

# **Nanotubos de carbono su aplicación para mejorar la resistencia a la fatiga o reducir fisuramiento en pavimentos rígidos con concreto hidráulico**

Daniel Alexander Llanos Rodríguez  
Paul Eduardo Suarez Ramos  
Alonso Rodrigo Zúñiga Suárez  
Alexis Vladimir Valle Benitez

# **Nanotubos de carbono su aplicación para mejorar la resistencia a la fatiga o reducir fisuramiento en pavimentos rígidos con concreto hidráulico**

---

Daniel Alexander Llanos Rodríguez  
Paul Eduardo Suarez Ramos  
Alonso Rodrigo Zúñiga Suárez  
Alexis Vladimir Valle Benitez

Este libro ha sido debidamente examinado y valorado en la modalidad doble par ciego con fin de garantizar la calidad científica del mismo.

© Publicaciones Editorial Grupo Compás  
Guayaquil - Ecuador  
compasacademico@icloud.com  
<https://repositorio.grupocompas.com>



Llanos, D., Suarez, P., Zuñiga, A. Valle, A. (2023) Nanotubos de carbono su aplicación para mejorar la resistencia a la fatiga o reducir fisuramiento en pavimentos rígidos con concreto hidráulico Editorial Grupo Compás

© Daniel Alexander Llanos Rodríguez  
Paul Eduardo Suarez Ramos  
Alonso Rodrigo Zúñiga Suárez  
Alexis Vladimir Valle Benitez

**ISBN: 978-9942-33-702-3**

El copyright estimula la creatividad, defiende la diversidad en el ámbito de las ideas y el conocimiento, promueve la libre expresión y favorece una cultura viva. Quedan rigurosamente prohibidas, bajo las sanciones en las leyes, la producción o almacenamiento total o parcial de la presente publicación, incluyendo el diseño de la portada, así como la transmisión de la misma por cualquiera de sus medios, tanto si es electrónico, como químico, mecánico, óptico, de grabación o bien de fotocopia, sin la autorización de los titulares del copyright.

## Índice

Introducción .....	13
Hormigones .....	15
Pavimentos rígidos .....	15
Criterio por fatiga .....	16
Criterio por erosión .....	17
Requisitos mínimas en el diseño de pavimentos rígidos.....	18
Hormigones para pavimentos rígidos.....	18
Propiedades y características del hormigón para pavimentos rígidos.....	19
Propiedades del hormigón fresco.....	19
Propiedades del hormigón endurecido .....	19
Retracción del hormigón .....	20
El hormigón y el clima.....	20
<i>Características del hormigón en tiempo frío.....</i>	20
Características del hormigón en tiempo caluroso .....	21
Características mecánicas del hormigón en pavimentos rígidos .....	21
Resistencia a la compresión en hormigones para pavimentos rígidos .....	21
Resistencia a la tracción del concreto por flexión en hormigones para pavimentos rígidos..	22
Características reológicas del hormigón .....	23
Módulo de Elasticidad.....	23
Relación de Poisson.....	26
Durabilidad del hormigón.....	26
Resistividad eléctrica en el hormigón .....	28
Mecanismos de Conducción Eléctrica en el Hormigón.....	29
Micro estructura del hormigón .....	30
Microestructura de la interface .....	31
Nanotubos de carbono .....	32
Cuidado y manipulación de los nano materiales .....	33
Síntesis de los Nanotubos de Carbono.....	33
Características de los nanotubos de carbono.....	34
Propiedades de los nanotubos de carbono.....	35
Funcionalización de los nanotubos de carbono.....	36
<i>Funcionalización química de los nanotubos de carbono. ....</i>	36
Funcionalización física de los nanotubos de carbono .....	37
Dispersión de los NTC en agentes líquidos.....	37

Mecanismo de dispersión de los NTC sonificación con ultrasonido.....	38
Agentes dispersantes para NTCs.....	38
<i>Aditivo a base de polímeros hidroxilados (PHs)</i> .....	38
<i>Aditivo a base de naftaleno sulfonato de sodio (NSS)</i> .....	38
Valor óptimo de AD/NTCPM. ....	39
Valor óptimo de energía de sonificación.....	40
Influencia de los nanotubos de carbono en el hormigón.....	41
Diseño de Pavimentos rígidos método empírico mecanicista de la PCA .....	42
Análisis por fatiga. ....	43
<i>Determinar el esfuerzo equivalente.</i> .....	43
<i>Calcular factores de relación de esfuerzo.</i> .....	45
<i>Determinar para cada carga el número admisible de repeticiones de carga en función de la relación de esfuerzos.</i> .....	46
<i>Calcular consumo de fatiga parcial para cada carga.</i> .....	46
<i>Calcular consumo total de fatiga y compararlo con valor admisible (<math>&lt; 0 = 100\%</math>).</i> .....	46
Análisis por erosión. ....	47
<i>Calcular la deflexión en la esquina de la losa.</i> .....	47
<i>Calcular el factor de potencia de deformabilidad del suelo.</i> .....	49
<i>Calcular factor de ajuste por erosionabilidad de la base de apoyo (<math>C_1</math>).</i> .....	49
<i>Calcular factor (<math>C_1 * p</math>).</i> .....	49
<i>Determinación de las repeticiones admisibles bajo criterio de erosión.</i> .....	50
<i>Calcular para cada carga por eje el consumo parcial por erosión.</i> .....	50
<i>Calcular el factor de consumo total por erosión y compararlo con valor admisible (<math>&lt; 100\%</math>).</i>	
50	
Hormigones con fibras de Polipropileno .....	51
Hormigones con fibras de acero.....	51
Primera etapa .....	51
Caracterización de los materiales utilizados en la mezcla de hormigón. ....	51
<i>Caracterización del Cemento</i> .....	52
<i>Caracterización del árido fino</i> .....	53
<i>Caracterización del árido grueso.</i> .....	53
<i>Caracterización del agua</i> .....	54
<i>Caracterización de los agentes dispersantes.</i> .....	54
<i>Aditivo a base de naftaleno sulfonato de sodio (NSS)</i> .....	54
<i>Aditivo a base de polímeros hidroxilados (PHs).</i> .....	54
<i>Caracterización de los NTCs</i> .....	54
Diseño de la mezcla de Hormigón método ACI para pavimentos rígidos. ....	55

<i>Diseño preliminar de la mezcla de Hormigón método ACI para pavimentos rígidos.</i> .....	55
Diseño mejorado de la mezcla de hormigón método ACI para pavimentos rígidos.....	64
Dosificación del hormigón convencional.....	66
Diseño de la mezcla de Hormigón método ACI para pavimentos rígidos modificado con NTCPMs.....	67
Dosificación del hormigón modificado con NTCPMs. ....	69
Segunda etapa.....	70
Elaboración de especímenes de hormigón prismáticos vigas a escala de 5cm x 5cm x 20cm.	70
<i>Equipos a utilizar.</i> .....	72
<i>Preparación de materiales.</i> .....	73
<i>Mecanismos de dispersión de los NTCs. en la mezcla de hormigón.</i> .....	75
<i>Configuración del equipo para dispersión de los NTCPM en NSS.</i> .....	75
<i>Configuración del equipo para dispersión de los NTCPM en PHs.</i> .....	76
<i>Metodología para la elaboración de especímenes del hormigón convencional y modificado con NTCs.</i> .....	76
Tercera etapa .....	78
<i>Equipos a utilizar.</i> .....	78
Evaluación de la estructura de los especímenes de hormigón (5x5x20) cm mediante ensayos de resistividad y conductividad eléctrica ideal. ....	80
Ensayo a flexión de los especímenes de hormigón (5x5x20) cm aplicando la norma NTE INEN 2554 para determinar el módulo de rotura.....	82
Evaluación de la estructura de los especímenes de hormigón (5x5x20) cm mediante ensayos de resistividad y conductividad eléctrica sometidos a una acción mecánica de carga. ....	85
Ensayo a compresión de especímenes (5x5x5) cm cúbicos de hormigón aplicando la norma NTE INEN 0488.....	88
Evaluación de la estructura de los especímenes de hormigón (5x5x20) cm mediante ensayos de ultrasonido y determinación del módulo de Elasticidad y relación de poisson.....	89
Resultados de la primera etapa. ....	90
Efectos de los NTCPM en la resistividad y conductividad eléctrica ideal en probetas de hormigón (viguetas de 5x5x20 cm).....	91
Efectos de los NTCPM en la resistencia a la flexión o módulo de rotura en probetas de hormigón (viguetas de 5x5x20 cm).....	98
Efectos de los NTCPM en el Modulo de elasticidad y la relación de poisson en probetas de hormigón (viguetas de 5x5x20 cm).....	108
Efectos de los NTCPMs en la resistencia a la compresión en probetas de hormigón cubicas (5x5x5 cm). ....	113

Segunda etapa.....	114
Curva de valoración y determinación de la dosificación óptima para el diseño de hormigones modificados con NTCPM para pavimento rígido. ....	114
<i>Determinación del factor óptimo de concentración y los parámetros en las características mecánica, reológica y eléctrica en el diseño de hormigones modificados con PHs-f wt%NTCPM.</i> .....	114
<i>Determinación del factor óptimo de concentración y los parámetros en las características mecánica, reológica y eléctrica en el diseño de hormigones modificados con NSS-f wt%NTCPM.</i> .....	118
Dosificación de una mezcla de hormigón modificado con nanotubos de carbono para pavimentos rígidos. ....	121
Resultado tercera etapa.....	125
Análisis comparativo del módulo de rotura en hormigones modificados con nanotubos carbono de pared múltiple, con fibras de polipropileno, con fibras metálicas y el hormigón convencional no modificado. ....	125
BIBLIOGRAFIA.....	128

## Introducción

Es conocido que una de las causas que deterioran las losas de un pavimento rígido son los agrietamientos por fatiga producidos por el incremento de las cargas repetitivas de los vehículos pesados, el presente trabajo de investigación busca la aplicación de nuevas alternativas de incorporación de materiales en el concreto hidráulico, con el propósito de mejorar la resistencia a la fatiga y reducir fisuramiento, esta investigación presenta un análisis de aplicación de la nanotecnología y los efectos que ocasionan en la resistencia a la tracción del concreto por flexión o el criterio por fatiga en los pavimentos rígidos, la incorporación de nanotubos de carbono de pared múltiple (NTCPM) en mezclas de hormigón para pavimentos rígidos con materiales extraídos de cantera del río Malacatos para en lo posterior determinar la concentración más favorable de NTCPM; y realizar un diseño que mejore la durabilidad del hormigón incrementando su módulo de rotura frente a la aplicación de fibras de polipropileno y fibras metálicas de un proyecto de investigación desarrollada por la Universidad Técnica Particular de Loja.

