defectos zonificados, limitando así la eficiencia de los NTC en la matriz cementante (Xie et al., 2005).

Se han utilizado diferentes dispersantes como polímeros, metilcelulosa, antiespumante, surfactantes, entre otros. Igualmente se han realizado distintos métodos de dispersión como ultrasonido y mezclas mecánicas en seco. Dentro de los métodos de dispersión por ultrasonido se encontró que Collins et al. (2012) realizaron una dispersión ultrasónica de los NTC con adición de policarboxilato como agente dispersante, con lo cual consiguieron un aumento en la resistencia a la compresión de 25 %, quienes también evaluaron algunos factores como: la relación longitud/diámetro, la proporción de los NTC, la relación agua/cemento, agentes dispersantes. Konsta-Gdoutos et al. (2010) también realizaron una dispersión por ultrasonido con un surfactantes a base de policarboxilatos, logrando un aumento en el modulo de Young y en la resistencia a la flexion, hasta de un 35 %. Gdoutos et al. (2016), realizaron una dispersión por ultrasonido con policarboxilato, obteniendo aumentos en la resistencia a la flexión de 87 % y en módulo de elasticidad de 92 %. Glenn (2013), utilizó como método de dispersión ultrasonido y como agente dispersante, un surfactante obteniendo un aumento en la resistencia a la compresión entre 13 y 27 %. Por otra parte se encontró que Genovés Gómez (2011), utilizó la técnica de dispersión por ultrasónido durante 5 minutos sin agente dispersante, en la cual obtuvo reducciones en la resistencia a compresión de un 60 %.

Con respecto a las mezclas en seco se encontró que Li et al. (2005), realizaron una mezcla mecánica (en mezcladora de batidor plano) añadiendo metilcelulosa, un antiespumante y reductor de agua, para dispersar NFC en una matriz de cemento, obteniendo un aumento en la resistencia hasta del 52 % a compresión y 7 % a flexión. Igualmente, Al-Saud et al. (2011) obtuvieron un aumento en la resistencia en la compresión hasta de un 15 % y de flexión en un 20 %, realizando una dispersión de los NTC en el molino de bolas junto con el cemento. Zuo et al. (2012), obtuvieron aumento en la resistencia a la compresión entre el 20 y 30 %, realizando mezcla mecánica, magnética y por ultrasonido, usando como agente dispersante humo de silice.

Otro factor que se ha evaluado para mejorar la interacción entre la matriz cementante y los NTC es la purificación o funcionalización, esto consiste en tratamientos ácidos los cuales fueron introducidos por primera vez en aplicación a matrices cementantes por Li et al. (2005).

Sin embargo, se ha planteado que los tratamientos ácidos son muy agresivos para los NTC, degradando sus propiedades mecánicas y eléctricas (Mendoza et al., 2014). No obstante, Cwirzen et al. (2008), obtuvieron un aumento en la resistencia a compresión de hasta un 50 % al implementar una dispersión ultrasónica de los NTC de pared múltiple funcionalizados, con adición de un polímero de ácido poliacrílico como agente dispersante. Igualmente, Sharma and Kothiyal (2016) realizaron una dispersión de NTC funcionalizados con superplastificante como agente dispersante, por medio de ultrasonido y obtuvieron aumento en la resistencia a la compresión de 37 % y a la flexión de 57 %.

Como se nombró anteriormente, Li et al. (2005) realizaron una mezcla mecánica en mezcladora de batidor plano y con respecto a los NTC funcionalizados obtuvieron un incremento de la resistencia a compresión de 19 % y a flexión de 25 %. Mientras que Musso et al. (2009), realizaron una adición por medio de ultrasonido con acetona en tres tipos diferentes de NTC (sin tratar, calcinados y funcionalizados), para los dos primeros obtuvieron excelentes resultados aumentando la resistencia a la compresión entre un 10 % y 20 % y entre 9 % y 34 % a flexión, mientras que para los NTC funcionalizados, disminuyó hasta 6 veces la resistencia a la compresión y 2.5 veces a flexión.

2.2.2. Adición de NCC en matrices cementantes

Se han adicionado NCC en diferentes matrices cementantes como pasta de cemento, mortero y concreto. En cuanto a pasta de cemento, Cwirzen et al. (2008) adicionaron NTC en 0.045 % del peso del cemento, con una relación agua/cemento de 0.3 y obtuvieron un aumento en la resistencia a compresión de hasta un 50 %. Igualmente Konsta-Gdoutos et al. (2010), determinaron que mediante una relación agua/cemento de 0.5 y la adición de NTC de pared múltiple con una baja relación longitud/diámetro ($l/d=700$), en una concentración de 0.08 % sobre el peso del cemento, incrementa la resistencia a la flexión y el módulo de Young de la pasta de cemento en un 35 %, mientras que utilizando NTC con relación $l/d=1600$, pudieron obtener mejoras similares en las propiedades mecánicas del cemento, incluso con menor contenido de NTC en la mezcla. Collins et al. (2012) adicionaron NTC en una proporción de 0.5 % con respecto al peso del cemento, con una relación agua/cemento de 0.35, en donde consiguieron un aumento en la resistencia a la compresión hasta en un 50 %. Musso et al. (2009), realizaron la adición de NTC de 0.5 % con respecto al peso del cemento y las relaciones agua/cemento que funcionaron mejor estuvieron entre 0.4 y 0.56, aumentando la resistencia a la compresión entre 10 % y 20 % y a flexión entre 9 % y 34 %, para los NTC no funcionalizados y calcinados, a diferencia de los NTC funcionalizados en donde disminuyó la resistencia a la compresión en hasta 6 veces, y la flexión hasta 2.5 veces. Zuo et al. (2012) encontraron que los porcentajes de adición óptimos de NTC se encontraban entre 0.02 % y 1.0 %, con una relación agua/cemento de 0.46 con un aumento en la resistencia a la compresión entre el 20

y 30 %. Sharma and Kothiyal (2016), encontraron que usando una relación agua/cemento de 0.45, con una adición de 0.25 % con respecto al peso del cemento obteniendo un aumento en la resistencia de 37 % a compresión y 57 % a flexión.

Con respecto a adiciones de NTC en mortero, se encontró que Li et al. (2005) utilizaron una relación agua/cemento de 0.45 y una adición de NFC, obteniendo un aumento en la resistencia hasta del 52 % a compresión y 7 % a flexión; y NTC funcionalizados en una concentración de 0.5 % del peso total del cemento, donde se determinó un incremento de la resistencia a compresión de 19 % y a flexión de 25 %. Hamzaoui et al. (2012) con respecto a morteros, determinaron que la relación óptima de adición de NTC era de 0.01 % con respecto al peso del cemento aumentando la resistencia a la compresión en un 20 %. Gdoutos et al. (2016), adicionaron NTC en 0.1 % con respecto al peso del cemento, con una relación agua/cemento de 0.49, obteniendo aumentos en la resistencia a la flexión de 87 % y en módulo de elasticidad de 92 %.

Con respecto a la adición de NTC en concreto se encontraron diferentes resultados dentro de los cuales está el estudio realizado por Genovés Gómez (2011) quien adicionó NTC en concreto en un 0.5 % con respecto al peso del cemento, con una relación agua/cemento de 0.36 y obtuvo reducciones en la resistencia hasta de un 60 %. Por otra parte se encontró que Al-Saud et al. (2011) adicionaron NTC en 0.05 % del peso del cemento con una relación agua/cemento de 0.4 y obtuvieron un aumento en la resistencia en la compresión hasta de un 15 % y de flexión hasta de un 20 %. Hamzaoui et al. (2012) determinaron que la relación óptima de adición de NTC era de 0.003 % con respecto al peso del cemento aumentando la resistencia a la compresión en un 17 %. Glenn (2013) realizó una adición de NTC no funcionalizados y encontró que para relaciones agua/cemento entre 0.4 y 0.5, la adición de NTC en porcentaje del peso del cemento óptima era de 0.37, con un aumento en la resistencia a la compresión de 13 % y para relaciones agua/cemento entre 0.6 y 0.65, la adición óptima de NTC era de 0.3 con un aumento en la resistencia de 17 %.

Tabla 2.3: Resumen dispersiones realizadas por diferentes autores

Autor	Matriz cemento	Relación a/c	% Adición	Agente dispersante	Método de dispersión	Resultado obtenido
Cwirzen et al. (2008)	Pasta de cemento	0.3	0.045	Ácido poliacrílico	Ultrasonido	NTC funcionalizados, aumento en resistencia a la compresión de 50 %.
Musso et al. (2009)	Pasta de cemento	0.4-0.56	0.5	Acetona	Ultrasonido	NTC no funcionalizados, aumento en resistencia a la compresión de 10 a 20 % y a flexión de 9 a 34 %. NTC funcionalizados, disminución en resistencia a compresión en hasta 6 veces, y a flexión hasta 2.5 veces.
Konsta-Gdoutos et al. (2010)	Pasta de cemento	0.5	0.08	Policarboxilato	Ultrasonido	NTC no funcionalizados, aumento en resistencia a la flexión y el módulo de Young de la pasta de cemento en un 35 %.
Collins et al. (2012)	Pasta de cemento	0.35	0.5	Policarboxilato	Ultrasonido	NTC no funcionalizados, aumento en resistencia a compresión de 25 %.
Zuo et al. (2012)	Pasta de cemento	0.46	0.2-1.0	Humo de sílice	Mezcla mecánica, magnética y ultrasonido	NTC no funcionalizados, aumento en resistencia a compresión entre 20 y 30 %.
Sharma and Kothiyal (2016)	Pasta de cemento	0.45	0.25	Superplastificante	Ultrasonido	NTC funcionalizados, aumento en resistencia a compresión de 37 % y a flexión de 57 %.
Li et al. (2005)	Mortero	0.45	0.5	Mezcla mecánica	Batidor plano	NTC funcionalizados, aumento en resistencia a compresión de 19 % y a flexión en 25 %.
Hamzaoui et al. (2012)	Mortero		0.01	Solución líquida	Comercial	NTC no funcionalizados, aumento en resistencia a compresión de 20 %.
Gdoutos et al. (2016)	Mortero	0.49	0.1	Policarboxilato	Ultrasonido	NTC no funcionalizados, aumento en resistencia a flexión de 87 % y de módulo de elasticidad de 92 %.
Genovés Gómez (2011)	Concreto	0.36	0.5		Ultrasonido	NTC no funcionalizados, disminución en resistencia a compresión de 60 %.
Al-Saud et al. (2011)	Concreto	0.4	0.05	Mezcla mecánica	Molino de bolas	NTC no funcionalizados, aumento en resistencia a compresión de 15 % y a flexión de 20 %.
Hamzaoui et al. (2012)	Concreto		0.003	Solución líquida	Comercial	NTC no funcionalizados, aumento en resistencia a compresión de 17 %.
Glenn (2013)	Concreto	0.4-0.5	0.37	Surfactante	Ultrasonido	NTC no funcionalizados, aumento en resistencia a compresión de 13 %.
	Concreto	0.6-0.65	0.3	Surfactante	Ultrasonido	NTC no funcionalizados, aumento en resistencia a compresión de 27 %.

Capítulo 3

Metodología

La metodología utilizada en la fase experimental se presenta en las Figuras 3.1 y 3.2.

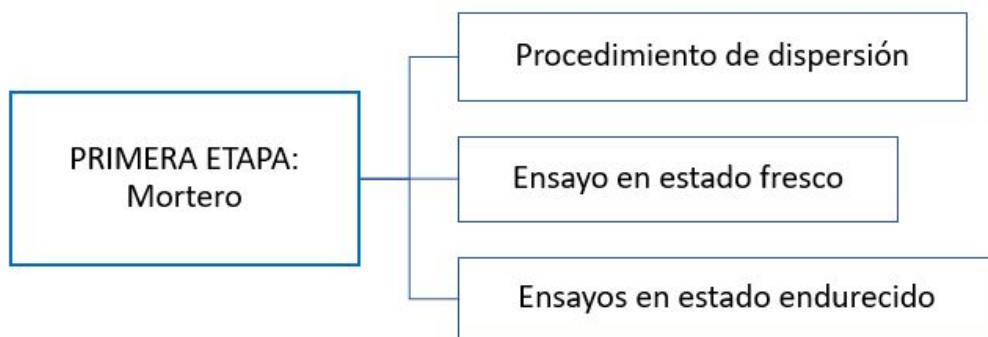


Figura 3.1: Primera etapa

Inicialmente se realizaron pruebas en mortero principalmente para seleccionar la relación molar Cu/Ni.

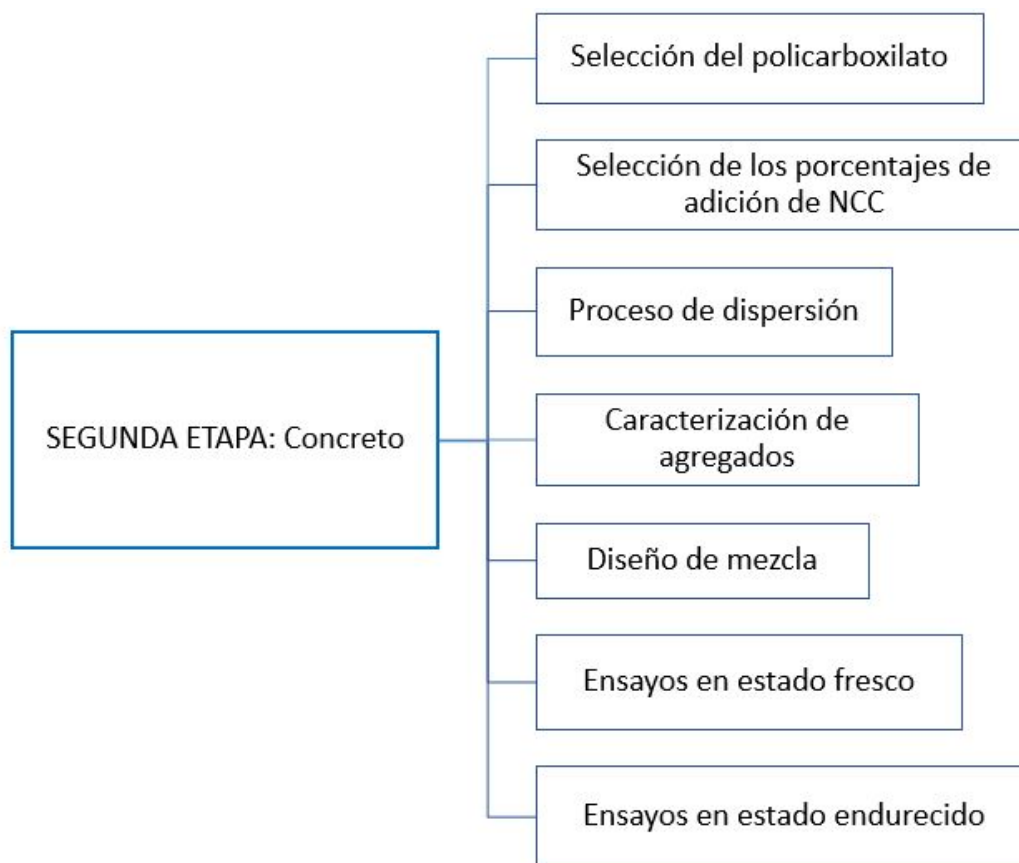


Figura 3.2: Segunda etapa

La segunda etapa correspondió a los ensayos realizados en concreto para dar cumplimiento a los diferentes objetivos específicos, dentro de los cuales se encuentran, la forma de dispersión y la medición de las propiedades en estado fresco y endurecido del concreto.

3.1. Primera etapa: Mortero

Inicialmente se evaluaron tres relaciones molares Cu/Ni (0.33, 1.0 y 2.0), con una adición de 0.5 % con respecto al peso de cemento. Estas relaciones molares están directamente relacionadas con la longitud de los NCC; de las estudiadas, la relación de 0.33 presenta las NFC y NTC de mayor longitud. Para tener un orden de magnitud, en la Tabla 3.1 se presenta el rango de longitudes para cada una de las relaciones atómicas.

Tabla 3.1: Longitudes de NTC según relación atómica Cu/Ni de catalizador

Relación Cu/Ni	Longitud [μ m]	Diámetro [nm]
0.33	1.0 - 2.0	25 - 30
1.0	0.5 - 1.0	
2.0	0.3 - 0.7	

3.1.1. Procedimiento de dispersión

Dada la alta importancia que tiene la longitud de los NTC ante las propiedades mecánicas de la matriz, así como la dispersión de los mismos debido a su carácter hidrófobo; se evaluó su dispersión de manera cualitativa después de un baño ultrasónico durante 40 minutos, a una frecuencia de 40 kHz y a una potencia de 100 W, según lo recomendado en la literatura (Li et al., 2007).