El objetivo de este trabajo de investigación es la de diseñar una mezcla de hormigón con incorporación de nanotubos de carbono de pared múltiple, para analizar el efecto en la resistencia a la tracción del concreto por flexión y mejorar la durabilidad del hormigón al agrietamiento por fatiga, para lograr este objetivo primeramente se observa y estudia la calidad y propiedades de los materiales utilizados en las mezclas de hormigón de la región (Cantera río Malacatos – Loja – Ecuador) y la aplicación de un nuevo material la incorporación de nanotubos de carbono de pared múltiple, se realizan probetas prismáticas a escala con un diseño de mezcla de hormigón para pavimentos rígidos sin y con la incorporación de nanotubos de carbono de pared múltiple para posteriormente hacer un análisis comparativo de los resultados y el efecto que producen en la resistencia a la tracción del concreto por flexión o módulo de rotura la incorporación nanotubos de carbono de pared múltiple frente a las fibras de polipropileno y las fibras metálicas, de la investigación desarrollada con nuevas alternativas de aplicación para mejorar la resistencia a la fatiga en pavimentos rígidos y los resultados de la evaluación se procede a diseñar una mezcla de hormigón con incorporación de nanotubos de carbono de pared múltiple para mejorar el agrietamiento por fatiga incrementando el módulo de rotura.

El diseño metodológico fue desarrollado en cinco diferentes concentraciones de nanotubos de carbono de pared múltiple para un diseño de mezcla de hormigón de módulo de rotura de diseño 3.5 MPa., utilizando una herramienta de mecanismo ultrasónica se logra la dispersión de los NTCPM en un medio acuoso con dos agentes dispersantes el PHs y el NSS para posteriormente ser aplicados en mezclas de hormigón y elaborar probetas prismáticas a escala que son ensayadas bajo la norma NTE INEN 2554 para establecer su módulo de rotura. El factor de concentración óptimo para este diseño de hormigón es de  $f=3$  que al ser sometido a un ensayo de flexión incrementa el módulo de rotura de los hormigones modificados con NTCPM, llegando a tener valores de 5 MPa., las propiedades reológicas del hormigón también se analizan mediante ensayos no destructivos utilizando un equipo de ultrasonido de transmisión directa para determinar el módulo de elasticidad y la relación de poisson de los hormigones modificados con PHs- $f$  + % NCPM y NSS- $f$  + % NCPM.

Durante el desarrollo y evaluación de las probetas de hormigón se determina que los hormigones modificados con NTCPM también poseen características eléctricas siendo posible



medir la resistividad y conductividad eléctrica del hormigón en estado estático, esto nos dio la pauta para analizar a los hormigones cuando son sometidos a una carga donde también se evalúa la resistividad y conductividad eléctrica durante el ensayo de flexión con la viga de tres puntos, obteniendo resultados favorables que ayudaron a definir que a estos hormigones se les fue modificada su estructura al incorporarse los NTCPM en la pasta cementante incorporando propiedades eléctricas al hormigón y haciéndolos más resistentes a la flexión.

El desarrollo de hormigones más resistentes y con características eléctricas aportará a reducir el espesor de las losas de hormigón en los pavimentos rígidos haciéndolas más resistentes al paso de los vehículos, por otro lado las características eléctricas en el hormigón es un amplio camino por desarrollar donde pueden aportar con información capaz de evaluar el grado de deterioro de la estructura del hormigón por medio de mediciones de resistividad y conductividad eléctrica.

La Universidad Técnica Particular de Loja en el desarrollo de sus actividades ha apostado a la nanotecnología como parte de la innovación tecnológica en el país, el presente trabajo de investigación ha demostrado que los avances en esta ciencia son considerables al lograr desarrollar metodologías de dispersión y la aplicación de la nanotecnología en el hormigón.

## **Hormigones**

En los últimos años en el Ecuador se han ejecutado magnificentes estructuras donde el material más utilizado para su elaboración ha sido el hormigón, en el ámbito de la vialidad ha llegado a construirse aproximadamente cerca de 1118 km de carretas con pavimento rígido siendo nuevamente el protagonista el hormigón (Ministerio de Transporte y Obras Publicas, 2011)

El hormigón o concreto es una mezcla compuesta de dos materiales agregados y pasta, la pasta está compuesta de cemento y agua que une a los agregados (gruesos y finos), la mezcla de estos componentes forma una masa viscosa en estado fresco y semejante a una roca cuando este se haya endurecido (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004), adicionalmente para mejorar las propiedades reholplásticas en los hormigones durante el traslado y operación, en el diseño y fabricación de hormigones premezclados se considera la incorporación de aditivos químicos.(Muñoz & Quiroz, 2014).

El hormigón en estado endurecido es un material altamente resistente a los esfuerzos de compresión al igual que las rocas naturales no deterioradas, sin embargo su comportamiento a esfuerzos como el de tracción, flexión, cortante, etc., es muy frágil y débil, en la industria de la construcción es más que común el uso del hormigón combinado con barras de acero resistente o cables tensados de acero de alta resistencia para resistir a la tracción, así se logra aprovechar sus fortalezas y superar sus limitaciones (Romo, 2008); el hormigón debido a su consistencia en estado fresco es adaptable a cualquier forma comportándose así el conjunto de hormigón y acero muy favorablemente ante diversas solicitaciones de esfuerzos. (Caraguay, 2015).

Para lograr mejorar la calidad de los hormigones, nuevos estudios se han centrado en la busca de nuevos materiales y alternativas de composición sobre todo a solicitaciones por tracción, en el área de la nanotecnología y el cemento se han demostrado que los nano compuestos en el cemento han realizado importantes modificaciones en su microestructura lo que ha producido hormigones menos porosos, más resistentes y durables (Marcondes, 2012).

El análisis y caracterización de los materiales a utilizar en la presente investigación para la elaboración de los hormigones se rigen bajo la normativa NTE INEN 1185-1 Hormigones– Hormigón premezclado requisitos y la normativa NTE INEN 872 – Áridos para Hormigones- Requisitos.

## **Pavimentos rígidos**

Según las normas y especificaciones técnicas del Ministerio de Transportes y Obras Públicas, el pavimento rígido consiste en la construcción de una capa de rodadura conformada por una losa de hormigón hidráulico acentuada sobre una sub rasante debidamente conformada y compactada, con o sin la inclusión de aire y puede tener dispositivos de transferencia de carga o armadura de acero de refuerzo según su tipo y diseño (MTOP, 2002).

En el desarrollo de los métodos de diseño para pavimentos rígidos desde que inició su construcción en los Estados Unidos por el año 1893 hasta la actualidad no es tan drástico como

en los pavimentos flexibles, debido a que los pavimentos rígidos durante mucho tiempo se ha sido considerado como un factor de diseño importante e incluso único, el esfuerzo a la flexión en el hormigón (Huang, 2004).

Desde la fórmula de Goldbeck, al Análisis de Westergaard basado en fundaciones líquidas, El análisis de Pickett basado en fundaciones sólidas, Métodos de Elementos Discretos y a los Métodos de elementos finitos, el desarrollo del Método de la Portland Cement Association (PCA) para el diseño de pavimentos rígidos, ha pasado por una evolución importante de criterios de diseño que en la actualidad se conocen como el criterio por fatiga y el criterio por erosión (Huang, 2004).

### Criterio por fatiga

Según la Portland Cement Association (PCA) por su denominación en inglés, el criterio por fatiga en los pavimentos rígidos se utiliza para mantener los esfuerzos inducidos a la losa de concreto dentro de los límites admisibles (PCA, 1984).

La fatiga en las losas de pavimento rígido se relaciona a una tensión de flexión inducida que podría repetirse indefinidamente sin causar ruptura siempre que la intensidad de la tensión en el extremo de la fibra no excediera en aproximadamente el 50% de su módulo de rotura, si la relación de esfuerzos es superior al 50% el número permisible de repeticiones de tensión para causar fallas por fatiga disminuye drásticamente a medida que aumenta la relación de tensiones, esta suposición ha sido utilizada con mayor frecuencia como base de diseño de pavimentos rígidos, el método de la PCA asume una relación de tensiones de 0.45 para obtener una curva de fatiga más lisa por debajo del cual no se considera ningún daño por fatiga (Huang, 2004).