3.1.2. Ensayo en estado fresco

Para verificar el diseño de mezcla del mortero, se evaluó la fluidez del mismo siguiendo el procedimiento de la NTC 5784 (2010), en el cual se miden 4 diámetros del mortero en las líneas demarcadas en la mesa con un calibrador, debido a que la fluidez es el aumento promedio del diámetro del mortero con respecto al diámetro inicial, este último corresponde al diámetro interno de la parte inferior del molde. El cálculo de flujo se observa en la Ecuación 3.8

$$\%fluidez = \left(\frac{A}{B} \right) * 100 \quad (3.1)$$

En donde A es el promedio de los 4 diámetros medidos menos el diámetro inicial y B es el diámetro inicial.

El porcentaje de fluidez escogido, se determinó según el uso al cual está destinado el mortero, que se puede observar en la Tabla 3.2, con una consistencia media y un sistema de colocación manual con palustre.

Tabla 3.2: Fluidez recomendada para mortero *Fuente: Sanchez de Guzmán (2001)*

Fluidez (%)	Consistencia	Tipo de estructura	Condiciones de colocación	Sistema de colocación
80-100	Dura (seca)	Reparaciones, recubrimiento de túneles, galerías, pantallas de cimentación y pisos.	Secciones sujetas a vibración.	Proyección neumática, con vibradores de formaletas.
100-120	Media (plástica)	Pega de mampostería, baldosines pañetes y revestimientos.	Sin vibración.	Manual con palas y palustre.
120-150	Fluida (húmeda)	Rellenos de mampostería estructural, morteros autoniveladores para pisos.	Sin vibración.	Manual, bombeo o inyección.

3.1.3. Ensayos en estado endurecido

Para escoger la mejor relación molar de catalizador de Cu/Ni entre las tres (3) señaladas anteriormente, se realizaron cubos y vigas de mortero evaluando la resistencia a la compresión y flexión de estos especímenes, la cantidad de estos realizados se puede observar en la Tabla 3.3. Luego del desencofre, el proceso de curado durante los siguientes 27 días siguientes, se realizó según la NTC 3546 (2010) para morteros.

Tabla 3.3: Especímenes realizados de mortero

Ensayo	Tipo especímen	No. especímenes por relación molar	No. especímenes totales
Resistencia a la compresión	Cubos	3	12
Resistencia a la flexión	Vigas	3	12

Pasados 28 días de la elaboración de los cubos y vigas de mortero, se procedió a realizar los ensayos de resistencia a la compresión según la norma I.N.V.E-323-13 (2013), y de resistencia a la flexión según la UNE EN 1170.

Luego de realizada esta etapa, se determinó la relación molar de los NTC que se iba a utilizar en el presente estudio, así como el tipo de dispersión a realizar.

3.2. Segunda etapa: Concreto

3.2.1. Selección del policarboxilato

Debido al estado del arte realizado, se decidió evaluar la efectividad de dos aditivos como agentes dispersantes de los NCC en el agua. Los aditivos superplastificantes/reductores de agua de alta actividad basados en éteres policarboxílicos modificados, se escogieron según las propiedades que se recomiendan en la literatura, debido a que se pretende conservar un ambiente poco alcalino para generar la dispersión más estable en el tiempo, las propiedades de estos superplastificantes se presentan en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4: Longitudes de NTC según relación atómica Cu/Ni de catalizador

Propiedad	SP1	SP2
Densidad [g/cm^3]	1.08	1.03 - 1.07
pH	4 - 6	6.5
Viscosidad [cps]	> 60	< 60
Contenido de cloruros [%]	<0.1	<0.1

Para verificar la dispersión de los NCC en el agua, se realizó la verificación por medio del ensayo de turbidez y de barrido espectral los cuales se explican a continuación.

3.2.1.1. Ensayo de turbidez

La turbidez indica el grado de falta de transparencia del agua debido a partículas insolubles que se encuentran en suspensión, coloidales, minerales u orgánicas (Espigares García and Moreno Abril, 1999), por lo que se decidió realizar este ensayo en el Digital Direct-Reading TURBIDIMETER (Orbeco-Hellige), el cual consiste en un detector que recibe un haz de luz producida por una lámpara de tungsteno, dispersada por las partículas de la muestra, esta luz pasa a 90 grados de la muestra. El turbidímetro tiene tres rangos de medida, las cuales son: De 0.00 a 9.99 NTU, de 10 a 99.9 NTU y el último de 100 a 999 NTU (Figura 3.3), estos rangos dependen del nivel de turbidez de la muestra que se evalúe. Inicialmente, se pasa una muestra cero de agua desionizada con la cual se inicia la medición y tiene un valor de turbidez de 0 NTU, con respecto a esta se realiza la medida de las otras muestras. Para este caso, fueron soluciones de agua, NCC y cada uno de los policarboxilatos, las cuales se realizaron durante 15 días.



Figura 3.3: Turbidímetro

3.2.1.2. Ensayo de barrido espectral UV-VIS

Los detectores UV-VIS son detectores de absorbancia, que son muy utilizados para el análisis de cromatografía líquida de alta resolución (HPLC), el cual consiste en un método físico de separación basado en la distribución de los componentes de una mezcla entre dos fases, una fija o estacionaria y otra móvil, que se desplaza en una dirección definida (Rigaut et al., 1999). Por lo que se decidió realizar este ensayo en el UV-Visible Spectrophotometer (Cary) (Figura 4.7), en donde la muestra pasa a través de una celda de vidrio claro sin color,

llamada celda de flujo. Cuando la luz UV se irradia en la celda de flujo, la muestra absorbe una parte de la luz UV. Así, la intensidad observada para la fase móvil (sin muestra) y la muestra a analizar será diferente. Al medir esta diferencia, se determina la absorbancia de la muestra.



Figura 3.4: Detector de absorbancia UV-VIS

3.2.2. Selección de los porcentajes de adición de NCC

Mediante la bibliografía consultada, se encontraron diferentes porcentajes de adición de NCC con respecto al peso del cemento en matrices cementante, en los cuales se obtuvieron tanto aumentos en la resistencia a la compresión y flexión como disminución en la resistencia a la compresión, los cuales se presentan en la Tabla 3.5

Tabla 3.5: Porcentajes de adición de NTC de diferentes autores

Adición [%]	0.003	0.05	0.08	0.045 - 0.15	0.5	0.5	0.5 - 1.0
Autor	Hamzaoui et al. (2012)	Al-Saud et al. (2011)	Konsta-Gdoutos et al. (2010)	Cwirzen et al. (2008)	Collins et al. (2012)	Musso et al. (2009)	Genovés Gómez (2011)

Analizando la información anterior, se tiene que Al-Saud et al. (2011), Konsta-Gdoutos et al. (2010) y Cwirzen et al. (2008) obtuvieron mayor aumento en las resistencias, con los menores porcentajes de adición, como se observa en la Figura 3.5. Igualmente se observa que (Genovés Gómez, 2011), con los mayores porcentajes de adición encontrados, obtuvo una disminución en la resistencia a la compresión. Por lo que los porcentajes de adición escogidos para esta investigación están entre 0.05 % y 0.15 %.



Figura 3.5: Porcentajes de adición de NTC escogidos

3.2.3. Proceso de dispersión

Luego de escoger el tipo de superplastificante a utilizar y la cantidad de NCC se realizó el proceso de dispersión que consistió en:

- Tamizar los NCC a través del tamiz No. 100, buscando deshacer las aglomeraciones de tamaño considerable.
- Diluir 0.15 ml de aditivo en 50 ml de agua, y añadir 0.05 g de NCC a la solución.
- La dispersión de la solución comenzó con una mezcla magnética durante 15 minutos a una velocidad de 200 rpm.
- Y finalmente se realizó un baño ultrasónico, a una frecuencia de 40 kHz y una potencia de 100 W, durante 15 minutos efectivos, para evitar que la temperatura en las soluciones aumentara.

3.2.4. Caracterización de agregados

Con el propósito de alcanzar los objetivos propuestos en el presente trabajo, se realizó inicialmente una caracterización físico-química de la grava y la arena, abarcando los siguientes ensayos para posteriormente diseñar la mezcla, tomando en cuenta las propiedades físicas del agregado :

3.2.4.1. Granulometría

El procedimiento de tamizado se realizó según la NTC 174 (2010), iniciando con el cuarteo del material en agregados finos y gruesos. Con los valores del porcentaje pasante por cada tamaño de tamiz, se calcularon factores como el módulo de finura, el tamaño máximo del agregado y el tamaño máximo nominal, tanto para agregados finos como para gruesos, esto con el fin de realizar luego el diseño de mezcla.

Los límites de clasificación para los agregados finos, se determinaron según la Tabla 3.6. En cuanto a los agregados gruesos, teniendo en cuenta el tamaño nominal se establecieron los límites presentados en la Tabla 3.7.

Tabla 3.6: Límites pasantes agregado fino

Tamiz	Porcentaje que pasa
9.5 mm	100
4.75 mm	95 a 100
2.36 mm	80 a 100
1.18 mm	50 a 85
600 μ m	25 a 60
300 μ m	10 a 30
150 μ m	2 a 10

Tabla 3.7: Límites pasantes agregado grueso

No. tamaño del agregado	Tamaño nominal	Material que pasa uno de los siguientes tamices (porcentaje en masa)				
		50 mm	37.5 mm	25 mm	19 mm	9.5 mm
4	37.5 mm a 19.0 mm	100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	0 a 5

Para determinar el primer factor mencionado anteriormente, el módulo de finura, se debe realizar la suma de porcentajes retenidos acumulados en los tamices estándar, que cumplen con la relación 1:2 desde el tamiz No. 100 hasta el máximo tamiz que retenga material, dividido en 100. Con respecto al segundo factor, tamaño máximo del agregado, se determina como la abertura del menor tamiz que permite el paso del 100 % del material, y en cuanto al tercer y último factor mencionado, que es el tamaño máximo nominal del agregado, se define como, la abertura del tamiz siguiente al cual tenga un porcentaje retenido de 15 % o más.

3.2.4.2. Absorción

En agregados finos el ensayo se realizó según la norma I.N.V.E-222-13 (2013), en cuanto a los agregados gruesos, se siguió el procedimiento de la norma I.N.V.E-223-13 (2013). Para los

dos tipos de agregados, esta propiedad se calcula como según la Ecuación 3.2.

$$\%absorcion = \left(\frac{W_{sss} - W_s}{W_s} \right) * 100 \quad (3.2)$$

En donde W_{sss} , es el peso de la muestra saturada superficialmente seca y W_s es el peso seco de la muestra.

3.2.4.3. Humedad

Este ensayo se realizó siguiendo la norma I.N.V.E-122-13 (2013) tanto para agregados finos como para agregados gruesos, la cual se determina según la Ecuación 3.3, siempre y cuando sea una muestra sin materias extrañas como por ejemplo, cemento, con materia orgánica, con contenido de yeso o materiales solubles.

$$\% humedad = \left(\frac{W_1 - W_2}{W_2 - W_c} \right) * 100 \quad (3.3)$$

En donde W_1 es el peso del recipiente y el material húmedo, W_2 es el peso del recipiente y el material seco y por último, W_c , es el peso del recipiente.

3.2.4.4. Densidad aparente

Para determinar la densidad de diseño de los agregados finos, se realizó el procedimiento de la norma I.N.V.E-223-13 (2013) y su cálculo se realizó con la Ecuación 3.4.

$$Densidad\ aparente = \frac{997,5 * W_s}{W_p + W_s - W_{pm}} \quad (3.4)$$

En donde el factor de 997. 5 es el promedio de la gravedad específica del agua en kg/m^3 , W_s es el peso de la muestra seca al horno, W_p es el peso del picnómetro aforado lleno de agua y W_{pm} es el peso total del picnómetro aforado con la muestra y lleno de agua.

3.2.4.5. Masa unitaria

Para determinar la densidad de diseño de los agregados gruesos, se realizó el ensayo siguiendo el procedimiento de la norma I.N.V.E-217-13 (2013), la cual se determina con la Ecuación 3.5.

$$Masa\ unitaria = \frac{W_s}{V_r} \quad (3.5)$$

En donde W_s es el peso seco del material y $V[r]$ es el volumen del recipiente.

3.2.4.6. Equivalente de arena

Para realizar el ensayo se siguió el procedimiento de la norma I.N.V.E-133-13 (2013), el cual se halla con la Ecuación 3.6.

$$\text{Equivalente de arena} = \frac{A}{B} * 100 \quad (3.6)$$

En donde A es la lectura de arena y B es la lectura de arcilla.

La caracterización de los agregados se presenta en las Tablas 3.8 y 3.9. En la Figura 3.6 se observa la curva granulométrica de los agregados finos, grueso, la curva del diseño de mezcla con los agregados y el cemento, y la parábola de Bolomey por la que se ajustó la curva del diseño de mezcla.

Tabla 3.8: Granulometría agregado fino

Característica agregado fino	Valor
Módulo de finura	3.302
Tamaño máximo agregado	3/8"
Tamaño máximo nominal	#4
Densidad aparente	2585.91 kg/m^3
Absorción	1.58 %
Humedad	1.48 %
Masa unitaria suelta	1688.84 kg/m^3
Masa unitaria compacta	1754.05 kg/m^3

Tabla 3.9: Granulometría agregado grueso

Característica agregado grueso	Valor
Módulo de finura	5.978
Tamaño máximo agregado	1 1/2"
Tamaño máximo nominal	3/4"
Densidad aparente	2707.24 kg/m^3
Absorción	0.99 %
Humedad	0.36 %
Masa unitaria suelta	1619.89 kg/m^3
Masa unitaria compacta	1725.45 kg/m^3

En el ensayo de equivalente de arena se obtuvo un valor de 77 de arena con respecto a la fracción fina.

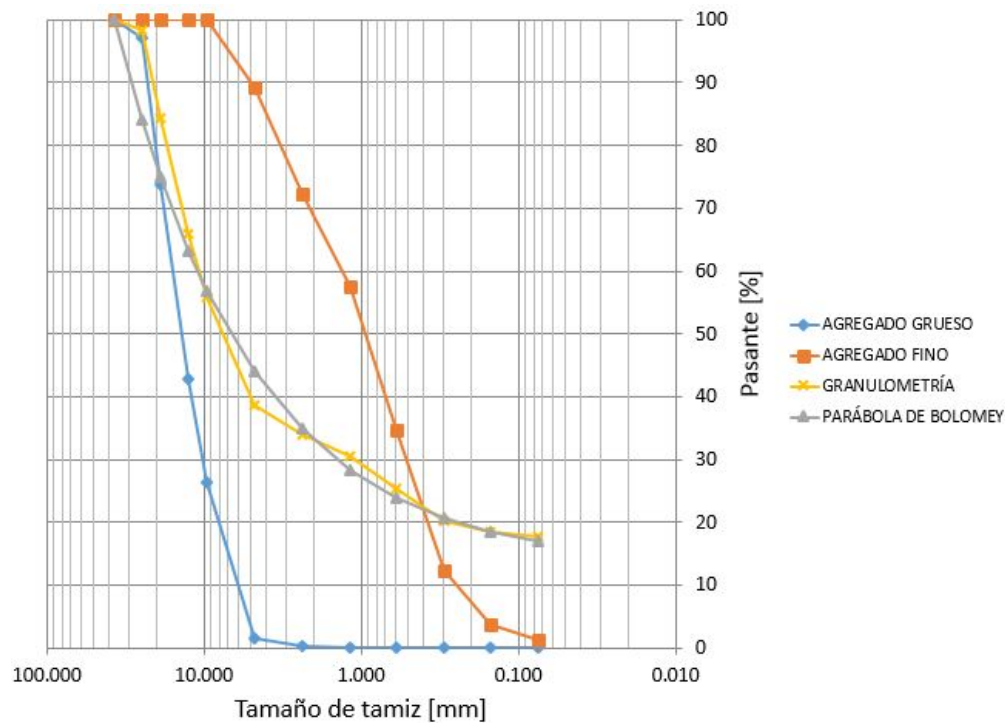


Figura 3.6: Granulometría

3.2.5. Diseño de mezcla

Luego de realizar la caracterización de los agregados, se continuó con el diseño de mezcla, para este, los componentes base que se tuvieron en cuenta fueron: agua, cemento, agregado fino, agregado grueso y superplastificante, teniendo en cuenta las siguientes características:

Relación agua/cemento

La dosificación del concreto debe cumplir con las mayores restricciones para prevenir su deterioro por daños ambientales, por lo que se debe evaluar la resistencia por durabilidad y la resistencia a compresión de diseño, se debe diseñar con la más crítica de las dos. Con respecto a la resistencia por durabilidad, se deben tener en cuenta los parámetros especificados por la NSR (2010), en cuanto a la resistencia de diseño y la relación agua/cemento, se determinan según la ACI 211.

Agregado grueso

Según la NSR (2010), se debe tener en cuenta la separación entre los aceros de refuerzo, dependiendo del tamaño máximo del agregado.