Un test importante para replicar el criterio por fatiga es la determinar el módulo dinámico de rigidez en el concreto del cemento Portland, donde generalmente se aplica una repetida carga de flexión en especímenes en forma de vigas de 381 mm de largo por 76 mm de ancho y 76 mm de profundidad, la carga es aplicada al tercio de la viga con una velocidad de 1 a 2 repeticiones por segundo y una duración de 0,1 s., (Huang, 2004)

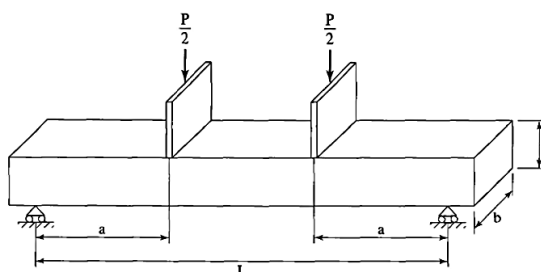


Figura 1. Viga de Tres puntos para ensayo de módulo dinámico.

Fuente: (Huang, 2004)

Elaboración: (Huang, 2004)

Los esfuerzos en el extremo de la fibra en la viga se calculan mediante la siguiente ecuación.

$$\sigma = \frac{3ap}{bh^2} \tag{Ecuación 1.1}$$

El número de repeticiones al fallo en la escala logarítmica,  $\log N_f$ , se representa con una relación de esfuerzos entre el cociente de la tensión  $\sigma$  y del módulo de rotura del hormigón  $S_c$ . El módulo de rotura se determina por el mismo ensayo de viga, pero con una carga estática cada vez mayor, como se especifica en la norma ASTM C78-84 "Método de Ensayo Estándar para Resistencia a la Flexión del Hormigón Usando Viga Simple con Carga de Tercer Punto" (Huang, 2004).

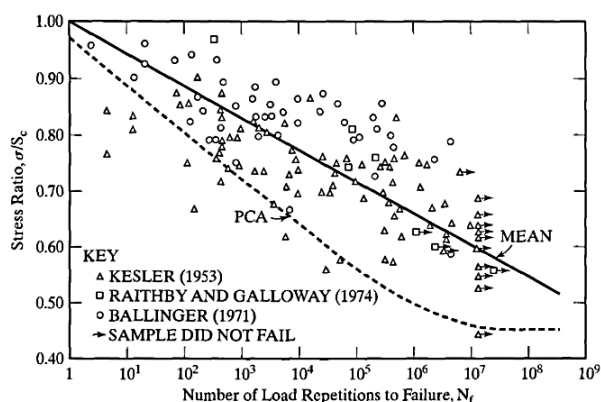


Figura 2. Resultados de los ensayos de fatiga en el concreto en diferentes fuentes.

Fuente: (Huang, 2004)

Elaboración: (Huang, 2004)

La Figura Nro. 2 muestra los datos de fatiga obtenidos por varios investigadores. Se especula que el hormigón no fallará por fatiga cuando la relación de tensiones es menor de 0,5, aunque no se ha encontrado un límite real de hasta 10-20 millones de repeticiones. La línea media para la probabilidad del 50% de la falla se demuestra por la línea continua en la figura Nro. 2 y es expresada como:

$$\text{Log } N_f = f_1 - f_2 \left( \frac{\sigma}{S_c} \right) \quad \text{Ecuación 1.2}$$

Las siguientes ecuaciones de fatiga son recomendadas por la Asociación del Cemento Portland.

$$\text{Para; } \frac{\sigma}{S_c} \geq 0.55 : \text{Log } N_f = 11.737 - 12.077 \left( \frac{\sigma}{S_c} \right) \quad \text{Ecuación 1.3}$$

$$\text{Para; } 0.45 < \frac{\sigma}{S_c} < 0.55 : \text{Log } N_f = \left( \frac{4.2577}{\frac{\sigma}{S_c} - 0.4325} \right)^{3.268} \quad \text{Ecuación 1.4}$$

$$\text{Para; } \frac{\sigma}{S_c} \leq 0.45 : \text{Log } N_f = \text{ilimitado} \quad \text{Ecuación 1.5}$$

### Criterio por erosión

Con el incremento del tráfico pesado luego de la segunda guerra mundial, se llegó a evidenciar que el tipo de sub rasante donde se asientan las losas de hormigón juega un papel importante en el desempeño de los pavimentos rígidos a los efectos que el agua ocasiona en la sub rasante, justo en las juntas de construcción de los pavimentos conocido como el fenómeno de erosión (Huang, 2004).

Para limitar los efectos de erosionabilidad de la capa de apoyo en las zonas críticas, orillas y esquinas, la PCA analiza los esfuerzos de deflexiones críticos empleando el método de elementos finitos (PCA, 1984)., donde la deflexión más crítica en los pavimentos ocurre en las esquinas de la losa de hormigón cuando la carga axial de los vehículos se ubican muy cerca de la junta de expansión (Lee & Carpenter, 2002).

Sin embargo, nuevas tecnologías han logrado la aplicación de elementos finitos para determinar el porcentaje de fallo por fatiga en los pavimentos rígidos, llegando a diseñar programas como la PCAWIN para el diseño de pavimentos rígidos basados en el análisis por fatiga y análisis por erosión estableciendo una nueva ecuación para determinar un esfuerzo equivalente (Lee & Carpenter, 2002)

### **Requisitos mínimas en el diseño de pavimentos rígidos**

- a). Para pavimentos rígidos sobre cimentaciones líquidas, debe especificarse el módulo de reacción de la sub-rasante.
- b). Para considerar el efecto del curling por temperatura, se debe especificar el coeficiente de expansión térmica del hormigón.
- c). La dificultad más común en los pavimentos rígidos es la fisuración por fatiga, por lo que se debe especificar el módulo de rotura y las propiedades de fatiga del hormigón.
- d). Si para el diseño se utilizan otros defectos, tales como fallas causadas por tensiones de apoyo excesivas en las barras, se deben especificar las propiedades apropiadas, tales como el diámetro y la separación de las clavijas

### **Hormigones para pavimentos rígidos**

Un hormigón útil para la construcción de un pavimento rígido debe ser capaz de resistir los efectos de las cargas producidas por el paso de vehículos, a este efecto conocido como fatiga o criterio por fatiga y resistente a las deflexiones críticas más vulnerables conocidas como el criterio por erosión.

El libro de las Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes MOP-F-2002-001, especifica que los hormigones a utilizar en la construcción de capas de rodadura con concreto hidráulico, su resistencia a la flexión en el ensayo de carga, en la viga de tres puntos debe ser no menor a 4 MPa, sin embargo en zonas donde los materiales a utilizar para la elaboración de hormigones no cumplan las condiciones necesarias, se podría adaptar en los diseños un módulo de rotura de hasta 3.5 MPa. (MTO, 2002).

Dependiendo de la forma de construcción y el equipo a utilizar, el diseño de la mezcla debe cumplir varios requisitos establecidos en las Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes MOP-F-2002-001, sin embargo el Instituto Boliviano del Cemento y

Hormigón., y el Ministerio de Transportes y Obras Publicas recomiendan tener en consideración los siguientes aspectos en el diseño de la mezcla.

Resistencia a la flexión a los 28 días entre 4.0 a 4.5 MPa., o de 40 a 50 kg/cm<sup>2</sup>., contenido mínimo de cemento entre 300 a 320 kg/cm<sup>3</sup>., relación agua cemento (a/c) máxima de 0.5. (En áreas con ciclos intensos de congelación deshielo no debe superar a 0.45 y para áreas severamente expuestas a los sulfatos debe limitarse a 0.40), revenimiento del hormigón en formaletas de 2.5 a 5 cm., revenimiento del hormigón con pavimentadora deslizante entre 1.0 a 3.0 cm., aire incorporado dependerá de la condición de exposición a ciclos de hielo-deshielo y el tamaño máximo del agregado., el módulo de finura de la arena entre 2.5 a 3.4 (Instituto Boliviano del Cemento y El Hormigón & Ministerio de Transporte y Obras Publicas, 2012)

### **Propiedades y características del hormigón para pavimentos rígidos**

Si bien es cierto nuestra investigación se centra en la aplicación de los nanotubos de carbono como nueva alternativa de aplicación para mejorar la resistencia a la flexión en hormigones para pavimento rígido, es necesario describir ciertas particularidades que poseen los hormigones al ser utilizados como capa de rodadura en los pavimentos rígidos.

#### **Propiedades del hormigón fresco**

Las propiedades del hormigón en estado fresco son la consistencia, la docilidad o trabajabilidad, la homogeneidad y la masa específica o densidad, todas estas propiedades son consideradas importantes al momento de diseñar y producir un hormigón pues de ellas dependerán las características del hormigón cuando esta haya endurecido (Jiménez, Garcia, & Morán, 2000).

Sin embargo durante el proceso de amasado, la consistencia es la más requerida y la propiedad que mantiene un control más riguroso, en el caso de hormigones para pavimentos rígidos escoger el nivel de consistencia dependerá mucho del equipo utilizado en la construcción, con revenimientos que van desde cero para hormigones compactados con rodillo hasta 5 cm para hormigones compactado con pavimentadora, con formaletas y rodillos vibratorios (MTO, 2002).

#### **Propiedades del hormigón endurecido**

Las propiedades del hormigón en estado endurecido son la densidad, la compacidad, la permeabilidad y la resistencia al desgaste, una característica importante cuando el hormigón se haya endurecido sobre todo en las carreteras es la resistencia al desgaste superficial, y para conseguir este propósito una primera condición es utilizar hormigón de consistencia muy baja ya que la lechada superficial puede aparecer débil, muy fácil desgastable que puede producir polvo y aparecer a la calzada muy liza sin textura con poca adherencia para las llantas de los vehículos que a transitan sobretodo en épocas de invierno (Jiménez et al., 2000)

## **Retracción del hormigón**

Durante el tendido de los hormigones para pavimentos rígidos en estado fresco, el curado, la protección contra el viento y la retracción del hormigón son características sumamente importantes que de no ser controladas adecuadamente pueden llegar a fisurar los paños causando daños irreversibles en el pavimento.