Trabajabilidad

Según la ACI 211, el asentamiento se determina con respecto al tipo de construcción en donde se va a emplear.

Contenido de agua

Para determinar la reducción del volumen de agua con respecto a la forma de los agregados y la corrección de agua según el tamaño máximo del agregado, se debe tener en cuenta el procedimiento descrito por la ACI 211

Aditivos

El aditivo utilizado en la mezcla es superplastificante y cumple la función de reductor de agua aportando manejabilidad al concreto sin disminuir su resistencia, lo que hace necesario la reducción del contenido de agua con respecto a los pesos iniciales, en el diseño.

Agregado fino

La dosificación de los agregados finos se realizó por el método de volumen absoluto teniendo en cuenta 1 m^3 como volumen total de la mezcla.

Correcciones por humedad

Las correcciones de humedad realizadas, fueron por humedad y absorción de los agregados, y por el aditivo reductor de agua que fue utilizado como agente dispersante en la mezcla.

Procedimiento de mezclado Se realizó la dispersión de NCC con superplastificante y agua, como se presentó en la sección de dispersión. Luego esta solución se llevó a la mezcladora adicionando la cantidad faltante de superplastificante, adicionando inicialmente el cemento para incentivar la interacción entre los NCC y los componentes químicos del cemento. Finalmente, se adicionaron los agregados finos y posteriormente los gruesos.

Para el diseño de mezcla, el asentamiento seleccionado fue de 7.5 cm, el mínimo porcentaje de adición del superplastificante usado se utilizó en una dosis de 0.3 % sobre el peso del cemento, la densidad del cemento utilizado fue de 2970 kg/m^3 y del aditivo 1040 kg/m^3 . Obteniendo las cantidades de mezcla para 1 m^3 que se observan en la Tabla 3.10. Se realizaron cuatro (4) mezclas (todas tenían adición del superplastificante), con las adiciones respecto al peso del cemento las cuales fueron de 0 %, 0.05 %, 0.10 % y 0.15 %.

Tabla 3.10: Diseño de mezcla

Material	Valor
Agregado grueso	868.30 kg
Agregado fino	496.82 kg
Cemento	434.88 kg
Agua	192.92 kg
Super-plastificante	68.36 g
NCC para adición de 0.05 %	17.09 g
NCC para adición de 0.10 %	34.18 g
NCC para adición de 0.15 %	51.27 g

3.2.6. Ensayos en estado fresco



(a) Ensayo de contenido de aire

(b) Ensayo de asentamiento

Figura 3.7: Ensayos en estado fresco

Contenido de aire

La prueba de contenido de aire se realizó mediante el método de presión especificado en la norma NTC 1032 (2010), que consiste en introducir la mezcla en un recipiente hermético, el cual después de ser sellado se presuriza, posteriormente se libera la presión y se registra directamente el contenido de aire en la mezcla Figura 3.7(a).

Asentamiento

Para medir la manejabilidad se realizó el ensayo de asentamiento bajo la norma NTC 396 (2010), la cual en realidad no es una medida directa de la manejabilidad, pero puede ser

relacionada con la trabajabilidad del concreto. El ensayo consiste en moldear y compactar la mezcla dentro de un cono, para posteriormente ser retirado y medir el asentamiento de la mezcla con respecto al cono, como se muestra en la Figura 3.7(b).

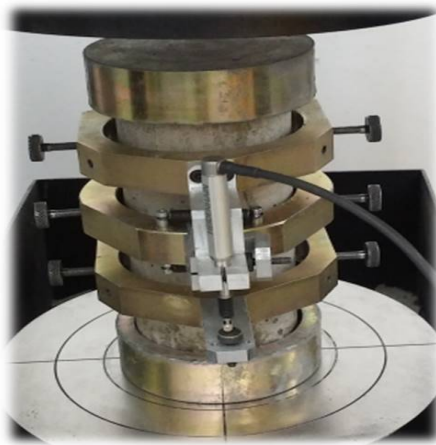
3.2.7. Ensayos en estado endurecido



(a) Cilindro luego del ensayo de resistencia a la compresión



(b) Ensayo de resistencia a la flexión



(c) Ensayo de módulo de elasticidad estático



(d) Ensayo de permeabilidad en concreto

Figura 3.8: Ensayos en estado endurecido

Debido a que se tenía limitación en la producción de NCC en cuanto a tiempo y costos, se realizaron tres (3) probetas por porcentaje de adición para la mayoría de ensayos en estado endurecido, como se observa en la Tabla 3.11

Tabla 3.11: Especímenes realizados de concreto

Ensayo	Tipo espécimen	No. especímenes por relación	No. especímenes totales
Resistencia a la compresión	Cilindros	3	12
Resistencia a la flexión	Vigas	3	12
Módulo de elasticidad estático	Cilindros	3	12
Módulo de elasticidad dinámico	Vigas	1	4
Fatiga	Vigas	9	36

Los ensayos en estado endurecido se realizaron fueron los siguientes:

- Resistencia a la compresión: El ensayo de resistencia a la compresión de cilindros de concreto, se realizó según la NTC 673 (2010), el cual consiste en aplicar una carga axial de compresión a una velocidad constante, hasta que el espécimen llegue a la falla. Esta se calcula dividiendo la carga máxima soportada en el ensayo, entre la sección transversal del área de cada espécimen, Figura 3.8(a). Para que la carga se repartiera uniformemente por toda el área, se colocaron bases con neopreno en las caras paralelas de los cilindros.
- Módulo de rotura: El ensayo de resistencia a la flexión en vigas de concreto se realizó siguiendo la NTC 2871 (2010), el cual consiste en aplicar una carga constante en los tercios medios de la viga, hasta que la misma llegue a la falla. El esfuerzo máximo soportado por el espécimen se denomina módulo rotura y se calcula con la Ecuación 3.7, Figura 3.8(b).

$$R = \frac{P * l}{b * d^2} \quad (3.7)$$

En donde R es el módulo de rotura de la viga, P es la carga aplicada, l es la luz entre apoyos, b es la base y d es la altura o espesor de la viga.

Otra forma para determinar el módulo de rotura del concreto es el presentado en la Ecuación 3.8

$$\sigma = \left(\frac{M * y}{I} \right) * 100 \quad (3.8)$$

En donde σ es el módulo de rotura, M es el momento flector en el tercio medio, y es la distancia del eje neutro a la fibra más alejada e I es momento de inercia de la sección transversal.

- Módulo de elasticidad estático: El ensayo en cilindros de concreto para determinar el módulo de elasticidad estático se desarrolló según la NTC 4025 (2010), en probetas de dimensiones de 10 cm de diámetro por 20 cm de alto, sometidas a una carga axial de compresión, esto se realiza en una máquina que somete la probeta a esfuerzos de compresión con una velocidad constante por medio de dos prensas, mientras que está instrumentada con un LVDT (transformador diferencial variable lineal), el cual es un dispositivo de sensado de posición que provee un voltaje de salida, proporcional al desplazamiento. El cual mide la deformación unitaria mientras que la máquina de ensayo registra el esfuerzo de compresión para las diferentes deformaciones, obteniendo así, una curva esfuerzo-deformación unitaria, que en la zona elástica, su pendiente representa el módulo de Young o módulo de elasticidad, Figura 3.8(c). Debido a que el módulo de elasticidad es la pendiente de la parte elástica en la curva esfuerzo vs deformación unitaria, esta se calcula con las últimas pendientes positivas de la curva.

- Módulo de elasticidad dinámico y fatiga: Para determinar estas dos características se utilizó la metodología planteada en Jameson and Howard (2012).

Los ensayos de módulo de elasticidad dinámicos por flexión, se realizaron en la MTS 793 (con capacidad de carga de 100 kN). Se aplicaron ciclos de cargas con picos de hasta el 35 % de la resistencia a la flexión, sobre especímenes prismáticos de 10 cm x 10 cm x 35 cm, en los tercios medios de las vigas. Se aplicaron 100 pulsos de un segundo de duración, incluyendo la aplicación de pulsos de 250 ms de carga cíclica teniendo en cuenta un tiempo de descanso de 750 ms entre pulsos de aplicación de carga Figura 3.8(b), el módulo de elasticidad dinámico se determina de la misma forma que el estático, a diferencia que la pendiente tomada en cuenta es la correspondiente a los últimos cinco ciclos de carga. El esfuerzo se determina de la misma forma que el módulo de rotura, ya que la cara se aplica a los tercios medios de la viga.

Debido a que el concreto fabricado es para uso en pavimento rígido, se realizaron pruebas de fatiga para evaluar este comportamiento en los concretos adicionados. Se realizó la toma de esfuerzos al 100 % (que corresponde al módulo de rotura de la mezcla), 85 %, 75 % y 65 % del esfuerzo máximo soportado para las mezclas. Las vigas fueron sometidas a un modo de carga cíclica por esfuerzo controlado, aplicado en los tercios de la luz a una frecuencia de 8 Hz, hasta que los especímenes llegaron a la falla. Con cada porcentaje de esfuerzo último, se realizaron tres ensayos y así poder construir las curvas de fatiga por porcentaje de adición, este ensayo al igual que el módulo de rotura y el módulo elástico dinámico se realizó en la MTS.

En los análisis de fatiga, se tuvo en cuenta la pendiente de cada curva, al igual que su esfuerzo soportado al millón de ciclos, y se realizó un análisis estadístico por medio de la función de distribución de probabilidad de Weibull para porcentajes con confiabilidades

de 50 %, 80 % y 90 %.

3.2.8. Ensayos de análisis

Con el proposito de evaluar la interacción entre los NCC y la matriz cementante en su estado endurecido se realizaron ensayos de análisis para verificar los resultados obtenidos, los cuales se explican a continuación.

Análisis SEM

Para evaluar esta interacción en escala microscópica, se tomaron micrografías de diversas muestras en el microscopio electrónico de barrido (SEM), el cual proporciona información sobre la microestructura, morfología y composición química para muestras de sólidos a una escala microscópica. La técnica de SEM, consiste en enfocar sobre la muestra electrodensa (opaca a los electrones), un fino haz de electrones acelerado que se desplaza sobre la superficie de la muestra realizando un barrido. La variación morfológica de la muestra, entrega diversas señales que son recogidas por distintos detectores, permitiendo así la observación, caracterización y microanálisis superficial de materiales.

Permeabilidad

Este ensayo se realizó según la NTC 4483 (2010), y consiste en aplicar una presión de agua de 500 KPa durante 72 horas, para posteriormente romper la probeta a la mitad perpendicularmente a la cara en la que se aplicó la presión de agua, tal que se pueda medir la profundidad de penetración del agua Figura 3.8(d).

Capítulo 4

Resultados

4.1. Primera etapa: Mortero

4.1.1. Procedimiento de dispersión

La metodología de dispersión de los NCC en el medio acuoso no fue la óptima como se detalla en la Figura 4.1, ya que después del proceso de sonicado, la gran mayoría de los NCC quedaron sedimentados en el vaso de precipitado. Como se ha mencionado anteriormente, es necesario aclarar que los NCC son de carácter hidrófobo y al tener contacto con la pasta de mortero expulsarían el agua necesaria para la hidratación del cemento, por lo que al aumentar el tiempo de sonicado se podría mejorar la distribución de las partículas en el medio, pero también podría producir deterioro en la superficie de los NCC, alterando así sus propiedades mecánicas (Mendoza et al., 2014). Por lo anterior, es importante usar otro método de dispersión para usar en el concreto.



Figura 4.1: Vaso de precipitados después de vertida la solución en la mezcla *Fuente: Elaboración propia*

4.1.2. Ensayo en estado fresco

En el ensayo de fluidez se obtuvieron los resultados presentados en la Figura 4.2, y los cambios porcentuales de las mezclas de las diferentes relaciones molares Cu/Ni con respecto a la muestra control, se presentan en la Tabla 4.1. Con los resultados obtenidos se puede observar para todas las relaciones molares Cu/Ni, que la fluidez disminuyó, pero igual cumple con la fluidez escogida en el diseño de mezcla para un concreto de consistencia media, que está en un rango entre 100 % y 120 %, lo cual podría verse reflejado en las resistencias finales del mortero. Por otra parte se observó que los NCC comenzaban a migrar hacia la superficie como se puede observar en la Figura 4.3.

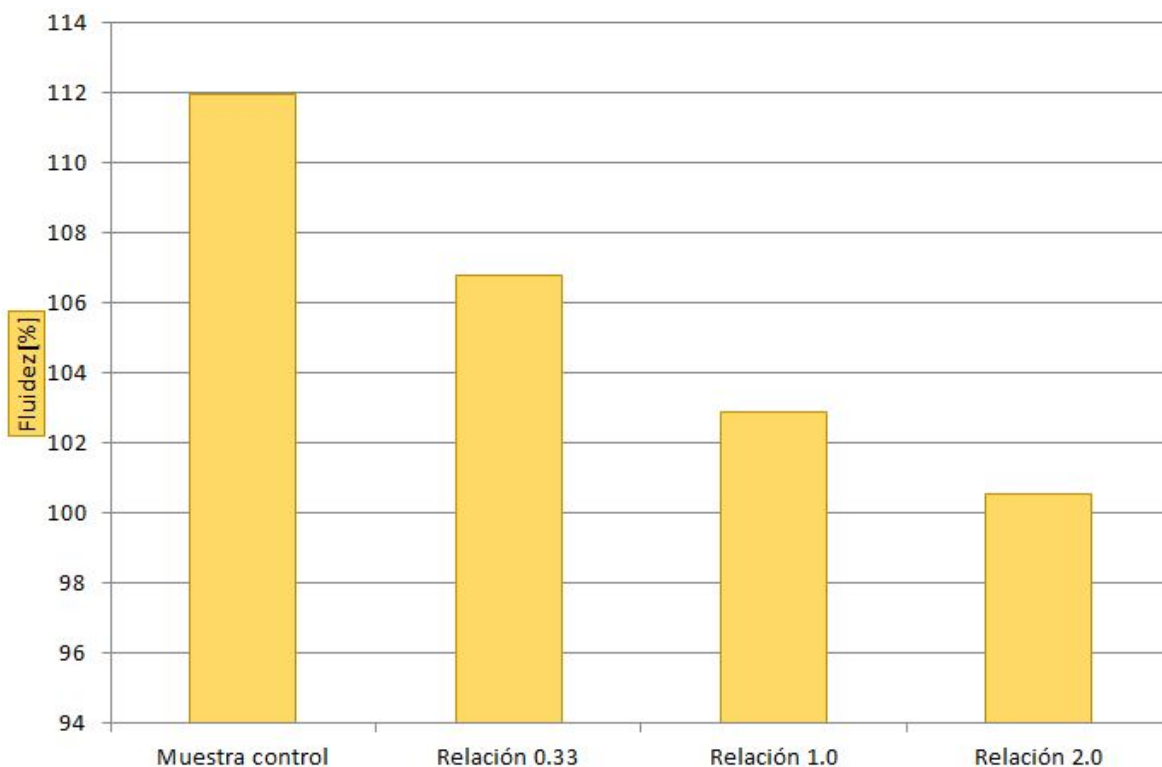


Figura 4.2: Fluidez del mortero

Tabla 4.1: Porcentaje de cambio de la fluidez en mortero

Muestra	Muestra control	Cu/Ni		
		0.33	1.0	2.0
Cambio [%]	0.00	-2.5	-4.49	-5.68



Figura 4.3: Ensayo de fluidez en mortero

4.1.3. Ensayos en estado endurecido

Los resultados obtenidos en los primeros ensayos de resistencia a compresión y flexión en mortero, se observan en la Figura 4.4

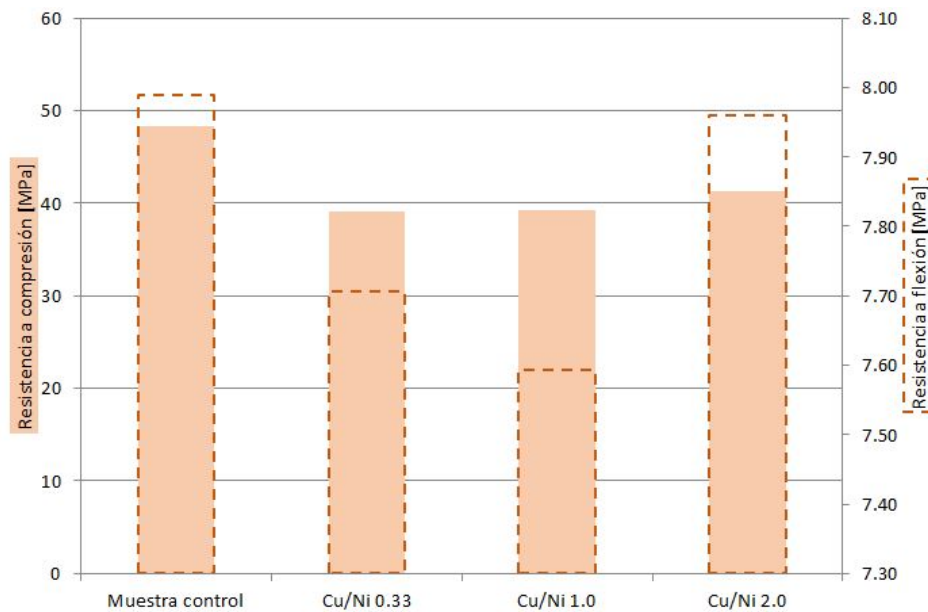


Figura 4.4: Resistencia a compresión y flexión de mortero

Tabla 4.2: Porcentaje de cambio y C.V. de resistencias de mortero

Muestra		Muestra control	Cu/Ni 0.33	Cu/Ni 1.0	Cu/Ni 2.0
Resistencia a compresión	Cambio [%]	0.00	-18.9	-18.8	-14.4
	Coefficiente variación [%]	4.07	5.28	3.26	2.40
Resistencia a flexión	Cambio [%]	0.00	-3.5	-5.0	-0.4
	Coefficiente variación [%]	9.95	5.81	1.48	2.40

Para los valores obtenidos de las resistencias, los porcentajes de cambio de las muestras adicionadas con las diferentes relaciones molares Cu/Ni, con respecto a la muestra control y sus respectivos coeficientes de variación se presentan en la Tabla 4.2. Teniendo en cuenta los resultados reportados, se encontró que la muestra con relación molar Cu/Ni de 2.0 presentó el mejor comportamiento entre las adicionadas, por lo que fue escogida para continuar el estudio en concreto, se debe aclarar que esta relación produce los NCC más cortos de las tres (3) relaciones. Igualmente de esta primera etapa se encontró que se debía realizar una mejor dispersión de los NCC en el medio acuoso.

Strano et al. (2003), en su investigación encontró que los NCC con mayores longitudes tienden a reaglomerarse luego del proceso de dispersión, resultado que está acorde con la presente investigación y corrobora los resultados obtenidos, ya que los NCC más largos son de relación molar de 0.33 y los más cortos son los escogidos de 2.0.

4.2. Segunda etapa: Concreto

4.2.1. Selección del policarboxilato

Para el estudio se contaba con 2 tipos de superplastificante, dentro de los cuales se buscaba encontrar el que mejor permitiera la dispersión de los NCC en la solución acuosa, lo que permitiría una mayor interacción de esta con la matriz cementante. Por lo que originalmente se monitoreó la dispersión de manera cualitativa, mediante inspección visual como se observa en la Figura 4.5, en donde se notó que la solución que contenía el SP1, presentó una sedimentación de las partículas en el fondo del recipiente, mientras que con el SP2 se logró mantener las partículas suspendidas en la solución, resultado que indicaba que el uso del SP2 era el más adecuado. En paralelo a la inspección visual se realizó un ensayo de turbidez, seguido de un ensayo de barrido espectral en el ultravioleta-visible, los cuales se van a explicar a continuación.

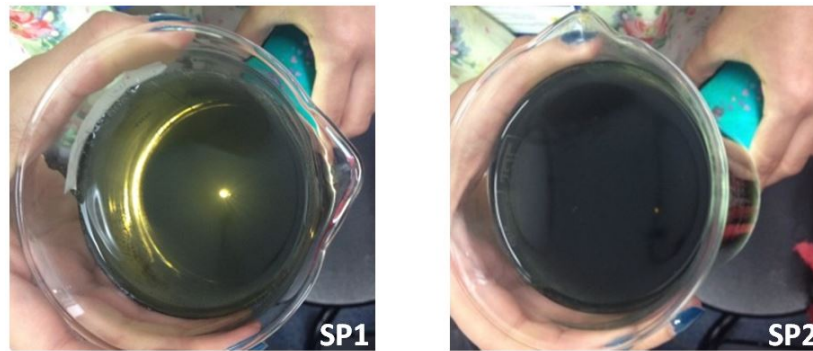


Figura 4.5: Inspección visual de soluciones con ambos aditivos superplastificantes luego de 15 días *Fuente: Elaboración propia*

4.2.1.1. Ensayo de turbidez

El ensayo de turbidez se desarrolló durante 15 días para verificar la efectividad de los procesos de dispersión, en donde el SP1 presentaba una mayor turbidez, resultado que era inconsistente con la inspección visual, Figura 4.6.

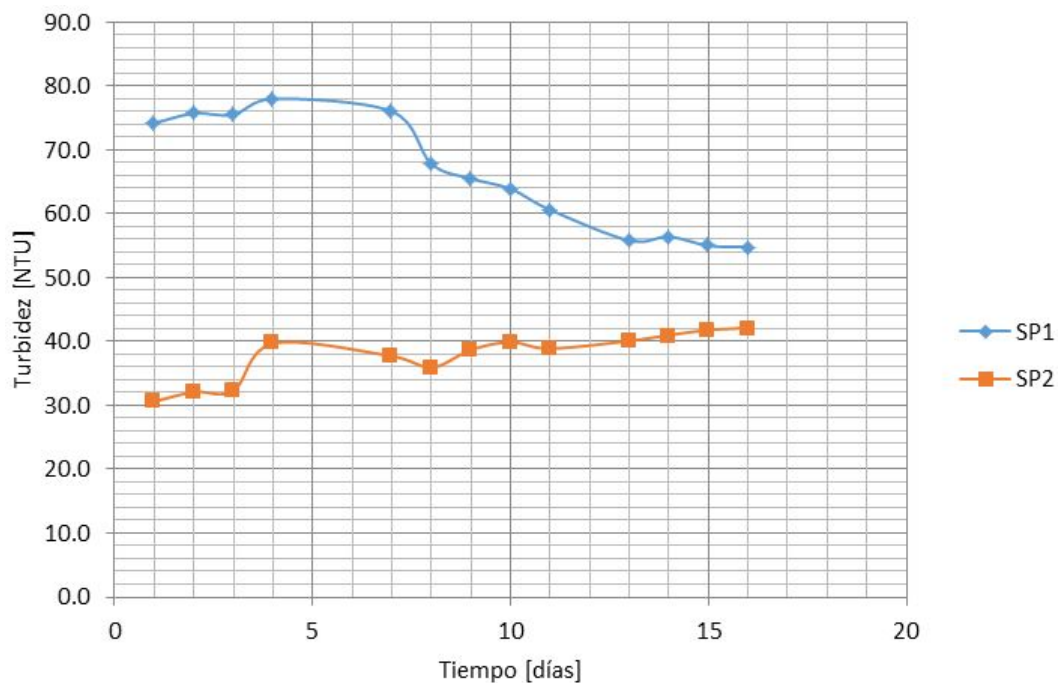


Figura 4.6: Variación de la turbidez luego de 15 días

El problema al utilizar este método como parámetro para evaluar la dispersión, es que probablemente las partículas aglomeradas son las que dispersan la luz, probocando resultados

no confiables.

4.2.1.2. Ensayo de barrido espectral UV-VIS

Debido a que los resultados obtenidos con el ensayo de turbidez no concordaban con la inspección visual, se realizó un ensayo de barrido espectral en el rango UV-visible, para determinar con certeza del surfactante mas efectivo, los resultados obtenidos con este ensayo se presentan en la Figura 4.7. La solución realizada con el SP2 presentó en todo el rango espectral medido una mayor absorbancia, demostrando que este superplastificante logra mantener mejor distribuidas (o suspendidas) las partículas en la solución.

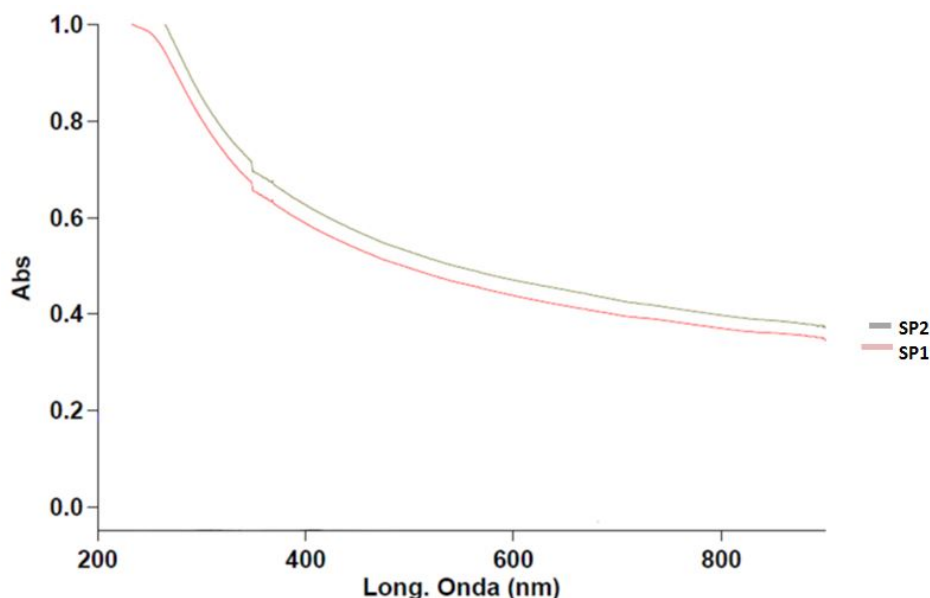


Figura 4.7: Absorbancia de las partículas en el rango ultravioleta-visible

4.2.2. Ensayos en estado fresco

En los ensayos de manejabilidad y contenido de vacíos se encontraron los resultados registrados en la Figura 4.8, en donde se puede observar que a medida que aumenta el porcentaje de adición de NCC, la manejabilidad disminuye pero la relación de vacíos de la mezcla aumenta, esto debido a que los NCC tienen propiedades hidrófobas lo que genera la expulsión de agua cuando se presentan mayores asentamientos. En la Tabla 4.3 se observan los porcentajes de cambio de las muestras adicionadas con respecto a la mezcla control, en donde los datos de contenido de vacíos tienen una variación menor a los datos de asentamiento.

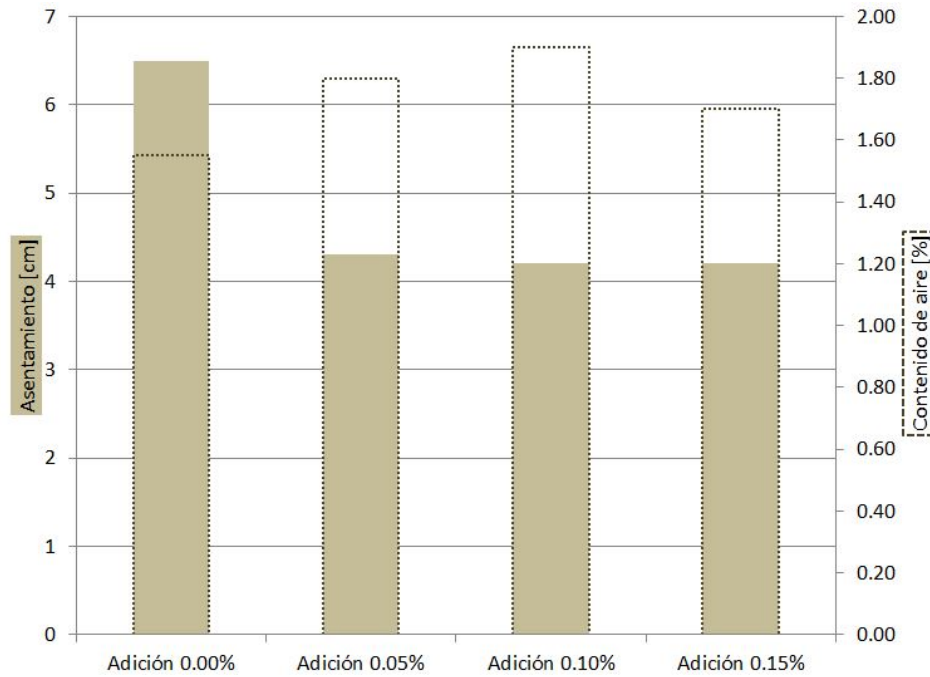


Figura 4.8: Contenido de vacíos y Asentamiento

Tabla 4.3: Porcentaje de cambio del Contenido de vacíos y Asentamiento

Muestra	Adición 0.05 %	Adición 0.10 %	Adición 0.15 %
Variación Contenido de vacíos [%]	16.13	22.58	9.68
Variación Asentamiento [%]	-33.85	-35.38	-35.38

4.2.3. Ensayos en estado endurecido

En los ensayos de resistencia a la compresión en cilindros y resistencia a la flexión o módulo de rotura en vigas, que se observan en la Figura 4.9, se tiene que para las dos resistencias, al aumentar el porcentaje de adición, los resultados no tenían una tendencia clara. En cuanto el ensayo de resistencia a la compresión, las adiciones que mejor comportamiento tuvieron fueron las mayores, que corresponden a las adiciones de 0.10 % y 0.15 % con respecto al peso de cemento. En el ensayo de resistencia a la flexión, el único porcentaje de adición con el que se obtuvieron mejoras con respecto a la muestra control, fue la adición con 0.15 %. Para observar el coeficiente de variación y el porcentaje de cambio con respecto a la muestra control, se presenta la Tabla 4.4. Adicionalmente es importante resaltar que la mezcla con adición de 0.05 % en los dos ensayos, presentó los mayores coeficientes de variación de los datos.

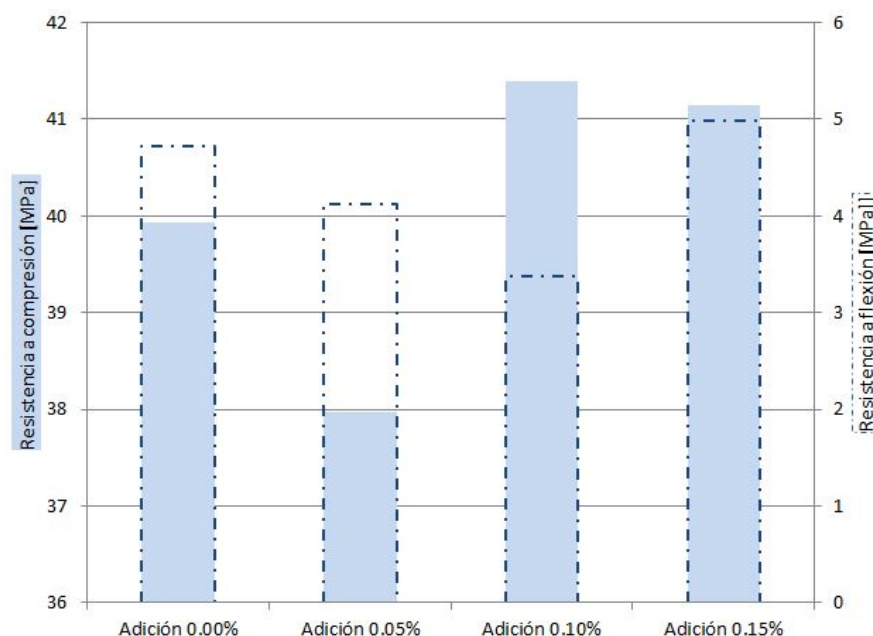


Figura 4.9: Resistencia a la compresión y a la flexión

Tabla 4.4: Porcentaje de cambio y C.V de Resistencia a la compresión y a la flexión

Muestra		Adición 0.00 %	Adición 0.05 %	Adición 0.10 %	Adición 0.15 %
Resistencia a compresión	Cambio[%]	0.00	-4.91	3.64	3.03
	Coefficiente Variación [%]	3.86	13.15	4.43	3.25
Resistencia a flexión	Cambio[%]	0.00	-12.87	-28.54	5.58
	Coefficiente Variación [%]	8.08	10.35	9.18	5.76

Los resultados obtenidos en el ensayo de módulo de elasticidad estático en cilindros de concreto, se presentan en la Figura 4.10, sus respectivos coeficientes de variación y cambio con respecto a la muestra control se presentan en la Tabla 4.5. Se observa que con los mayores porcentajes de adición de NCC, el módulo estático aumenta por lo que el concreto se está rigidizando, hay que tener en cuenta que el coeficiente de variación de la muestras con adición de 0.05 % indica la mayor dispersión de los datos.