Cuando da inicio el proceso de endurecimiento y fraguado del hormigón, este comienza a presentar cambios volumétricos en su masa y se contrae, a este fenómeno se lo conoce como retracción, (Jiménez et al., 2000), cuando se producen hormigones de una masa considerable como es el caso de los pavimentos rígidos, grandes tramos de hormigón deben ser controlados induciendo un corte a manera de paños o losas con las medidas establecidas en los diseños para prevenir fisuramientos a causa de la retracción del hormigón, este corte debe realizárselo a edades tempranas entre 3 y 4 horas terminada la compactación (MTOP, 2002)

## **El hormigón y el clima**

Cuando se produce un hormigón, las condiciones climatológicas del lugar donde se conciben, juega un papel importante en sus propiedades y la influencia que provocan en el hormigón en estado fresco y en estado endurecido son considerables, dependiendo del lugar donde se elaboren sea este en un clima frío o caluroso dependerá su comportamiento.

### ***Características del hormigón en tiempo frío***

Está demostrado que el hormigón no llega a obtener la resistencia requerida cuando su fraguado y primer endurecimiento tiene lugar en el preciso instante de una helada (Jiménez et al., 2000)., durante el proceso de amasado y endurecimiento del hormigón, producido por el proceso químico de la reacción del agua y el cemento para producir la pasta este genera calor debido denominado calor de hidratación. Si el concreto se congela y se mantiene a una temperatura mayor de  $10^{\circ}$  C, desarrollará resistencias lentamente por debajo de esta la hidratación del cemento y la resistencia se paralizan (Kosmatka et al., 2004).

El hormigón ya endurecido a bajas temperaturas se comporta como una piedra donde la porosidad y el grado de saturación son las características que determinarán su comportamiento frente a la helada, debido a que, al helarse el agua introducida en los capilares este aumenta de volumen y ejerce un efecto de cuña que podría fisurar al hormigón, la mejor estrategia para contrarrestar este efecto es la confección de un hormigón más compacto y la aplicación de aireantes en (Jiménez et al., 2000), en los pavimentos rígidos es común la aplicación de esta tecnología sobre todo en zonas de extrema bajas temperaturas.

## **Características del hormigón en tiempo caluroso**

El efecto más importante a considerar en la producción de hormigones en tiempo caluroso es la pérdida del agua de amasado por la evaporación (Jiménez et al., 2000), durante el proceso de fraguado la temperatura del hormigón aumenta y razón de ese aumento inducen a la pérdida del revenimiento, aparece la sequedad y los vientos provocan una evaporación rápida del agua que afecta la capa superficial del hormigón más aun cuando existen extensas áreas como las del pavimento rígido, durante el proceso de fraguado del hormigón, este no debe superar los 32 grados centígrados para mantener las propiedades de la mezcla en condiciones normales (Kosmatka et al., 2004).

Debido a que el clima es una variable impredecible, la variación de las temperaturas en la masa del hormigón genera movimientos térmicos diferenciales que pueden amplificar su sistema interno de micro fisuras, es por ello que para hormigones sometidos a variaciones de temperatura como es el caso de los pavimentos rígidos es recomendable que los materiales componentes de la mezcla tengan su compatibilidad térmica máxima posible (Jiménez et al., 2000).

Para trabajar en tiempos calurosos y reducir las temperaturas del hormigón suele utilizarse agua fría con pedazos de hielo incrustados en la masa de la mezcla teniendo hay que tener en cuenta que los pedazos de hielo sean derretidos durante un tiempo considerable antes de que inicie el fraguado normal de la mezcla.

## **Características mecánicas del hormigón en pavimentos rígidos**

La resistencia a la compresión y la resistencia a la tracción del concreto por flexión son las características mecánicas más importantes del hormigón (Jiménez et al., 2000), sin embargo durante la etapa de diseño y elaboración de hormigones para pavimentos rígidos la característica mecánica más solicitada es la resistencia a la tracción del concreto por flexión o conocida también como módulo de rotura del hormigón (Huang, 2004).

## **Resistencia a la compresión en hormigones para pavimentos rígidos**

La resistencia a la compresión simple se determina mediante el ensayo de varias probetas cilíndricas bajo la norma INEN-NTE-1573 de la legislación ecuatoriana o la ASTM C 39 y refleja la calidad del hormigón elaborado (Jiménez et al., 2000), normalmente en la construcción de pavimentos rígidos este parámetro es utilizado para corroborar la calidad del hormigón y tener una referencia del módulo de rotura estadístico, para nuestro caso de estudio se aplicará la norma INEN-NTE-488 o la norma ASTM C 109/ 109M, para cemento hidráulico y que se refiera a la determinación de la resistencia a la compresión de morteros en cubos de 50 mm de arista debido a la estructura nanométrica del hormigón que será modificados con Nanotubos de carbono de pared múltiple.



## Resistencia a la tracción del concreto por flexión en hormigones para pavimentos rígidos

La resistencia a la tracción del concreto por flexión o módulo de rotura del hormigón es la característica mecánica de mayor importancia y control cuando se pretende construir un pavimento rígido, ya que determinará la capacidad del hormigón a resistir la fatiga en las losas de un pavimento inducida por una tensión de flexión generada por el paso de los vehículos que la circulan sobre si y que podría repetirse indefinidamente sin causar ruptura siempre que la intensidad de la tensión en el extremo de la fibra no excediera en aproximadamente el 50% de del módulo de rotura (Huang, 2004), existen tres formas de obtener la resistencia a la tracción, por flexo tracción, por hendimiento o tracción indirecta (Método Brasileño) y por ensayo directo de tracción axial (Jiménez et al., 2000), el valor del módulo de rotura se lo determina mediante el ensayo establecido en la norma técnica ecuatoriana NTE INEN 2554., o la ASTM C 78.

También existen correlaciones de algunos autores, normas norteamericanas y europeas que hacen relación al módulo de rotura con la con la resistencia a la compresión simple del hormigón entre las que anotamos a continuación:

Según código del ACI,  $f'c$  en MPa:

$$Mr = 0.62 \lambda \sqrt{f'c} \quad \text{Ecuación 1.6}$$

Los valores de  $\lambda$  dependen de la granulometría del material, según la tabla del capítulo 1, factor de modificación  $\lambda$ , del ACI.

Tabla 1. Factor de modificación  $\lambda$

Concreto	Composición de los agregados	$\lambda$
Todos livianos	Fino: ASTM-C330M Grueso: ASTM C330M	0,75
Liviano mezcla fina	Fino: Combinación de ASTM C330MY C33M Grueso: ASTM C330	0,75 a 0,85 *
Arena, liviana	Fino: ASTM-C33M Grueso: ASTM C330M	0,85
Arena, liviana, Mezcla gruesa	Fino: ASTM-C33M Grueso: Combinación de ASTM C330M y C33M	0,85 a 1,00 **
Peso normal	Fino: ASTM-C33M Grueso: ASTM C33M	1

\* Permite la interpolación lineal de 0,75 a 0,85 con base al volumen absoluto del agregado fino de peso normal como una fracción de volumen absoluto total del agregado fino.

\*\* Permite la interpolación lineal de 0,85 a 1,00 con base al volumen absoluto del agregado grueso de peso normal como una fracción de volumen absoluto total del agregado grueso.

Fuente: (American Concrete Institute, 2015)

Elaboración: El autor.

Según norma colombiana, NSR-98, para valores de  $f'c$  en MPa.:

$$Mr = 0.7 \sqrt{f'c} \quad \text{Ecuación 1.7}$$

Según norma española: para valores de  $f'c$  en N/mm<sup>2</sup> y el valor del módulo de rotura en MPa.:

$$Mr = 0.3 \sqrt[3]{f'c^2} \quad \text{Ecuación 1.8}$$

Según Huang Yang Hsien, para valores de  $f'c$  en PSI:

$$Mr = 8 \sqrt{f'c} \quad \text{Ecuación 1.9}$$

## Características reológicas del hormigón

La determinación de las características reológicas del concreto implica el análisis y la evaluación de las deformaciones diferidas que se producen en el hormigón cuando está sometido a cargas de larga duración, (Urtubey & Lorefice, 2005), es decir la evolución de deformaciones producidas por causas tensionales a lo largo del tiempo, de esta manera el hormigón es considerado un pseudosólido elasto-visco-plástico, por su compleja reología, entendiéndose así por su naturaleza de coexistir en la fase solida conformada por los áridos y el cemento, la fase liquida conformada por el agua y la fase gaseosa considerada por el aire incluido en su estructura (Jiménez et al., 2000).

El fenómeno de retracción del hormigón forma parte de las característica reológicas del concreto y pueden ser estudiadas muy a fondo, sin embargo en el presente trabajo solo consideraremos el análisis y evaluación de las características reologicas conocidas como el módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson.

## Módulo de Elasticidad

Es más que conocido que los materiales utilizados en la construcción de capas de rodaduras en pavimentos rígidos es el concreto hidráulico de cemento portland, que no es elástico, pero existe cierta deformación permanente después de cada aplicación de carga. Esta carga es pequeña comparada con la resistencia del material pero se repite durante un gran número de veces cuando es expuesta al tráfico de vehículos, la deformación bajo cada repetición de la carga es casi completamente recuperable (y proporcional a la carga) entonces puede considerarse elástica, a este fenómeno elástico se lo conoce como módulo resiliente y no es más que el módulo elástico a utilizar con la teoría elástica, (Huang, 2004).

Tabla 2. Módulo de Elasticidad de Diferentes Materiales

Material	Rango	Típico
Concreto de cemento portland	3 x 10 <sup>e6</sup> a 6,0 x 10 <sup>e6</sup>	4 x 10 <sup>e6</sup>
Bases tratadas con cemento	1 x 10 <sup>e6</sup> a 3,0 x 10 <sup>e6</sup>	2 x 10 <sup>e6</sup>
Materiales de suelo cemento	5 x 10 <sup>e6</sup> a 2,0 x 10 <sup>e6</sup>	1 x 10 <sup>e6</sup>
Material de cenizas volantes	5 x 10 <sup>e6</sup> a 2,5 x 10 <sup>e6</sup>	1 x 10 <sup>e6</sup>
Arcilla dura	7600 a 17000	12000

Arcilla semidura	4700 a 12300	8000
Arcilla blanda	1800 a 7700	5000
Arcilla muy blanda	1000 a 5700	3000

Nota: Valores de Módulos en psi.

Fuente: (Huang, 2004)

Elaboración: El autor.

El ACI American Concrete Institute, en base a varios ensayos de laboratorio ha establecido la siguiente expresión que correlaciona el módulo de elasticidad con la resistencia a la compresión simple en el concreto, para valores de densidad ( $W_c$ ) entre los 1440 y 2560 kg/m<sup>3</sup> y valores de resistencia a la compresión en MPa. (American Concrete Institute, 2015).

$$E_c = W_c^{1.5} 0.043 \sqrt{f'_c} \quad \text{Ecuación 1.10}$$

Para el concreto en peso normal el ACI establece la siguiente expresión, para valores  $f'_c$  en MPa.

$$E_c = 4700 \sqrt{f'_c} \quad \text{Ecuación 1.11}$$

La Norma Colombiana ha establecido diferentes expresiones para el cálculo del módulo de elasticidad con valores para materiales de la región y que han sido considerados en las Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistentes NSR-98 (López & Montejó, 2001), para valores con masa unitaria ( $W_c$ ) varíe entre 1 450 y 2 450 kg/m<sup>3</sup>, puede tomarse la resistencia a la compresión en MPa.

Para agregado grueso de origen ígneo:

$$E_c = W_c^{1.5} 0.047 \sqrt{f'_c} \quad \text{Ecuación 1.12}$$

Para agregado grueso de origen metamórfico:

$$E_c = W_c^{1.5} 0.041 \sqrt{f'_c} \quad \text{Ecuación 1.13}$$

Para agregado grueso de origen sedimentario:

$$E_c = W_c^{1.5} 0.031 \sqrt{f'_c} \quad \text{Ecuación 1.14}$$

El valor medio para toda la información experimental, sin distinguir por tipo de agregado, es:

$$E_c = W_c^{1.5} 0.034 \sqrt{f'_c} \quad \text{Ecuación 1.15}$$

Para valores experimentales cuando no se posea la masa unitaria la norma colombiana establece:

Para agregado grueso de origen ígneo.

$$E_c = 5500 \sqrt{f'_c} \quad \text{Ecuación 1.16}$$

Para agregado grueso de origen metamórfico:

$$E_c = 4700 \sqrt{f'c} \quad \text{Ecuación 1.17}$$

Para agregado grueso de origen sedimentario:

$$E_c = 3600 \sqrt{f'c} \quad \text{Ecuación 1.18}$$

El valor medio para toda la información experimental, sin distinguir por tipo de agregado, es:

$$E_c = 3900 \sqrt{f'c} \quad \text{Ecuación 1.19}$$

La norma española recomienda el módulo de elasticidad secante para expresiones de  $f'c$  en N/mm<sup>2</sup> para obtener el Modulo de elasticidad en las mismas unidades (Jiménez et al., 2000).

$$E_c = 8500 \sqrt[3]{f'c} \quad \text{Ecuación 1.20}$$

Según (Eres, 1987), estableció una expresión que relaciona el módulo de rotura y el módulo de elasticidad del concreto, donde  $Sc$  es el módulo de rotura en PSI (Huang, 2004):

$$E_c = (Sc - 488.5) \times 2.3 \times 10^4 \quad \text{Ecuación 1.21}$$

Otra manera para determinar el módulo de elasticidad de un material es con el empleo del ultra sonido a través de mediciones de velocidades de pulso y constantes elásticas ultrasónicas, método desarrollado por la American Society for Testing and Materials, bajo la norma ASTM-D-2845, que relaciona la velocidad de pulso ultrasónica longitudinal y transversal con la densidad del material medido y obtener el módulo de elasticidad (American Society for Testing and Materials, 2000).

$$E_c = [\rho V_s^2 (3V_p^2 - 4)] / (V_p^2 - V_s^2) \quad \text{Ecuación 1.22}$$

Donde:

$V_p$ = Velocidad de propagación del pulso longitudinal pulg./s. o (m/s)

$V_s$ = Velocidad de propagación del pulso transversal pulg./s. o (m/s)

$E_c$  = Modulo de Elasticidad en psi (o Pa.)

$\rho$  = Densidad de la muestra lb/plg<sup>3</sup> o (Kg/m<sup>3</sup>)

En la actualidad existen equipos compuestos de todas las herramientas necesarias que miden a través de transductores de frecuencia los valores de velocidad de propagación del pulso longitudinal y transversal e inclusive mide el módulo de elasticidad de manera inmediata uno de estos equipos es el denominado Pundit-PL200, de Proceq, que utiliza la medición de la velocidad de ultrasonido para definir las características reológicas de un material como el hormigón.

## Relación de Poisson

La relación de Poisson ( $\nu$ ) se define como la relación entre la deformación lateral y la deformación axial, al realizar una prueba para determinar el módulo elástico, se puede obtener la relación de Poisson, sin embargo esta relación tiene un efecto relativamente pequeño en las respuestas de pavimentación, por esta razón en los diseño de espesores para pavimento rígidos es usual asumir un valor razonable para su uso, que para determinarlo en pruebas de laboratorio, La Tabla 1, muestra las relaciones de poisson típicas para los materiales de pavimentación.

Tabla 3. Relación de Poisson en Diferentes Materiales

Material	Rango	Típico
Mezclas asfálticas en caliente	0,30 - 0,40	0,35
Concreto de cemento portland	0,15 - 0,20	0,15
Materiales granulares sin tratamiento	0,30 - 0,40	0,35
Materiales granulares tratados con cemento	0,10 - 0,20	0,15
Materiales finos y suelos granulados tratados con cemento	0,15 - 0,35	0,25
Limo con materiales estabilizados	0,10 - 0,25	0,2
Mezcla de limo y arcilla	0,10 - 0,15	0,15
Arena suelta y arena limosa	0,20 - 0,40	0,3
Arena densa	0,30 - 0,45	0,35
Suelos finos granulados	0,30 - 0,50	0,4
Arcilla suave saturada	0,40 - 0,50	0,45

Fuente: (Huang, 2004)

Elaboración: El autor

Sin embargo la relación de poisson también puede ser medida con equipo de ultrasonido a través de las mediciones de velocidad de propagación de la onda longitudinal y transversal, establecida en la norma ASTM-D-2845,(American Society for Testing and Materials, 2000), el equipo Pundit- PL-200 tiene la capacidad de medir esta relación y calcularla a través de su software de computadora.

La expresión que mide esta característica del hormigón bien definida de la siguiente forma:

$$\mu = (V_p^2 - 2V_s^2) / [2(V_p^2 - V_s^2)] \quad \text{Ecuación 1.23}$$

Donde:

$\mu$  = Relación de poisson.

$V_p$ = Velocidad de propagación del pulso longitudinal pulg./s. o (m/s)

$V_s$ = Velocidad de propagación del pulso transversal pulg./s. o (m/s)

## Durabilidad del hormigón

Los elementos que influyen en la durabilidad de un hormigón son el agua y los mecanismos de transporte de gases, agua y agentes agresivos disueltos a través de la estructura del hormigón, esto ocurre por medio de los poros que existen en la pasta de cemento que es la interfaz entre

los agregados que la conforman y las micro fisuras que existen en la masa del concreto, los poros forman parte crucial en la estructura del hormigón y de estos, los poros capilares y los macro poros son los más significativos y decisivos en la durabilidad del concreto en el tiempo, debido a su tamaño que va desde una milésima de milímetro hasta el orden de un milímetro (Jiménez et al., 2000).

La velocidad de destrucción de la masa de hormigón se debe a una reacción química de las sustancias agresivas provenientes del ambiente exterior, iones y moléculas que se transportan por la red de poros de la estructura hasta encontrar la sustancia reactiva en la masa e iniciar el proceso, con esta determinación de puede definir si no hay transporte no habrá reacción, pero cuando la masa del hormigón se haya sometida a constante humedad el agua llena los vacíos de la estructura impidiendo la salida de los gases reduciendo esta acción agresiva al mínimo y cuando cesa la humedad, empieza a secarse la masa del concreto y nuevamente la reacción de los gases maximiza la acción agresiva volviéndola más vulnerable a los agentes externos deteriorando así su estructura interna, los casos más frecuentes son las estructuras de hormigón expuestas a cambios cíclicos de humedad y sequedad (Jiménez et al., 2000).

Jiménez et al (2000) en su libro de Hormigón Armado basada en el EHE, detalla los agentes agresivos del hormigón que se mencionan a continuación:

Agentes Agresivos.