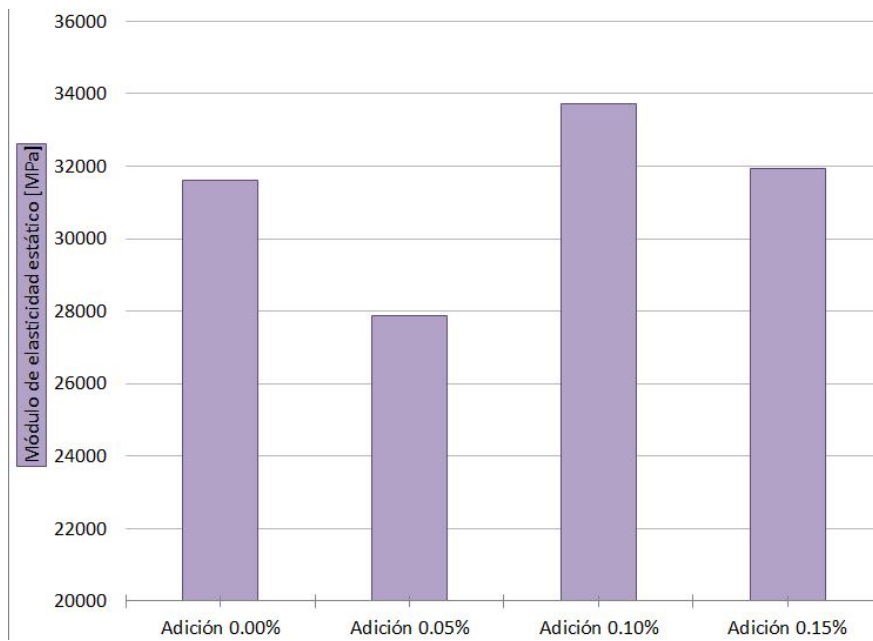


Figura 4.10: Módulo de elasticidad estático

Tabla 4.5: Porcentaje de cambio y C.V. del Módulo de elasticidad estático

Muestra	Adición 0.00 %	Adición 0.05 %	Adición 0.10 %	Adición 0.15 %
Cambio[%]	0.00	-11.83	6.69	1.082
Coefficiente Variación [%]	0.49	9.22	3.31	3.71

Los resultados obtenidos en el ensayo de módulo de elasticidad dinámico en vigas de concreto, se presentan en la Figura 4.11. En donde se presenta una misma tendencia del módulo elástico estático, que en los mayores porcentajes de adición de NCC, el módulo dinámico aumenta por lo cual el concreto está aumentado su rigidez.

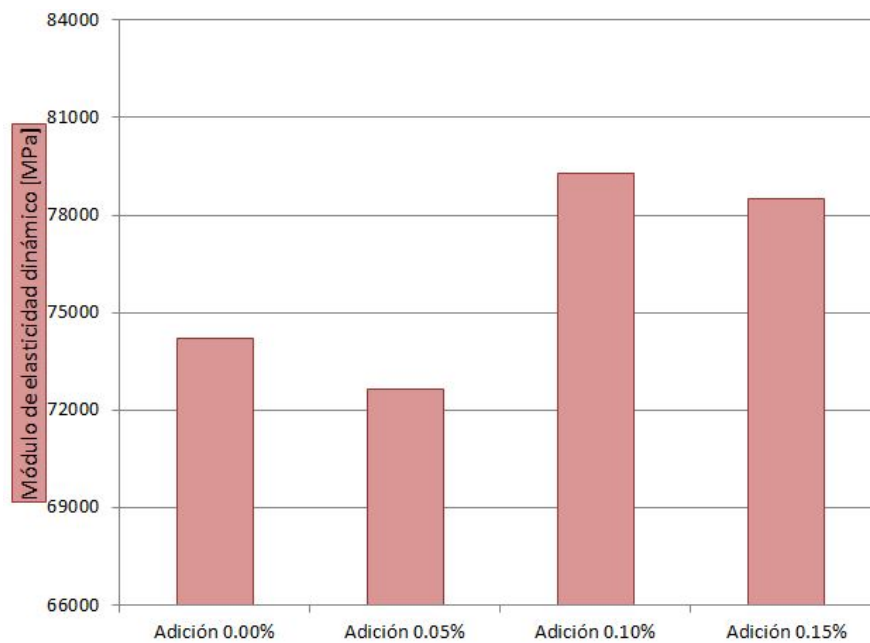


Figura 4.11: Módulo de elasticidad dinámico

En las Figuras 4.12, 4.13, 4.14 y 4.15, se presentan los resultados de los ensayos de fatiga realizados y en las Tablas 4.6, 4.7, 4.8 y 4.9, se presentan sus correspondientes coeficientes de variación, en donde se observa que la mezcla control y de relación de 0.10 % son las que menor dispersión de datos tuvieron, y que la mmezclas con adición de 0.05 % y 0.15 % son las que mayor dispersión de datos presentan.

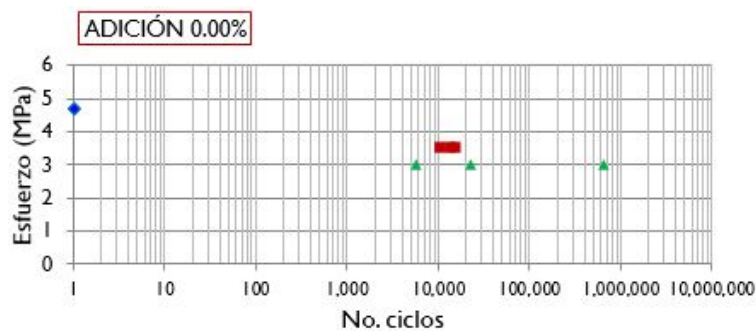


Figura 4.12: Ensayos de fatiga con adición de 0.0 %

Tabla 4.6: Datos y C.V. de ensayos de fatiga con adición de 0.0 %

Muestra	Esfuerzo[%]	Esfuerzo[MPa]	Coefficiente variación[%]
Adición 0.00 %	100	4.72	
	75	3.54	19.80
	65	3.07	162.27

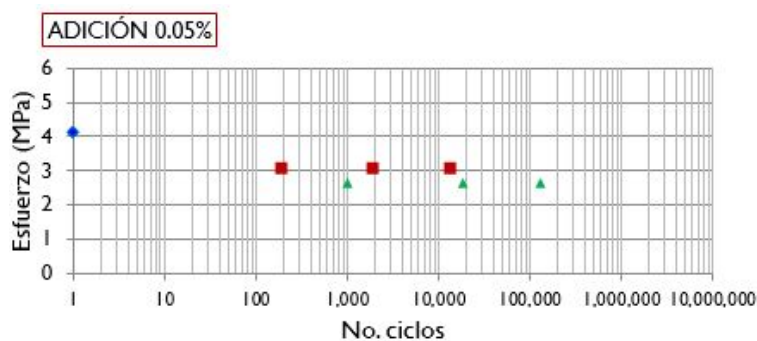


Figura 4.13: Ensayos de fatiga con adición de 0.05 %

Tabla 4.7: Datos y C.V. de ensayos de fatiga con adición de 0.05 %

Muestra	Esfuerzo[%]	Esfuerzo[MPa]	Coefficiente variación[%]
Adición 0.05 %	100	4.12	
	75	3.09	139.14
	65	2.68	140.89

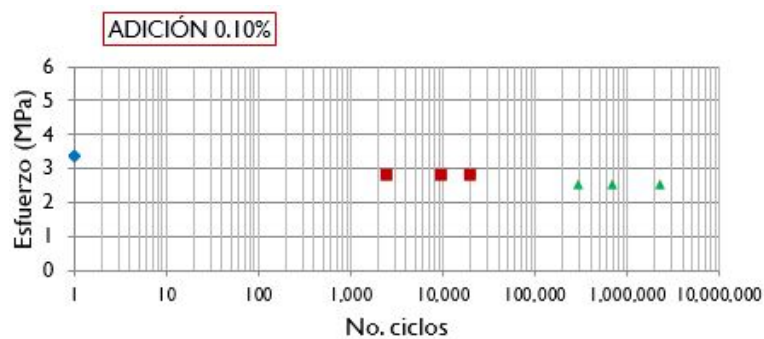


Figura 4.14: Ensayos de fatiga con adición de 0.10 %

Tabla 4.8: Datos y C.V. de ensayos de fatiga con adición de 0.10 %

Muestra	Esfuerzo[%]	Esfuerzo[MPa]	Coefficiente variación[%]
Adición 0.10 %	100	3.38	
	85	2.87	82.09
	75	2.53	95.79

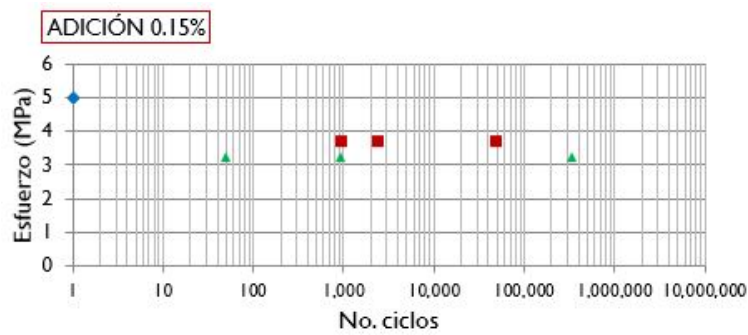


Figura 4.15: Ensayos de fatiga con adición de 0.15 %

Tabla 4.9: Datos y C.V. de ensayos de fatiga con adición de 0.15 %

Muestra	Esfuerzo[%]	Esfuerzo[MPa]	Coefficiente variación[%]
Adición 0.15 %	100	4.99	
	75	3.74	156.80
	65	3.24	172.45

Para complementar el análisis de los ensayos de fatiga y debido a que los datos presentan gran dispersión por la heterogeneidad del material, se realizaron los cálculos de las leyes de fatiga según la función de distribución de probabilidad de Weibull, las cuales se compararon con datos del documento de Rodríguez Villareal (2013) y se observan en las Figuras 4.16, 4.17 y 4.18, las variables y valores de estas leyes de fatiga se presentan en la Tabla 4.10.

Tabla 4.10: Parámetros de Weibull

Muestra	Esfuerzo de rotura[MPa]	β	η	$t(R50\%)$	$t(R80\%)$	$t(R90\%)$
Adición 0.00 %	4.72			1	1	1
	3.54	7.15	14037.79	13337	11383	10249
	3.07	0.74	188957.30	114993	24754	8954
Adición 0.05 %	4.12			1	1	1
	3.09	0.87	4710.94	3093	842	356
	2.68	0.86	46107.46	30102	8053	3364
Adición 0.10 %	3.38			1	1	1
	2.87	1.54	11523.19	9083	4352	2674
	2.53	1.30	1159803.01	875611	367117	206473
Adición 0.15 %	4.99			1	1	1
	3.74	0.77	14633.33	9068	2064	775
	3.24	0.69	86130.01	50676	9828	3318

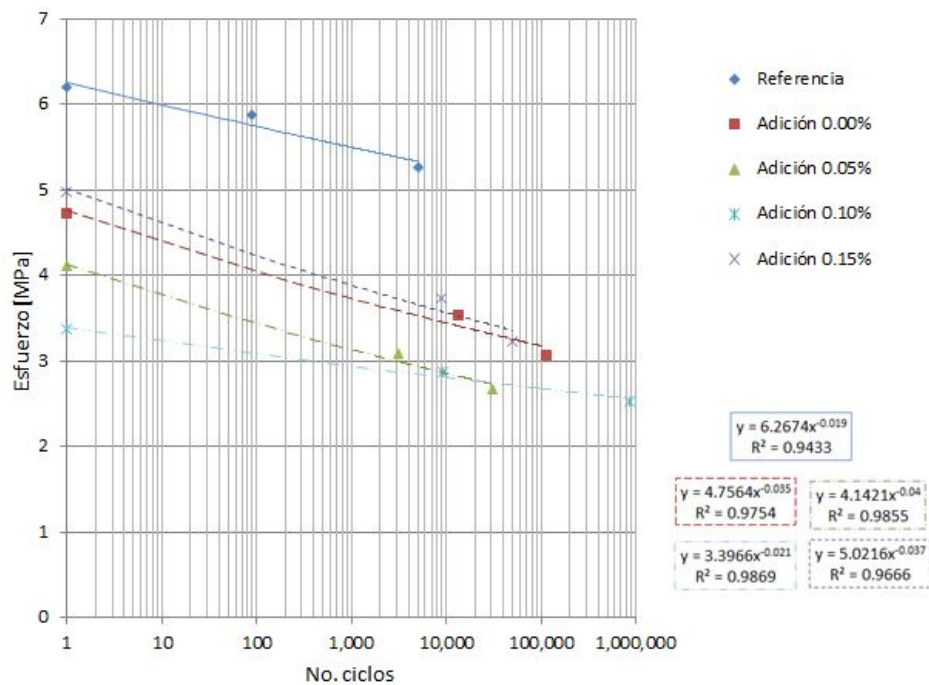


Figura 4.16: Leyes de fatiga con 50 % de confiabilidad

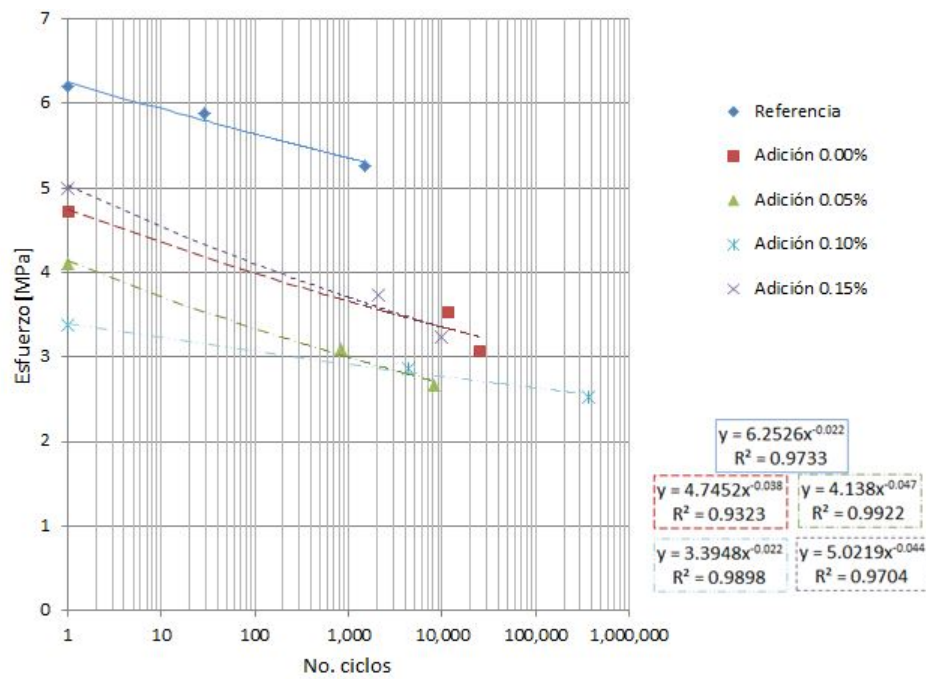


Figura 4.17: Leyes de fatiga con 80 % de confiabilidad

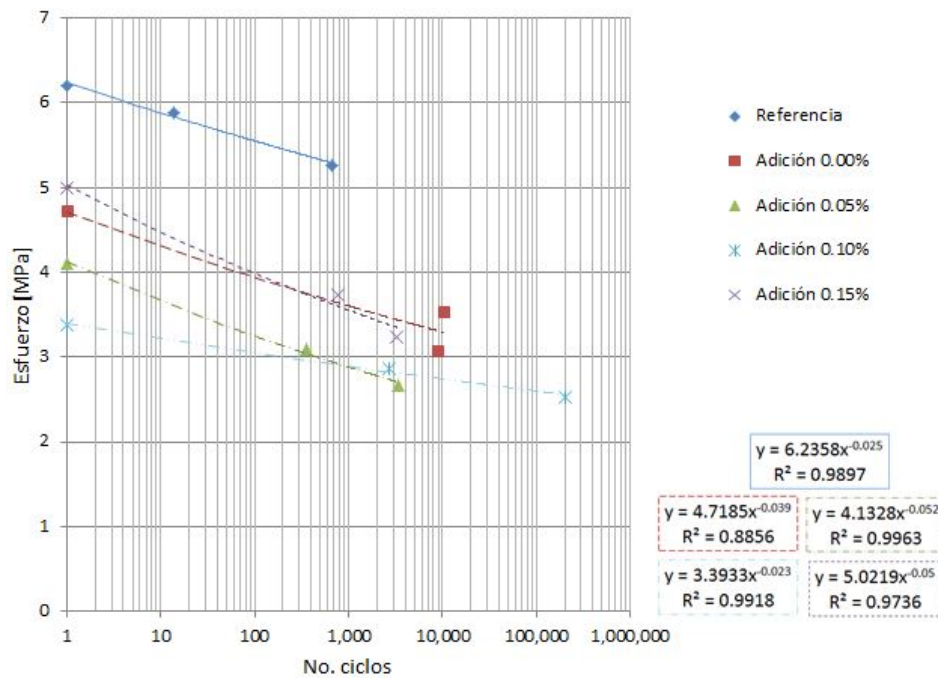


Figura 4.18: Leyes de fatiga con 90 % de confiabilidad

En todas las leyes de fatiga se puede observar que las pendientes de la mezcla control, adi-

ción de 0.05 % y adición de 0.15 % tienen una mayor pendiente que la adicionada con 0.10 %, esta última es la que tiene un mejor comportamiento ya que al llegar al millón de ciclos, va a resistir mayores esfuerzos en comparación a las otras mezclas. Igualmente, se puede observar que las leyes de fatiga correspondientes a la mezcla modificada con 0.10 %, presenta la pendiente más cercana a las reportadas por Rodríguez Villareal (2013), las cuales son típicas para pavimentos hidráulicos, con lo que se corrobora que la mezcla con adición de 0.10 % es la que mejor comportamiento ante fatiga presenta.