- a) Acciones mecánicas: Cargas, sobrecargas, impactos, vibraciones, producidas por causas naturales o artificiales.
- b) Acciones físicas: Variaciones de temperatura y humedad, heladas, temperaturas extremas, corrientes eléctricas, erosión, fuego, radiaciones.
- c) Acciones biológicas: Vegetación, microorganismos, bacterias y otras formas microscópicas de vida orgánica.
- d) Acciones químicas: Aires y otros gases en atmosfera natural o contaminada, aguas agresivas, residuales, industriales, aceites, químicos orgánicos e inorgánicos y suelos agresivos.

Ataques químicos al hormigón.

Entre los ataques químicos al hormigón podemos mencionar, la acción de los ácidos al hormigón, el ataque por sulfatos, el ataque por álcalis y sustancias que poseen carácter agresivo para el hormigón.

Para prevenir estas acciones agresivas los materiales a utilizar en la elaboración del hormigón deben ser sometidos a ensayos de laboratorio para cumplir con las mínimas especificaciones para la producción muchos de estos están incluidos en la normativa NTE INEN 1185-1 Hormigones– Hormigón premezclado requisitos y la normativa NTE INEN 872 – Áridos para Hormigones-Requisitos y la norma ASTM C 330.

## Resistividad eléctrica en el hormigón

La ley de Ohm, permite establecer la resistividad de un material como una propiedad volumétrica que indica la resistencia de un material en la medición de la diferencia de potencial entre dos puntos, y la determinación de la corriente entre los mismos.

La resistencia eléctrica de un material se mide aplicando un voltaje y midiendo el paso de la corriente (Intensidad) por un material determinado, esta relación también es igual a la resistividad eléctrica ( $\rho$ ) del mismo material por el factor geométrico longitud sobre área (L/A), es decir la distancia entre los electrodos y el área transversal al paso de la corriente, a la resistividad entonces se la define como la dificultad que tiene el paso de la corriente sobre su propia masa, lo contrario ocurre con la conductividad ( $\sigma$ ), ya que la conductividad se la define como la facilidad que tiene la corriente eléctrica al atravesar el material.(Andrade & Andrea, 2011), esto quiere decir que un material es altamente conductor cuando su resistividad eléctrica es totalmente baja caso de ello el cobre y lo contrario sería para un material altamente resistivo el grado de conductividad es totalmente bajo o nulo caso de ello la porcelana, podemos establecer así un campo eléctrico unidimensional donde la ley de Ohm resulta:

$$R = \frac{\Delta V}{I} \quad \text{Ecuación 1.24}$$

Donde,  
R= Resistencia eléctrica  
 $\Delta V$ = Potencial eléctrico  
I = Corriente eléctrica

A partir de la resistencia eléctrica, puede computarse la resistividad eléctrica, la cual constituye una propiedad del suelo, independiente de las condiciones geométricas,

$$\rho = R \frac{A}{L} \quad \text{Ecuación 1.25}$$

Donde,  
 $\rho$ = Resistividad eléctrica  
A = Sección transversal de columna del suelo  
L = Separación entre los electrodos que determinan la diferencia de potencial  
La unidad de resistividad en el Sistema Internacional es el ohm por metro ( $\Omega \cdot m$ ).

La conductividad se define como el inverso de la resistividad.

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad \text{Ecuación 1.26}$$

La unidad de conductividad en el Sistema Internacional es el Siemens (S).

Con estas medidas eléctricas puede realizarse la medición de la resistividad en el hormigón colocando electrodos en las caras paralelas de las probetas, y evaluar la resistencia al movimiento de los iones de carga eléctrica y su grado de porosidad en la masa del hormigón, cuan mayor es la resistividad menor es la porosidad (Andrade & Andrea, 2011).

La evolución de la resistividad es paralela a la de la resistencia por ello la resistividad permite además de predecir la resistencia, indicar el “factor de edad” que es esencial para los modelos de durabilidad, el curado del hormigón es otro aspecto importante que afecta al comportamiento a largo plazo, La resistividad permite detectar muy bien el secado superficial, y con ello el grado de evaporación o saturación de los poros del hormigón, comparando la resistividad de un hormigón bien curado con otro mal curado es posible encontrar un porcentaje de saturación relativa de los poros que cuantifica el grado de curado, esta relación obtenida por Fernández Luco L. en su tesis doctoral, Valoración de técnicas no destructivas para el control de la eficiencia de curado del hormigón de la Universidad de Alicante en septiembre/2008, resulta un método muy sencillo de control en obra del curado.(Andrade & Andrea, 2011)

La resistividad también puede ser utilizada en una expresión matemática para la predicción tanto del periodo de iniciación hasta que se desarrolla la corrosión de la armadura como para cuantificar el periodo de propagación de la corrosión (Andrade & Andrea, 2011).

### **Mecanismos de Conducción Eléctrica en el Hormigón**

Una masa de hormigón vista a nivel macroscópica está compuesta de áridos, pasta de cemento y poros, desde el punto de vista eléctrico, una masa de hormigón sometida a la conducción eléctrica su comportamiento se deriva en tres fases, los áridos que son elementos poco conductores, la pasta de cemento que es el elemento más conductivo y los poros que no son conductivos., ha sido demostrada que la conductividad eléctrica en el hormigón viene dada esencialmente por la pasta de cemento, donde los iones libres se desplazan por los poros haciendo circular la corriente eléctrica, sin embargo al ser la resistividad una de las magnitudes físicas con mayor amplitud de variación en distintos materiales como el caso de los hormigones, su valor dependerá de varios factores como la naturaleza de los agregados, humedad, temperatura, concentración, sales disueltas, estratigrafía, compactación, clima. Pero sobre todo el valor de la resistividad lo determinará la estructura de la matriz cementante al condicionar la capacidad de circulación de los electrolitos en su entorno (Picos, 2014)

En la figura 3 se puede apreciar la circulación de la corriente en tres caminos.

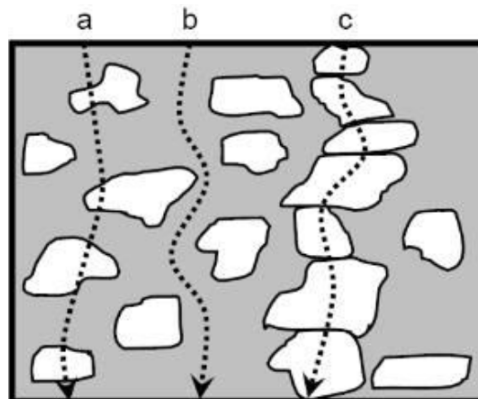


Figura 3. Circulación de la corriente eléctrica a través del hormigón.

Fuente: (Perez-2014)



- a. La corriente eléctrica circula a la vez a través de los áridos y la matriz. La resistividad aparente esta entonces condicionada por las características de las dos fases.
- b. La corriente atraviesa únicamente la matriz conductora, la resistividad aparente es baja.
- c. La corriente circula únicamente por los áridos que están solos para condicionar la resistividad aparente.

### Micro estructura del hormigón

El estudio de la micro estructura del cemento ha sido de gran interés en la comunicad científica que aun continua estudiándose, el hormigón es un compuesto de minerales fragmentos de rocas y pasta de cemento del punto de vista macroscópica, a nivel microscópica el sistema que compone su estructura es más compleja, pues los compuestos del hormigón, áridos y cementos ya no son homogéneos, y su comportamiento en las proximidades de los áridos, fibras y armaduras es diferente al resto de la pasta, esta zona de a proximidad es conocida como zona interfacial que se hayan unidas por las denominadas fuerzas de Van der Waals, fenómenos de crecimiento epitaxial de cristales y su espesor va desde (50-100  $\mu\text{m}$ .) (Puertas Maroto, Palomo Sánchez, & Blanco Varela, 1991).

Si bien es cierto estudiar la microestructura del hormigón es muy compleja rescataremos ciertos conceptos puntuales sobre la reacción de la pasta del cemento con los áridos para conocer y desarrollar el concepto más aceptable desde el punto de vista técnico para la aplicación de los nano materiales.

El origen y desarrollo de la microestructura en la pasta del cemento se debe a una serie de reacciones de hidratación originados por la mezcla de cierta cantidad de cemento con agua, el producto de esta hidratación se divide en tres etapas (Puertas Maroto et al., 1991):

- a) Etapa inicial: Esta actividad está fundamentalmente concentrado en la superficie de los granos de cemento y en el agua de mezcla más cercana a estas superficies.
- b) Etapa intermedia: los productos de hidratación se depositan en el interior de los espacios iniciales rellenos de agua, y comienza a conformarse una estructura coherente.
- c) Etapa final: las partículas de manera estructural se colmata con moléculas de hidratación que provienen del interior de las partículas cementicos originales. Un esquema de estas tres etapas puede ser visualizado.

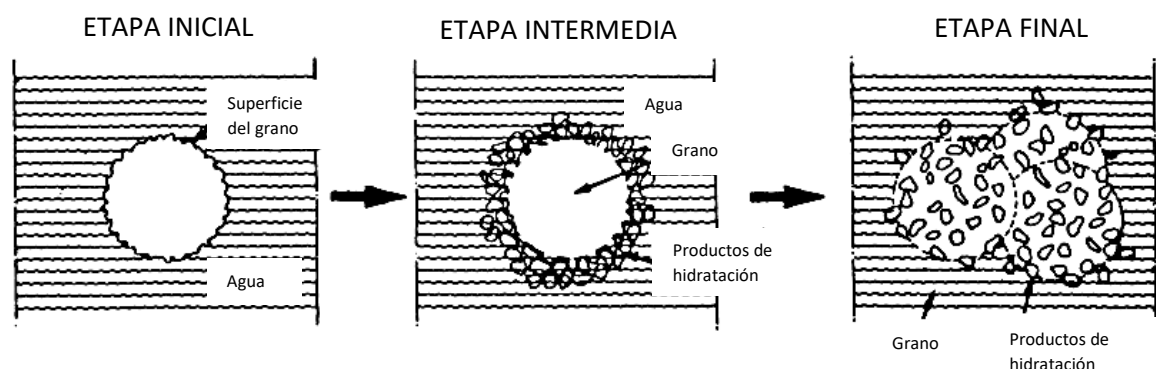


Figura 4. Etapas de hidratación del cemento.