Capítulo 5

Discusión de resultados

5.0.1. Fatiga

Con las ecuaciones de las gráficas de fatiga con confiabilidad del 90 %, se determinaron los esfuerzos al millón de ciclos de las mezclas realizadas, y con el estado del arte, se compararon las pendientes y el esfuerzo al millón de ciclos de concretos hidráulicos convencionales reportados por Huang and Zhao (1995), Johnston and Zemp (1991), Shi et al. (1993) y Goel et al. (2012). En la Figura 5.1, se presentan estas comparaciones, en donde se observa que las pendientes de las curvas de las mezclas realizadas son menores a las reportadas por estos autores, pero el esfuerzo al millón de ciclos en todas las curvas está en alrededor de 3 MPa. Para la gráfica CH, significa concreto hidráulico.

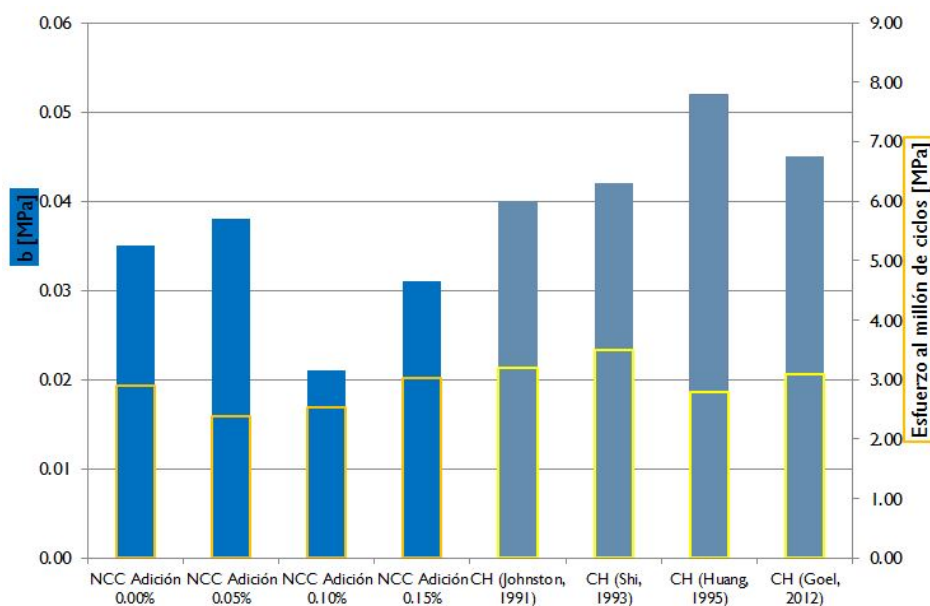


Figura 5.1: Comparación pendiente con esfuerzo al millón de ciclos

En la Figura 5.2 se compara el módulo de rotura con el esfuerzo al millón de ciclos, el concreto con mayor módulo de rotura y menor diferencia entre estos dos valores, representa un mejor comportamiento ante fatiga, ya que presenta una menor pendiente con un esfuerzo último mayor, por lo que el concreto soportaría mayores esfuerzos. Por lo que de las mezclas realizadas la adicionada con 0.10 % sería la de mejor comportamiento.

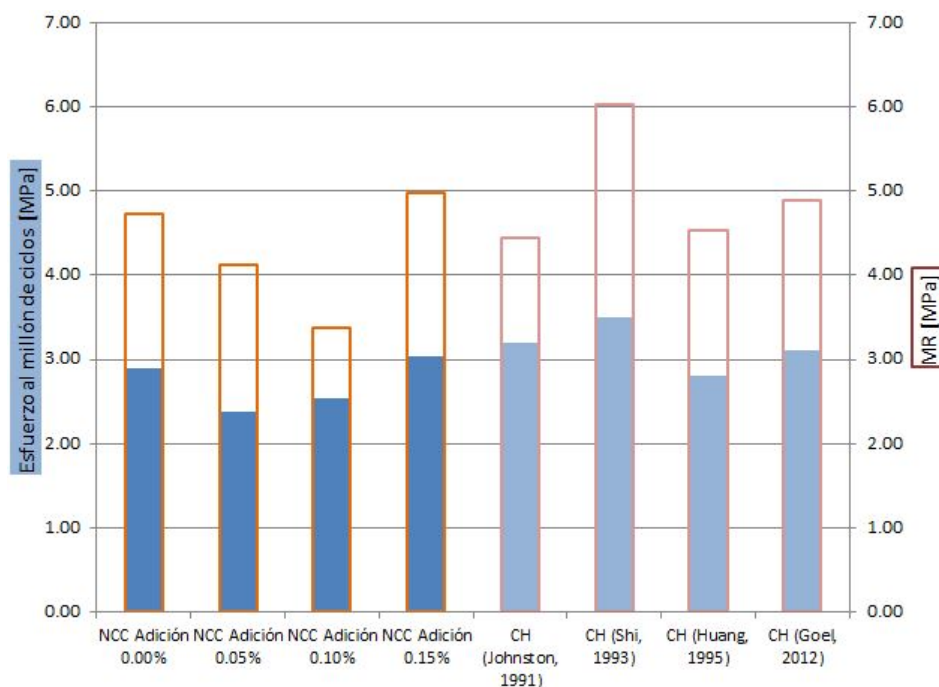


Figura 5.2: Comparación esfuerzo al millón de ciclos con módulo de rotura

5.0.2. Ensayos de análisis

5.0.2.1. Permeabilidad

Debido a que se conocía el contenido de aire de la muestra en estado fresco, se procedió a medir la permeabilidad en estado endurecido de los diferentes concretos fabricados, y los resultados obtenidos en este ensayo se presentan en la Figura 5.3, en donde el concreto más permeable y por ende menos durable es el adicionado con 0.10 %, el cual presenta el menor coeficiente de variación según la Tabla 5.1.

Al comparar los resultados de contenido de aire en estado fresco y permeabilidad en estado endurecido, se obtiene la Figura 5.4 en donde se presenta el mismo comportamiento de las muestras, y la adición de 0.10 % de NCC con respecto al peso del cemento es la mezcla más porosa.

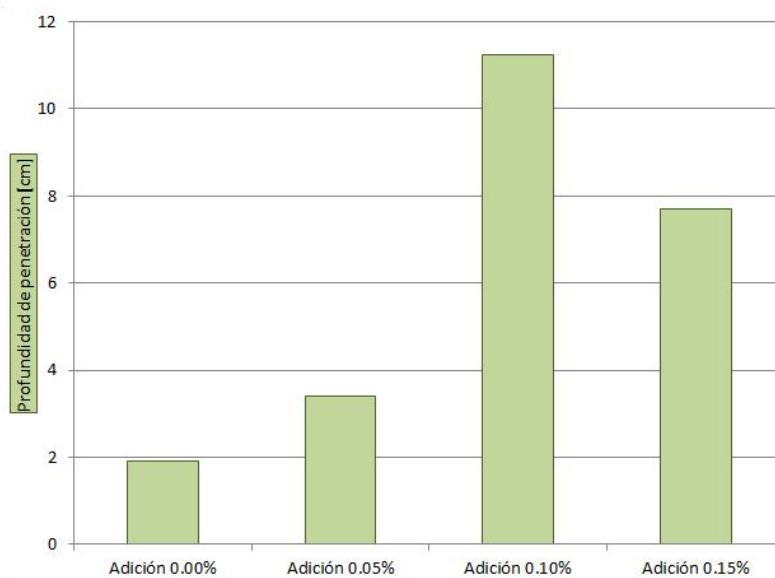


Figura 5.3: Ensayo de permeabilidad

Tabla 5.1: Porcentaje de cambio y C.V. de la permeabilidad del concreto

Muestra	Adición 0.00 %	Adición 0.05 %	Adición 0.10 %	Adición 0.15 %
Cambio[%]	0.00	44.12	83.11	75.32
Coefficiente Variación [%]	5.26	2.94	1.78	3.25

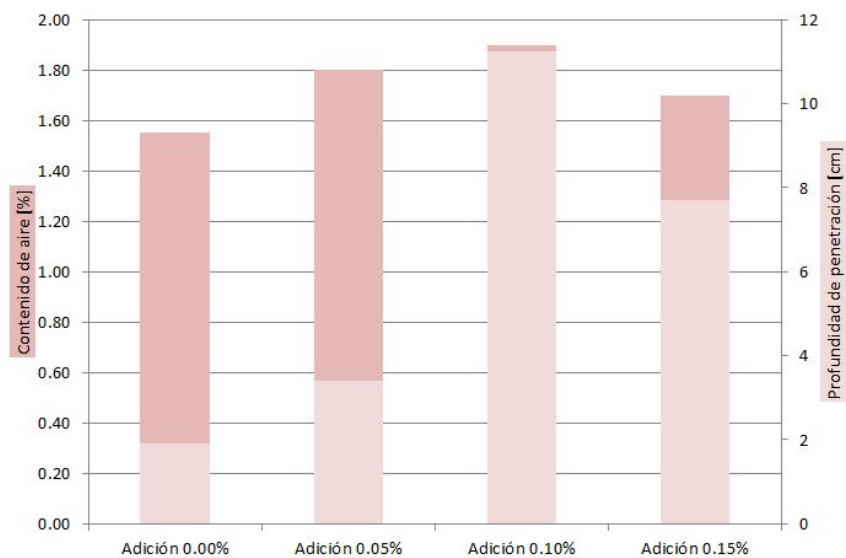


Figura 5.4: Contenido de aire y profundidad de penetración

5.0.2.2. Micrografías SEM

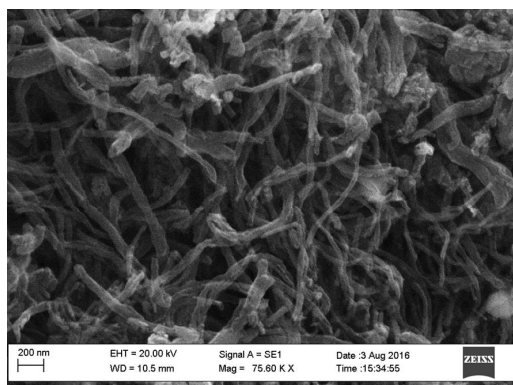
En la micrografía de la Figura 5.5(a), se observa que la morfología que presentan los NCC es de tipo rugoso y con presencia de gran cantidad de filamentos en forma desordenada tipo gusano. Todo lo contrario observado en la micrografía de la Figura 5.5(b) del concreto sin adición de NCC, en donde se observan series de capas superpuestas de forma más homogénea.

Cuando el concreto se encuentra en la etapa de fraguado en las primeras etapas de humectación, (Figura 5.5(c)) se presentan una serie de filamentos tubulares rectos que pertenecen a la formación de etringita.

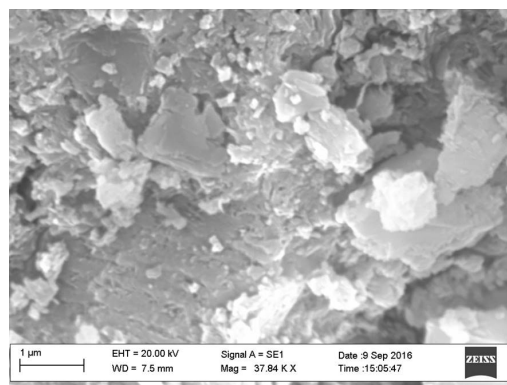
En las Figuras 5.5(d), 5.5(e) y 5.5(f), se puede observar el concreto después de 28 días de mezclado, con los diferentes porcentajes de adición, los cuales siguen presentando filamentos tubulares (etringita), que sólo debería presentarse en el momento de fraguado inicial. Esta presencia puede ser atribuida a la falta de hidratación necesaria en la primera etapa del concreto, debida principalmente a la baja dispersión de los NCC en la matriz cementante, generando la heterogeneidad de los valores obtenidos en los ensayos mecánicos realizados (coeficientes de variación altos). Igualmente se puede observar que el concreto sin adición presenta una matriz homogénea, contrario a los concretos modificados con NCC que constituyen matrices porosas posiblemente causada por la reaglomeración de los NCC, generando una mayor repulsión de agua, que según Mendoza et al. (2014) se presenta en las reacciones de hidratación, reduce la producción de S-C-H en el cemento y causa la disminución de las resistencias a flexión. Se podría pensar que los materiales al ser más largos, ayudarían a reforzar el material, reduciendo las grietas, pero al ser los NCC más largos, su grado de dispersión disminuye (Liew et al., 2016).

Los NCC presentan una fuerza de atracción de $500 \text{ eV}/\mu\text{m}$ entre ellos, esta fuerza es directamente proporcional a su longitud debido a que presentan una mayor área superficial y su dispersión es más complicada (Vaisman et al., 2006), lo cual concuerda con los resultados obtenidos en los morteros adicionados con NCC, debido a que los de menor longitud presentaron los mejores resultados en cuanto a resistencia a compresión y flexión.

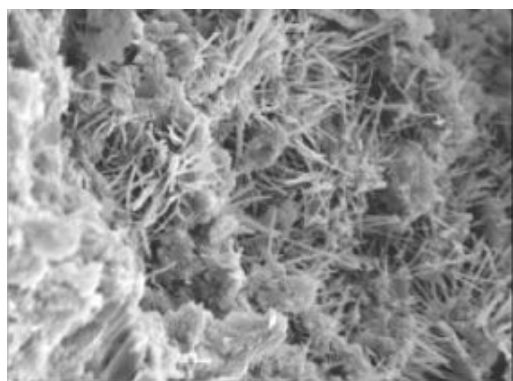
Estos resultados señalan lo fundamental e importante que es la correcta dispersión de los NCC en la matriz cementante, y motivan para continuar con la búsqueda de un método adecuado para esta dispersión de nanomateriales, en especial la selección de un buen dispersante.



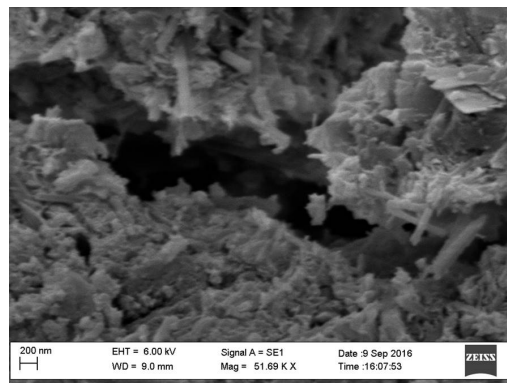
(a) Micrografía de nanocompuestos de carbono



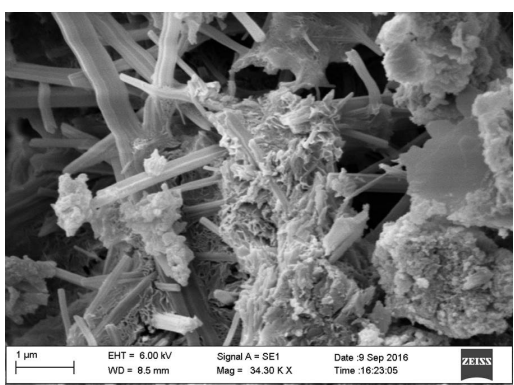
(b) Micrografía del concreto a 28 días sin adición de NCC



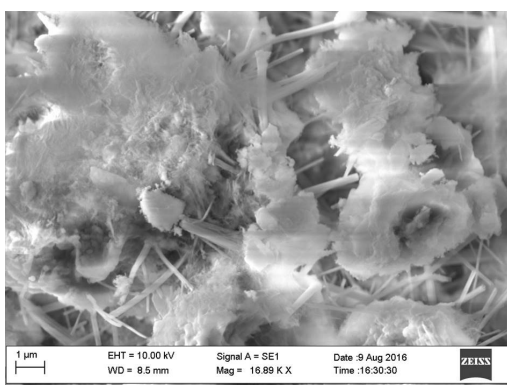
(c) Micrografía de concreto en etapa de fraguado



(d) Micrografía del concreto a 28 días con adición de 0.05 %



(e) Micrografía del concreto a 28 días con adición de 0.10 %



(f) Micrografía del concreto a 28 días con adición de 0.15 %

Figura 5.5: Micrografías NCC y Concreto

5.0.3. Interacción química de NCC con la matriz cementante

Guzman Suárez (2013) resalta, que la purificación de los NTC facilitan la interacción de los mismos con el agente dispersante, como se observa en la Figura 5.6. La purificación de los NTC permite la formación de grupos carboxílicos en superficie, que cumplen la tarea de enlazantes cuando se presenta un agente dispersante. Igualmente, la presencia de hidróxidos de calcio (cal) permiten una mayor interacción tipo enlace, con los agregados y la pasta de cemento. Por lo que el tipo de dispersante y la cantidad suministrada, son fundamentales para generar estos buenos enlaces de los NCC, igualmente Liew et al. (2016) en su investigación corroboraron que existen diferentes factores que influyen en las propiedades mecánicas de las matrices cementantes, dentro de los cuales se encuentran los defectos en la superficie de los NTC, su longitud, la cantidad adicionada, el agente dispersante utilizado y la relación agua/cemento de la mezcla. Mohsen et al. (2016), encontraron que el tiempo de mezclado de los NTC en la matriz cementante es un factor relevante en el proceso de dispersión, ya que realizaron una evaluación a 1.5, 15, 30 y 60 min de mezclado y encontraron que al aumentar este tiempo, la resistencia a flexión aumentaba y la relación de vacíos de las mezclas disminuía; además encontraron que adicionar gran cantidad de superplastificante no permite la hidratación de la matriz cementante como se presenta en la Figura 5.6.

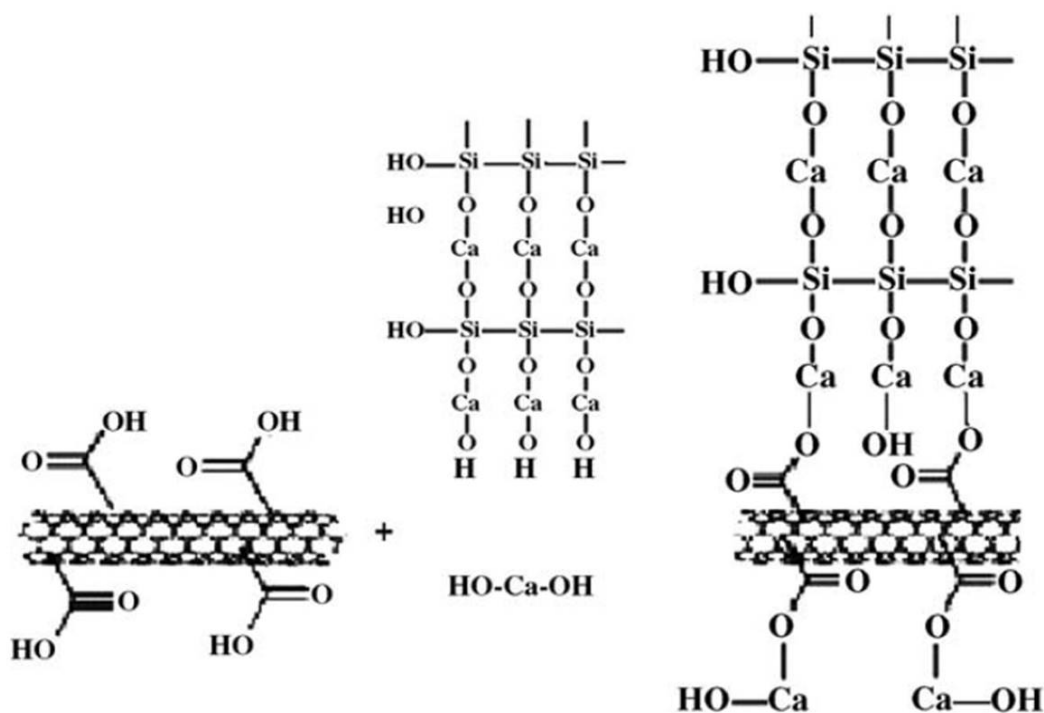


Figura 5.6: Interacción NTC con agente dispersante *Fuente: Guzman Suárez (2013)*

Luego de realizar el ensayo de resistencia a flexión de las vigas, se pudo observar que para

la muestra control, la falla fue por rompimiento tanto de agregados como de matriz, pero en los concretos modificados con NCC la falla fue por rompimiento de la matriz y desprendimiento del agregado, lo que sugiere que los agregados no tuvieron una interacción correcta con la matriz, esto se detalla en las Figuras 5.7 y 5.8.



Figura 5.7: Falla de viga luego del ensayo de flexión de mezcla control



Figura 5.8: Falla de viga luego del ensayo de flexión de mezcla con adición de NCC

En los ensayos mecánicos realizados, es notoria la mejora en los concretos adicionados con 0.10 % y 0.15 % con relación a la adición de 0.05 %, por lo que es posible que exista un porcentaje de adición de NCC óptimo entre estos dos porcentajes. En su investigación, Hamzaoui et al. (2012), encontraron tanto para mortero como para concreto, que existen porcentajes óptimos de adición ya que al aumentar el porcentaje de adición, existe un porcentaje en donde las resistencias aumentan, pero al seguir aumentando el porcentaje de adición, estas resisten-

cias disminuyen. Igualmente Glenn (2013) realizaron la variación de la relación agua/cemento de la mezcla con diferentes porcentajes de adición de NTC, e igualmente encontraron que sí existe un porcentaje óptimo de adición con respecto a cada tipo de relación agua/cemento. Estos resultados resaltan que evaluar de forma más detallada los porcentajes de adición, puede ser un factor fundamental y necesario para obtener las mejoras esperadas en los ensayos mecánicos.

Capítulo 6

Conclusiones

La dispersión realizada juega un papel fundamental en las propiedades que pueden transmitir los NCC a la mezcla de concreto. Sin embargo, es necesario evaluar la solución NCC+Agua+SP, en la matriz cementante.

Debido al carácter hidrófobo de los NCC, estos actúan como agentes expulsores de agua, generando una disminución en la manejabilidad y un aumento en el contenido de vacíos en las mezclas con respecto a la muestra control.

En cuanto a los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia a la compresión y a la flexión, no se mostró una tendencia o influencia significativa de las mezclas adicionadas con respecto a la mezcla control, debido a que los resultados se encuentran dentro del rango de los coeficientes de variación.

Tanto el módulo de elasticidad estático medido a compresión en cilindros como el módulo de elasticidad dinámico medido a flexión en vigas, aumentó en los mayores porcentajes de adición, por ende en estos últimos porcentajes el concreto es más rígido.

De los ensayos en estado endurecido, los de fatiga presentaron las mayores dispersiones de los datos, especialmente los concretos adicionados con 0.05 % y 0.15 %, debido a la heterogeneidad de las matrices cementante como se observó en las micrografías SEM.

La curva de adición de 0.10 % presenta una menor pendiente que las otras 3 mezclas, por lo que el esfuerzo resistido al millón de ciclos sería mayor, y por ende este porcentaje de adición presenta el mejor comportamiento ante fatiga.

Capítulo 7

Trabajo futuro

Debido a que los resultados obtenidos en el presente trabajo no fueron los esperados, y teniendo en cuenta los aportes de estos mismos en la investigación sobre el uso de NCC en concreto, se pueden dar las siguientes recomendaciones a futuro:

- Utilizar NCC purificados para que exista una mejor interacción de estos con la matriz cementante.
- Verificar la correcta hidratación del concreto en la etapa de fraguado, ya que allí se presentan los enlaces entre los NCC y la matriz cementante.
- Utilizar diferentes agentes dispersantes y cantidades de estos, para verificar la dispersión de los NCC en la matriz cementante, no solamente en la solución acuosa.
- Al utilizar un superplastificante como agente dispersante, es necesario evaluar el porcentaje óptimo de adición, para generar los correctos enlaces entre la matriz cementante y los NCC.
- Aumentar el tiempo de mezclado de los NCC con la matriz cementante, para evitar la expulsión del agua por los mismos.
- Evaluar más muestras en cada ensayo, para poder realizar un análisis estadístico confiable de los datos.
- Realizar el diseño de mezcla por métodos dirigidos hacia pavimentos.
- Evaluar la distribución de los vacíos de la matriz para poder clasificar la morfología de estos.
- En estado fresco medir la exudación de las mezclas para verificar la pérdida de agua.

Bibliografía

- Al-Saud, T., Hussain, M., Bin, Batyanovskii, E., Zhdanok, S., Krauklis, A., and Samtsou, P. (2011). Influence of carbon nanomaterials on the properties of cement and concrete. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 84.
- Altamirano, L. (2007). Deterioro de pavimentos rígidos. *Universidad Nacional de Ingeniería*, pages 13–23.
- Alves, E. (2014). Módulos elásticos. *Engenharia Física*.
- Ariza, A. and Casas, J. C. (2013). Estado del arte uso de nanotubos de carbono para la mejora de las propiedades en los concretos. *Universidad Católica de Colombia*.
- ASOCRETO (2000). Tecnología y propiedades. *Bogotá: Asociación Colombiana de Productores de concreto*.
- Boada Marcano, M. d. l. n. and Pérez Niel, E. L. (2011). Comportamiento a la fatiga de una mezcla de concreto mr-3.5 mpa para pavimento con adición de fibras plásticas. *Pontifica Universidad Javeriana*.
- Bolufé, P. (2013). El grafeno, el mundo plano del carbono.
- C-191-ONNCCE-2004, N. N. (2008). Determinación de la resistencia a la flexión del concreto. *Revista CYT*.
- Castro-Beltrán, A., Sepúlveda-Guzmán, S., Wencel, J., and Cruz-SilvaD, R. (2011). Obtención de grafeno mediante la reducción química del óxido de grafito. *Ingenierías*, 14(52):35.
- Chan, L. Y. and Andrawes, B. (2010). Finite element analysis of carbon nanotube/cement composite with degraded bond strength. *Computational Materials Science*, 47(4):994–1004.
- Cifuentes Girard, M. F. (2015). *Determinación del grado de deshidratación del yeso en la producción de cemento por medio de análisis termogravimétrico*. PhD thesis, Universidad de San Carlos de Guatemala.

- Collins, F., Lambert, J., and Duan, W. H. (2012). The influences of admixtures on the dispersion, workability, and strength of carbon nanotube–opc paste mixtures. *Cement and Concrete Composites*, 34.
- Covarrubias Gordillo, C., Farías Cepeda, L., Aguilar, P. N., and Hernández Hernández, E. (2013). Nanocompuestos a base de polimeros dispersos y nanofibras de carbono. *Revista iberoamericana de Polímeros*, 14(3):108–116.
- Cwirzen, A., Habermehl-Cwirzen, K., and Penttala, V. (2008). Surface decoration of carbon nanotubes and mechanical properties of cement/carbon nanotube composites. *Advances in cement research*, 20.
- Espigares García, M. and Moreno Abril, O. (1999). Caracteres microbiológicos, aguas envasadas, usos recreativos del agua. *Estudio sanitario del agua*, pages 115–127.
- Galao, O. (2012). Matrices cementicias multifuncionales mediante adición de nanofibras de carbono. *departamento de ingeniería de la construcción, obras públicas e infraestructura urbana*.
- Garnica Anguas, P. and Sesma Martínez, J. (2002). Mecánica de materiales para pavimentos. *Publicación técnica*, (197).
- Gdoutos, E. E., Konsta-Gdoutos, M. S., and Danoglidis, P. A. (2016). Portland cement mortar nanocomposites at low carbon nanotube and carbon nanofiber content: A fracture mechanics experimental study. *Cement and Concrete Composites*, 70:110–118.
- Genovés Gómez, V. (2011). *Morteros y hormigones con adición de nanotubos de carbono*. PhD thesis, Universitat Politècnica de València.
- Glenn, J. (2013). Nanotechnology in concrete: Critical review and statistical analysis. *ProQuest Dissertations And Theses*.
- Goel, S., Singh, S., and Singh, P. (2012). Fatigue analysis of plain and fiber-reinforced self-consolidating concrete. *ACI Materials Journal*, 109(5).
- Grady, B. P. (2011). *Carbon nanotube-polymer composites: manufacture, properties, and applications*. John Wiley & Sons.
- Gutiérrez de López, L. (2003). El concreto y otros materiales para la construcción. *Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia*.
- Guzman Suárez, R. (2013). El uso de nanotubos en el concreto para mejorar su desempeño y durabilidad. *Universidad Nacional Autónoma de México*.

- Hamzaoui, R., Bennabi, A., Guessasma, S., Khelifa, R., and Leklou, N. (2012). Optimal carbon nanotubes concentration incorporated in mortar and concrete. In *Advanced Materials Research*, volume 587. Trans Tech Publ.
- Harmesen, T. E. (2005). *Diseño de estructuras de concreto armado*. Fondo Editorial PUCP.
- Huang, C. and Zhao, G. (1995). Properties of steel fibre reinforced concrete containing larger coarse aggregate. *Cement and Concrete Composites*, 17(3):199–206.
- Huang, Y. H. (2004). *Pavement analysis and design*. Pearson Prentice Hall.
- I.N.V.E-122-13 (2013). *Determinación en laboratorio del contenido de agua (humedad) del suelo, roca y mezclas de suelo-agregado*. Instituto Nacional de Vías.
- I.N.V.E-133-13 (2013). *Equivalente de arena de suelos y agregados finos*. Instituto Nacional de Vías.
- I.N.V.E-217-13 (2013). *Densidad bulk (peso unitario) y porcentaje de vacíos de los agregados compactados o sueltos*. Instituto Nacional de Vías.
- I.N.V.E-222-13 (2013). *Gravedad específica y absorción de agregados finos*. Instituto Nacional de Vías.
- I.N.V.E-223-13 (2013). *Gravedad específica y absorción de agregados gruesos*. Instituto Nacional de Vías.
- I.N.V.E-323-13 (2013). *Resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico*. Instituto Nacional de Vías.
- Jameson, G. and Howard, A. (2012). *Preliminary investigation of the influence of micro-cracking on fatigue life of cemented materials*. Number AP-T198/12.
- Johnston, C. D. and Zemp, R. W. (1991). Flexural fatigue performance of steel fiber reinforced concrete—influence of fiber content, aspect ratio, and type. *Materials Journal*, 88(4):374–383.
- Jung, W. R., Choi, J. H., Lee, N., Shin, K., Moon, J.-H., and Seo, Y.-S. (2012). Reduced damage to carbon nanotubes during ultrasound-assisted dispersion as a result of supercritical-fluid treatment. *Carbon*, 50(2):633–636.
- Kharissova, O. V., Robledo Jiménez, C. L., and Ortiz Méndez, U. (2004). Síntesis de nanoestructuras de carbono mediante microondas. *Ingenierías*, 7(23):6–11.
- Konsta-Gdoutos, M. S., Metaxa, Z. S., and Shah, S. P. (2010). Multi-scale mechanical and fracture characteristics and early-age strain capacity of high performance carbon nanotube/cement nanocomposites. *Cement and Concrete Composites*, 32.

- Lee, M. K. and Barr, B. I. G. (2004). An overview of the fatigue behaviour of plain and fibre reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites*.
- Li, G. Y., Wang, P. M., and Zhao, X. (2005). Mechanical behavior and microstructure of cement composites incorporating surface-treated multi-walled carbon nanotubes. *Carbon*, 43.
- Li, G. Y., Wang, P. M., and Zhao, X. (2007). Pressure-sensitive properties and microstructure of carbon nanotube reinforced cement composites. *Cement and Concrete Composites*, 29(5):377–382.
- Liew, K., Kai, M., and Zhang, L. (2016). Carbon nanotube reinforced cementitious composites: An overview. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*.
- López Serrano, A. A. (2014). Evaluación de resistencias en concretos para pavimentos convencionales mr 41 y concretos hidratium mr 41. *Universidad Católica de Colombia*.
- Makar, J., Margeson, J., and Luh, J. (2005). Carbon nanotube/cement composites-early results and potential applications. CONFERENCE ON CONSTRUCTION MATERIALS.
- Malaikah, A., Al-Saif, K., and Al-Zaid, R. (2004). Prediction of the dynamic modulus of elasticity of concrete under different loading conditions.
- Mendoza, O., Sierra, G., and Tobón, J. I. (2014). Effect of the reagglomeration process of multi-walled carbon nanotubes dispersions on the early activity of nanosilica in cement composites. *Construction and Building Materials*, 54.
- Mendoza Reales, O. A. (2013). *Efecto híbrido de los nanotubos de carbono y la nanosílice sobre las propiedades mineralógicas y mecánicas de morteros de cemento Portland*. PhD thesis, Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- Mina, D. V. (2004). Nanocompuestos de matriz polimerica.
- Miravete, A. and Chiminelli, A. (2002). Modelización del comportamiento mecánico de materiales compuestos con nanotubos de carbono continuos.
- Mohsen, M. O., Al-Nuaimi, N., Al-Rub, R. K. A., Senouci, A., and Bani-Hani, K. A. (2016). Effect of mixing duration on flexural strength of multi walled carbon nanotubes cementitious composites. *Construction and Building Materials*, 126:586–598.
- Morsy, M., Alsayed, S., and Aqel, M. (2011). Hybrid effect of carbon nanotube and nano-clay on physico-mechanical properties of cement mortar. *Construction and Building Materials*, 25.