Fuente: (Puertas Maroto et al., 1991)

Elaboración: (Puertas Maroto et al., 1991)

El proceso de hidratación del cemento o proceso de fraguado responde a la siguiente fórmula química:



El clinker está constituido por los SC<sub>2</sub>, SC<sub>3</sub>, AC<sub>3</sub>, y AFC<sub>4</sub>, que en el cemento portland ordinario sus cantidades oscilan generalmente entre 45 y 60, 15 y 30, 6 y 12, y 6 y 8 por ciento respectivamente, cuando el clinker reacciona con el agua da una serie de compuestos denominados: C-S-H o silicatos, C-A-H o aluminatos, Ca(OH)<sub>2</sub> o “portlandita” (Mehta & Monteiro, 2001).

Cuando el cemento portland entra en contacto con el agua y se dispersa, el sulfato de calcio y los compuestos de calcio de alta temperatura entran en solución y la fase líquida satura rápidamente con varias especies iónicas al cemento generando combinaciones de iones de calcio, sulfato, aluminato e hidroxilo luego de unos minutos pasado la hidratación, dando aparecer los primeros cristales en forma de aguja de un hidrato de sulfoaluminato de calcio llamado ettringita, Inicialmente los cristales de C-S-H y la ettringita se complementan rápidamente con cristales de CH; entonces empiezan a aparecer zonas de C-S-H tipo II y las cortezas adyacentes empiezan a enredarse unas con otras, los planos delgados de CH crecen y se agrandan y empieza a aparecer la característica capa de Ca(OH)<sub>2</sub>. Posteriormente, comienza la deposición de gel C-S-H tipo III que se superponen sobre los depósitos masivos de CH, encajándose unos con otros (Mehta & Monteiro, 2001).

### **Microestructura de la interface**

La zona más considerable desde el punto de vista micro estructural en la pasta de cemento en el hormigón, es la región próxima a la superficie de contacto con los áridos, denominada zona de interface (ZI), dentro del ZI se desarrolla una microestructura de la pasta de cemento de un espesor aproximado de 50µm, se caracteriza por tener una relación a/c superior a la existente en el resto del volumen de la pasta, debido a efectos de exudación superficial en las caras del árido, en la ZI los cristales se extiende radialmente hacia afuera desde la superficie del árido y se introduce gradualmente en la pasta de cemento con una elevada porosidad y elevado contenido en CH, que además posee una orientación preferencial con su eje perpendicular a la superficie del árido.(Puertas Maroto et al., 1991)

La pasta de cemento está formada por flocules, cuasi-esféricos de algunos cientos de micras suficientemente fuertes para resistir la dispersión por agitación mecánica mientras se amasan. En consecuencia los cristales de cemento se unen pobremente a las superficies de los áridos, dejando áreas extensas de alto contenido en agua tanto dentro de los flocules como entre ellos, por la rápida sobresaturación de agua de iones Ca<sup>2+</sup> y OH se produce un depósito de una capa de CH sobre la superficie del árido, de un espesor de 0,5µm. Esta capa de CH no aumenta de espesor con el tiempo, probablemente debido a la presencia de SiO<sub>2</sub> disuelto en el agua. Esto produce el segundo depósito que es de gel fibroso de C-S-H, con fibras perpendiculares a la superficie, y de un espesor de 0,5µm: A estas dos capas se le conoce con el nombre de película dúplex. (Puertas Maroto et al., 1991.p,97)

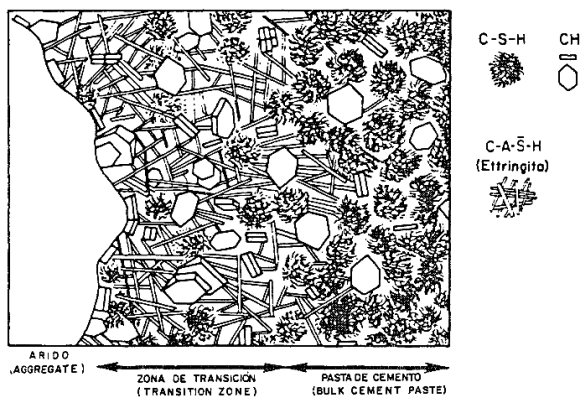


Figura 5. Representación esquemática de la interfaz árido-pasta de cemento

Fuente: (Puertas Maroto et al., 1991)

Elaboración: (Puertas Maroto et al., 1991)

Después de 2 ó 3 días, una segunda capa de CH, con un espesor de  $3\mu\text{m}$ , se deposita en el Dúplex. Son cristales de CH apilados de modo paralelo con su eje orientado perpendicularmente a la citada película. Al mismo tiempo, se generan cristales más largos a forma circular piramidal de CH de eje paralelo a la película dúplex. Estos cristales de CH se extienden hacia la pasta y sólo gradualmente dan lugar a la microestructura usual del gel de C-S-H y CH de la pasta. (Puertas Maroto et al., 1991, p.98)

### Nanotubos de carbono

Los nanotubos de carbono son estructuras nano-atómicas formadas de carbono y se obtienen en forma de cilindros (Marcondes, Medeiros, Filho, & Helene, 2015), fueron descubiertas por Iijima en 1991, y por sus interesantes propiedades mecánicas, térmicas y eléctricas han sido objeto de estudio en varias universidades a nivel mundial (Chen et al., 2011).

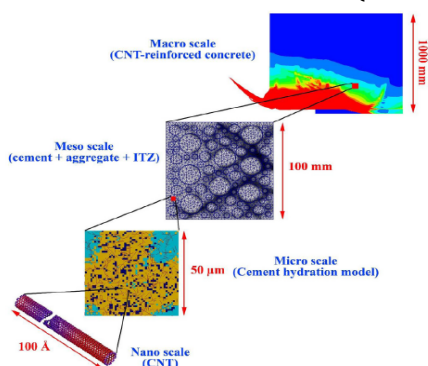


Figura 6. Representación esquemática de los NTC en hormigón armado amurallado.

Fuente: (Eftekhari & Mohammadi, 2016)

Elaboración: (Eftekhari & Mohammadi, 2016).

## **Cuidado y manipulación de los nano materiales**

Al momento de realizar investigaciones con nuevos nano materiales cuyas características toxicas y reacciones al sistema homológico de los seres humanos aún se desconocen es preferente asumir que dichos materiales son tóxicos, las cuatro posibles vías de exposición a los que estamos sometidos con estos nano materiales son, inhalación, ingestión, absorción por la piel y la inyección, cabe establecer entonces un cuidado minuciosos al momento de manipularlos, La Guía de buenas prácticas en Nanotecnología EH&S, recomienda las siguientes practicas al momento de manipulas nano materiales (Health & Safety, 2007).

- a) Usar guantes dobles (de nitrilo), gafas de seguridad y ropa de protección adecuada.
- b) Informar sobre los riesgos y las técnicas apropiadas para el manejo de las nano-partículas.
- c) Comer y beber en áreas designadas.
- d) Al comprar asegurarse de obtener la hoja de datos de seguridad del material (MSDS) y revisarla.
- e) Si se usa productos químicos saber si son peligrosos o tóxicos y tomar las medidas correspondientes.
- f) Manejar las nano-partículas en soluciones, si no es posible, hacerlo en una caja campana captura o guante local con filtro HEPA o una campana de extracción de laboratorio.
- g) Usar un respirador con cartucho o aprobado por NIOSH.
- h) El equipo utilizado debe limpiarse antes de eliminarlo o reutilizar.
- i) Si hay derrames deben limpiarse inmediatamente, usar guantes y aspirar el área son filtro HEPA o usar toallitas húmedas.
- j) Desechar y transportar nano-partículas de desecho en solución adecuada con los procedimientos de desechos peligrosos para el disolvente.

## **Síntesis de los Nanotubos de Carbono**

La nanotecnología en la actualidad ha avanzado e incrementado en sus aplicaciones en los diferentes campos de la ingeniería, de la salud, en temas ambientales, etc., esto ha llevado a los institutos de investigación y universidades a la búsqueda de generar conocimiento sobre la nanotecnología aplicada a nuevos materiales haciéndolos más resistentes y durables. Desde que se conoció la existencia de los nanotubos de carbono se ha iniciado una larga investigación sobre el tema y los esfuerzos por desarrollar esta tecnología va dando sus frutos al conocer ya las características y propiedades de los NTC, esto ha provocado que en la actualidad sea de un enorme interés para la comunidad científica la investigación de los NTC. (Ariza & Casas, 2013).

Los nanotubos de carbono (NTC) suscitan nuevas ideas de implementación en el concreto pues muchas investigaciones ha demostrados que sus capacidades resistentes han mejorado las características mecánicas del hormigón, disminución de los agrietamientos, la capacidad de mejorar la tensión y de las propiedades particulares que poseen los NTC, los nano compuestos cementíceos se vienen estudiando en varias universidades a nivel mundial y que ha justificado la investigación sobre NTC, tales estudios han reflejado sus conocimientos como los realizados por: Marcondes (2012), Batiston et al (2010), Makar et al (2005), Chaipanich et al (2010), Melo

et al (2011), Li et al (2004) y Rios (2016) de entre los que se pueden suscitar que comprueban el buen desempeño de las nano partículas de NTC, cuando son adicionadas en mezclas y morteros de cemento portland (Marcondes et al., 2015).