- Musso, S., Tulliani, J.-M., Ferro, G., and Tagliaferro, A. (2009). Influence of carbon nanotubes structure on the mechanical behavior of cement composites. *Composites Science and Technology*, 69.
- Neville, A. M. (1995). Properties of concrete. *Longman Group UK Limited*.
- NSR, T. C. (2010). Reglamento colombiano de construcción sismo resistente.
- NTC 1032, N. T. C. (2010). Método de ensayo para la determinación del contenido de aire en el concreto fresco. método de presión. *ICONTEC*.
- NTC 174, N. T. C. (2010). Especificaciones de los agregados para concreto. *ICONTEC*.
- NTC 2871, N. T. C. (2010). Método de ensayo para determinar la resistencia del concreto a la flexión - utilizando una viga simple con carga en los tercios medios. *ICONTEC*.
- NTC 3546, N. T. C. (2010). Métodos de ensayo para determinar la evaluación en laboratorio y en obra, de morteros para unidades de mampostería simple y reforzada. *ICONTEC*.
- NTC 396, N. T. C. (2010). Método de ensayo para determinar el asentamiento del concreto. *ICONTEC*.
- NTC 4025, N. T. C. (2010). Método de ensayo para determinar el módulo de elasticidad estático y la relación de poisson en concreto a compresión. *ICONTEC*.
- NTC 4483, N. T. C. (2010). Métodos de ensayo para determinar la permeabilidad del concreto al agua. *ICONTEC*.
- NTC 5784, N. T. C. (2010). Método para determinar la fluidez de morteros de cemento hidráulico. *ICONTEC*.
- NTC 673, N. T. C. (2010). Ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto. *ICONTEC*.
- Oh, B. H. (1991). Fatigue life distributions of concrete for various stress levels.
- Parra Barrientos, F. I. (2015). Estudio experimental sobre la eficiencia de una ceniza volante como adición inhibidora del fenómeno expansivo por formación de etringita retardada (def) en el hormigón.
- Pertuz C., A. D. (2004). Weibull aplicada a la fatiga.
- Pinto, A. (2016). Uso de la prueba equivalente de arena.
- Rao, S. and Roesler, J. R. (2005). Characterizing effective built-in curling from concrete pavement field measurements. *Journal of Transportation Engineering*, 131(4):320–327.

- Rigaut, G., Shevchenko, A., Rutz, B., Wilm, M., Mann, M., and Séraphin, B. (1999). A generic protein purification method for protein complex characterization and proteome exploration. *Nature biotechnology*, 17(10):1030–1032.
- Rivera, G. (1992). Concreto simple. *Universidad del Cauca, Popayán*.
- Rodríguez Villareal, F. A. (2013). Estudio del comportamiento a la fatiga de una mezcla de concreto para pavimentos reforzados con fibras metálicas. *Pontificia Universidad Javeriana*.
- Salgado, M. (2013). Análisis de gestión vial. *Blog 360 en concreto*.
- Sanchez de Guzmán, D. (2001). *Tecnología del concreto y del mortero*. Biblioteca de la construcción.
- Santoro, G. and Domingo, C. (2007). Espectroscopía raman de nanotubos de carbono. *Óptica pura y aplicada*, 40.
- Sharma, S. and Kothiyal, N. (2016). Facile growth of carbon nanotubes coated with carbon nanoparticles: A potential low-cost hybrid nanoadditive for improved mechanical, electrical, microstructural and crystalline properties of cement mortar matrix. *Construction and Building Materials*, 123:829–846.
- Shi, X., Fwa, T., and Tan, S. (1993). Flexural fatigue strength of plain concrete. *Materials Journal*, 90(5):435–440.
- Silva Flores, A. M., Pavón Castro, C. M., and Hernández Melgar, L. S. (2013). Relación de la resistencia a la compresión y módulo de ruptura del concreto hidráulico. *UNITEC*.
- Singh, S. and Kaushik, S. (2003). Fatigue strength of steel fibre reinforced concrete in flexure. *Cement and Concrete Composites*, 25(7):779–786.
- Sobolkina, A., Mechtcherine, V., Khavrus, V., Maier, D., Mende, M., Ritschel, M., and Leonhardt, A. (2012). Dispersion of carbon nanotubes and its influence on the mechanical properties of the cement matrix. *Cement and Concrete Composites*, 34.
- Strano, M. S., Moore, V. C., Miller, M. K., Allen, M. J., Haroz, E. H., Kittrell, C., Hauge, R. H., and Smalley, R. (2003). The role of surfactant adsorption during ultrasonication in the dispersion of single-walled carbon nanotubes. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 3(1-2):81–86.
- Treacy, M. J., Ebbesen, T., and Gibson, J. (1996). Exceptionally high young’s modulus observed for individual carbon nanotubes.
- Vaisman, L., Wagner, H. D., and Marom, G. (2006). The role of surfactants in dispersion of carbon nanotubes. *Advances in colloid and interface science*, 128:37–46.

- Xie, X.-L., Mai, Y.-W., and Zhou, X.-P. (2005). Dispersion and alignment of carbon nanotubes in polymer matrix: a review. *Materials Science and Engineering: Reports*, 49.
- Yang, B., Souri, H., Kim, S., Ryu, S., and Lee, H. (2014). An analytical model to predict curvature effects of the carbon nanotube on the overall behavior of nanocomposites. *Journal of Applied Physics*, 116.
- Zhou, Z., Lai, C., Zhang, L., Qian, Y., Hou, H., Reneker, D. H., and Fong, H. (2009). Development of carbon nanofibers from aligned electrospun polyacrylonitrile nanofiber bundles and characterization of their microstructural, electrical, and mechanical properties. *Polymer*, 50(13):2999–3006.
- Zuo, J., Yao, W., Liu, X., and Qin, J. (2012). Sensing properties of carbon nanotube–carbon fiber/cement nanocomposites. *Journal of Testing and Evaluation*, 40.

ANEXO 2

CARTA DE AUTORIZACIÓN DE LOS AUTORES (Licencia de uso)

Bogotá, D.C., Enero 26 de 2017

Señores
Biblioteca Alfonso Borrero Cabal S.J.
Pontificia Universidad Javeriana
Cuidad

Los suscritos:

Raisa Isabel Botto Lugo	, con C.C. No	1019607438
Paola Andrea Santacruz Pachón	, con C.C. No	1016051478

En nuestra calidad de autoras exclusivas de la obra titulada:

Evaluación de las propiedades en estado fresco y endurecido de un concreto para uso en
pavimento rígido, adicionado con nanocompuestos de carbono.

Tesis doctoral ☐ Trabajo de grado ☒ Premio o distinción: Si ☐ No ☒

cual: presentado y aprobado en el año 2017, por medio del presente escrito
autorizamos a la Pontificia Universidad Javeriana para que, en desarrollo de la presente licencia
de uso parcial, pueda ejercer sobre nuestra obra las atribuciones que se indican a continuación,
teniendo en cuenta que en cualquier caso, la finalidad perseguida será facilitar, difundir y
promover el aprendizaje, la enseñanza y la investigación.

En consecuencia, las atribuciones de usos temporales y parciales que por virtud de la presente
licencia se autorizan a la Pontificia Universidad Javeriana, a los usuarios de la Biblioteca Alfonso
Borrero Cabal S.J., así como a los usuarios de las redes, bases de datos y demás sitios web con los
que la Universidad tenga perfeccionado un convenio, son:

AUTORIZAMOS	SI	NO
1. La conservación de los ejemplares necesarios en la sala de tesis y trabajos de grado de la Biblioteca.	X	
2. La consulta física (sólo en las instalaciones de la Biblioteca)	X	
3. La consulta electrónica - on line (a través del catálogo Biblos y el Repositorio Institucional)	X	
4. La reproducción por cualquier formato conocido o por conocer	X	
5. La comunicación pública por cualquier procedimiento o medio físico o electrónico, así como su puesta a disposición en Internet	X	
6. La inclusión en bases de datos y en sitios web sean éstos onerosos o gratuitos, existiendo con ellos previo convenio perfeccionado con la Pontificia Universidad Javeriana para efectos de satisfacer los fines previstos. En este evento, tales sitios y sus usuarios tendrán las mismas facultades que las aquí concedidas con las mismas limitaciones y condiciones	X	

De acuerdo con la naturaleza del uso concedido, la presente licencia parcial se otorga a título gratuito por el máximo tiempo legal colombiano, con el propósito de que en dicho lapso nuestra obra sea explotada en las condiciones aquí estipuladas y para los fines indicados, respetando siempre la titularidad de los derechos patrimoniales y morales correspondientes, de acuerdo con los usos honrados, de manera proporcional y justificada a la finalidad perseguida, sin ánimo de lucro ni de comercialización.

De manera complementaria, garantizamos en nuestra calidad de estudiantes y por ende autoras exclusivas, que el Trabajo de Grado en cuestión, es producto de nuestra plena autoría, de nuestro esfuerzo personal intelectual, como consecuencia de nuestra creación original particular y, por tanto, somos las únicas titulares de la misma. Además, aseguramos que no contiene citas, ni transcripciones de otras obras protegidas, por fuera de los límites autorizados por la ley, según los usos honrados, y en proporción a los fines previstos; ni tampoco contempla declaraciones difamatorias contra terceros; respetando el derecho a la imagen, intimidad, buen nombre y demás derechos constitucionales. Adicionalmente, manifestamos que no se incluyeron expresiones contrarias al orden público ni a las buenas costumbres. En consecuencia, la responsabilidad directa en la elaboración, presentación, investigación y, en general, contenidos del Trabajo de Grado es de nuestra competencia exclusiva, eximiendo de toda responsabilidad a la Pontificia Universidad Javeriana por tales aspectos.

Sin perjuicio de los usos y atribuciones otorgadas en virtud de este documento, continuaremos conservando los correspondientes derechos patrimoniales sin modificación o restricción alguna, puesto que de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación de los derechos patrimoniales derivados del régimen del Derecho de Autor.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, “*Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores*”, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables. En consecuencia, la Pontificia Universidad Javeriana está en la obligación de RESPETARLOS Y HACERLOS RESPETAR, para lo cual tomará las medidas correspondientes para garantizar su observancia.

NOTA: Información Confidencial:

Este Trabajo de Grado contiene información privilegiada, estratégica, secreta, confidencial y demás similar, o hace parte de una investigación que se adelanta y cuyos resultados finales no se

han publicado.

Si ☐ No ☒

En caso afirmativo expresamente indicaremos, en carta adjunta, tal situación con el fin de que se mantenga la restricción de acceso.

NOMBRE COMPLETO	No. del documento de identidad	FIRMA
Raisa Isabel Botto Lugo	1019607438	<i>Raisa Botto</i>
Paola Andrea Santacruz Pachón	1016051478	<i>Paola Santacruz</i>

FACULTAD: Ingeniería

PROGRAMA ACADÉMICO: Maestría en Ingeniería Civil

ANEXO 3
BIBLIOTECA ALFONSO BORRERO CABAL, S.J.
DESCRIPCIÓN DE LA TESIS O DEL TRABAJO DE GRADO
FORMULARIO

TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO DE GRADO						
EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO Y ENDURECIDO DE UN CONCRETO PARA USO EN PAVIMENTO RÍGIDO, ADICIONADO CON NANOCOMPUESTOS DE CARBONO.						
SUBTÍTULO, SI LO TIENE						
AUTOR O AUTORES						
Apellidos Completos			Nombres Completos			
Botto Lugo			Raisa Isabel			
Santacruz Pachón			Paola Andrea			
DIRECTORES DEL TRABAJO DE GRADO						
Apellidos Completos			Nombres Completos			
Reyes Lizcano			Fredy Alberto			
Pérez Flores			Alejandro			
Alvarado Vargas			Yezid Alexander			
FACULTAD						
Ingeniería						
PROGRAMA ACADÉMICO						
Tipo de programa (seleccione con “x”)						
Pregrado	Especialización	Maestría	Doctorado			
		X				
Nombre del programa académico						
Maestría en Ingeniería Civil						
Nombres y apellidos del director del programa académico						
Luis Felipe Prada Sarmiento						
TRABAJO PARA OPTAR AL TÍTULO DE:						
Magister en Ingeniería Civil						
PREMIO O DISTINCIÓN (En caso de ser LAUREADAS o tener una mención especial):						
CIUDAD		AÑO DE PRESENTACIÓN DEL TRABAJO DE GRADO			NÚMERO DE PÁGINAS	
Bogotá D.C.		2017			80	
TIPO DE ILUSTRACIONES (seleccione con “x”)						
Dibujos	Pinturas	Tablas, gráficos y diagramas	Planos	Mapas	Fotografías	Partituras
		X			X	
SOFTWARE REQUERIDO O ESPECIALIZADO PARA LA LECTURA DEL DOCUMENTO						
Nota: En caso de que el software (programa especializado requerido) no se encuentre licenciado por la Universidad a través de la Biblioteca (previa consulta al estudiante), el texto de la Tesis o Trabajo de Grado quedará solamente en formato PDF.						
MATERIAL ACOMPAÑANTE						

TIPO	DURACIÓN (minutos)	CANTIDAD	FORMATO		
			CD	DVD	Otro ¿Cuál?
Vídeo					
Audio					
Multimedia					
Producción electrónica					
Otro Cuál?					
DESCRIPTORES O PALABRAS CLAVE EN ESPAÑOL E INGLÉS Son los términos que definen los temas que identifican el contenido. <i>(En caso de duda para designar estos descriptores, se recomienda consultar con la Sección de Desarrollo de Colecciones de la Biblioteca Alfonso Borrero Cabal S.J en el correo biblioteca@javeriana.edu.co, donde se les orientará).</i>					
ESPAÑOL			INGLÉS		
Nanocompuestos de carbono			Carbon nanocomposites		
Nanotubos de carbono			Carbon nanotubes		
Nanofibras de carbono			Carbon nanofibers		
Concreto hidráulico			Hydraulic concrete		
Resistencia a la compresión			Compressive strength		
Módulo elástico dinámico			Dynamic elastic modulus		
Módulo elástico estático			Static elastic modulus		
Módulo de rotura			Modulus of rupture		
Fatiga			Fatigue		
RESUMEN DEL CONTENIDO EN ESPAÑOL E INGLÉS (Máximo 250 palabras - 1530 caracteres)					
<p style="text-align: center;">RESUMEN</p> <p>En el presente trabajo se modificó un concreto hidráulico para uso en pavimento rígido, con cuatro (4) porcentajes de adición de nanocompuestos de carbono (NCC) con respecto al peso del cemento, teniendo como principal objetivo, analizar su comportamiento sometido ante cargas monotónicas y dinámicas, evaluando propiedades mecánicas como, resistencia a la compresión, módulo de elasticidad de forma estática y dinámica, módulo de rotura y fatiga; igualmente, se evaluaron propiedades en estado fresco como la manejabilidad y el contenido de aire. La matriz cementante modificada está compuesta de agua, cemento, agregados y superplastificantes, con diferentes porcentajes de adición de NCC (0 %, 0.05 %, 0.10% y 0.15 %, con respecto al peso del cemento), donde también se evaluaron diferentes relaciones molares Cu/Ni (0.33, 1.0 y 2.0). Estas relaciones molares permiten obtener NCC con diferentes longitudes, las cuales influyen en el comportamiento del material compuesto. Debido a que los NCC presentan un carácter hidrófobo, fue indispensable estudiar su dispersión especialmente en el agua, ante esto, el uso de un agente dispersante, facilitó el contacto entre la matriz cementante y los NCC, permitiendo su correcta interacción química y física. Bajo estos parámetros se obtuvo que la adición óptima se encuentra alrededor de 0.10 %.</p>					

ABSTRACT

In this investigation a hydraulic concrete was modified adding Carbon Nanocomposites (CNC) for its use in rigid pavement, the mass fraction of the CNC was varied from 0 to 0.15% of the cement mass in the mixture. Having as main objective, to analyze its behavior under monotonic and dynamics loads, evaluating mechanical properties such as, compressive strength, static and dynamic modulus of elasticity, rupture modulus and fatigue. Also, fresh properties such as handling and air content were evaluated. The modified cement matrix is composed by water, cement, aggregates and superplasticizers, with different percentages of CNC addition, besides different Cu / Ni molar ratios (0.33, 1.0 and 2.0) were analyzed. These molar ratios allow to obtain CNC with different lengths, which tends to influence the behavior of the composite material. Because CNC have a hydrophobic character, it was indispensable to study its dispersion especially in water, that's why, there was necessary the use of a dispersing agent, in order to facilitate the contact between the cementing matrix and the CNC, allowing their correct chemical and physical interaction. Under these parameters the optimum addition was found to be around 0.10 %.