A nivel de Latinoamérica varias universidades han iniciado investigaciones y han obtenido buenos resultados la adhesión de los NTC en mezclas de hormigón, en Brasil han logrado desarrollar a base de los NTC y la nanotecnología la creación del súper cemento, en Colombia La universidad Javeriana también ha iniciado la investigación de la influencia de los NTC en mezclas con asfaltos, en Ecuador la Universidad Técnica Particular de Loja, ha mostrado grandes avances en esta áreas al lograr dispersar los NTC en soluciones liquidas y mejorar las propiedades de resistencia a la flexión en morteros.

### Características de los nanotubos de carbono

Los NTC tienen la característica de ser cilindros de grafeno formados a manera de hojas enrolladas cuyos diámetros se miden a escala nanométrica y dependiendo del proceso y forma de fabricación se clasifican en nanotubos de carbono de pared simple (NTCPS) o por sus siglas en inglés (Single-Walled - SWCNT) y de paredes múltiples (NTCPM) o (multi-walled - NTCPMs) (figura 7), los SWCNT consisten en una sola capa de grafeno enrollada en un cilindro sin costura mientras que los NTCPM consisten en dos o más capas cilíndricas concéntricas de hojas de grafeno dispuestas coaxialmente unidas por fuerzas de van der Waals entre capas adyacentes en su entorno a un núcleo central hueco. (MA, Siddiqui, Marom, & Kim, 2010)

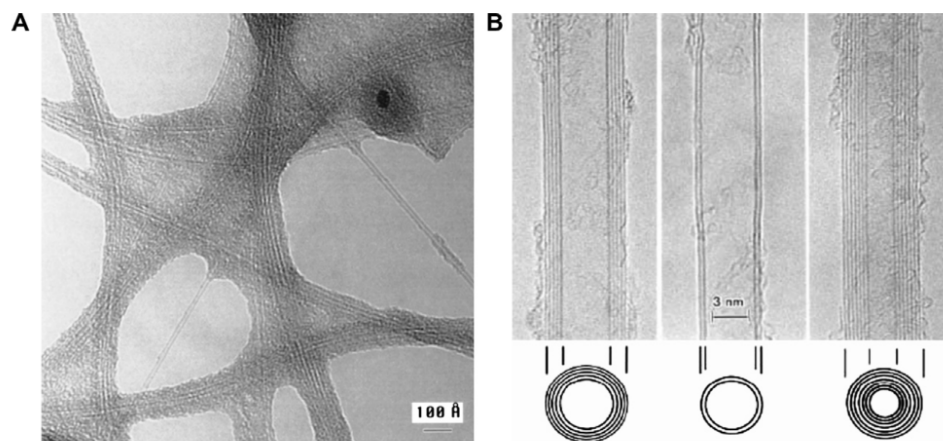


Figura 7. Imágenes de los NTCS (A) NTCPS (B) NTCPM.

Fuente: (MA et al., 2010)

Elaboración: (MA et al., 2010)

Los NTC tienen tres maneras de conservar su estructura circular según el ángulo de rodadura con la que se forman, estas tres maneras son conocidas como chiralidades, y se clasifican en sillón, zigzag y quiral. (MA et al., 2010)

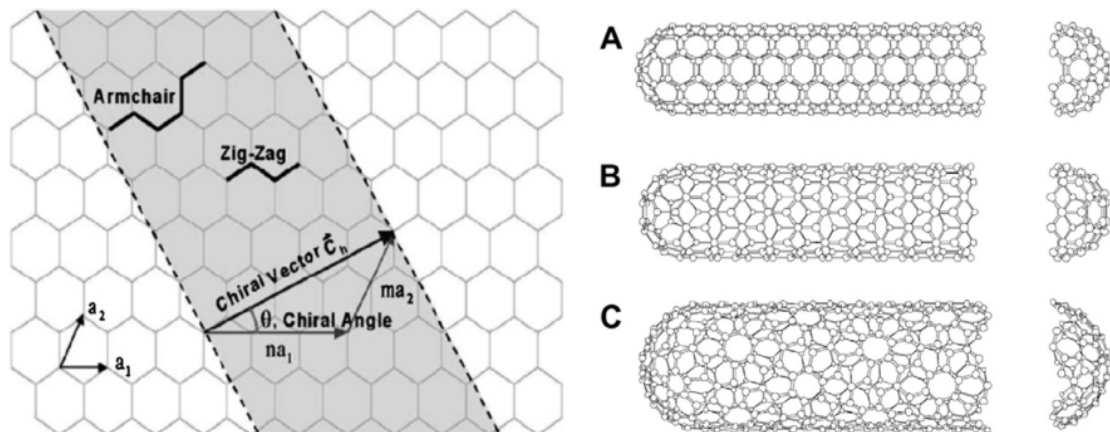


Figura 8. Diagrama esquemático que muestra cómo se enrolla una hoja hexagonal de grafeno para formar una CNT con diferentes quiralidades (A: armchair; B: zigzag; C: chiral)

Fuente:(MA et al., 2010)

Elaboración:(MA et al., 2010)

La quiralidad del tubo se define por el vector quiral  $Ch = na_1 + ma_2$  (figura 8), donde los enteros  $(n, m)$  son el número de pasos a lo largo de los vectores unitarios ( $a_1$  y  $a_2$ ) de la red hexagonal usando este esquema de nomenclatura  $(n, m)$ , los tres tipos de orientación de los átomos de carbono giran alrededor de la circunferencia del nanotubo, si  $n = m$ , los nanotubos se denominan "sillón". Si  $m = 0$ , los nanotubos se llaman "zigzag". De lo contrario, se les llama "quirales". (MA et al., 2010)

La quiralidad de los nanotubos es un aspecto muy importante y significativo en las propiedades de transporte de los NTC sobre todo en las propiedades electrónicas, siendo así un nanotubo dado  $(n, m)$ , si  $(2n + m)$  es un múltiplo de 3, entonces el nanotubo es metálico, de lo contrario el nanotubo es un semiconductor., sin embargo para los NTC de pared múltiple o NTCPM al contener varias capas de grafeno sus características son más complejas ya que cada capa puede tener diferentes quiralidades, y la predicción de sus propiedades físicas es más complicada que la de NTCPS.(MA et al., 2010)

### Propiedades de los nanotubos de carbono

Las propiedades de los NTC son de gran interés para la ingeniería moderna que incluye un alto Módulo de Young de 1000 GPa, una alta resistencia a la tracción de 30 GPa, una densidad de corriente superior de 109A / cm<sup>2</sup> y una alta conductividad térmica de 6000W / mK CNTs y según el National Research Council De Canadá (NRCC), son materiales de refuerzo ideales para hormigón (Safiunddin, Gonzalez, Cao, & Tighe, 2014).

Los enlaces químicos de los NTC están compuestos enteramente de carbón-carbono una estructura mucho más fuerte que los enlaces encontrados en el diamante, lo que proporciona al NTC propiedades mecánicas muy altas, incluso superando a las de cualquier material existente, estudios teóricos y experimentales han mostrado propiedades mecánicas inusuales de CNTs con módulo de Young tan alto como 1,2 TPa y resistencia a la tracción de 50-200 GPa lo que lo convierte al material más fuertes dela planeta.(MA et al., 2010).

Tabla 4. Principales propiedades de los NTC.

Propiedad	SWNT	MWNT
Módulo de Young (GPa)	1000	1000
Resistencia a la tracción (GPa)	30	45
Conductividad térmica (W/mK)	6000	2000
Densidad de corriente (A/cm <sup>2</sup> )	109	109
Gravedad específica (g/cm <sup>3</sup> )	0.8	1.8
Conductividad eléctrica (S/cm)	10 <sup>2</sup> -10 <sup>6</sup>	10 <sup>3</sup> -10 <sup>5</sup>

Fuente: (Safiunddin et al., 2014)

(MA et al., 2010)

(Ríos, 2016)

Elaboración: (Ríos, 2016)

### **Funcionalización de los nanotubos de carbono**

La funcionalización de los NTC no es más que la modificación de sus propiedades por la adsorción de átomos, moléculas o clúster en la superficie exterior de las paredes del nanotubo de carbono o por la inserción de esas especies en su interior generando un nuevo material con nuevas estructuras y propiedades. (Enyashin & Ivanovskii, 2007).

Según Lafragueta Latorre (2013), la funcionabilidad de los NTC aumenta notablemente la solubilidad en diversos solventes incluido del agua, mejorando la interacción con diferentes matrices (Ríos, 2016)., en caso del cemento una buena dispersión de los NTC lograría incrementar las características mecánicas haciendo a la matriz cementante más resistente, pero para lograr este grado de dispersión es necesario que la funcionalización de los NTC en las agentes dispersantes sea optimizada.

La funcionalización por medio de enlaces de tipo covalente ha resultado muy prometedora, ya que se forma un enlace fuerte entre los grupos funcionales adicionados y los NTCPS's. Hay dos tipos de funcionalización es: las covalentes en la cuales se introducen grupos funcionales creando enlace a los NTC, y las funcionalizaciones no covalentes que se basan en la adsorción de moléculas como surfactantes, compuestos aromáticos y polímeros como poliacrilamida, poliestireno, entre otros, que no alteran las propiedades de los NTC 's. En el caso de NTCPM's y su funcionalización con ácido maléico y anhídrido maléico se ha mostrado con excelentes resultados, en donde se ve mejorada su dispersión.(Andrade Guel, López López, & Sáenz Galindo, 2012).

Los mecanismos de reacción de los NTC con los grupos funcionales se dividen en dos métodos la funcionalización química y la funcionalización física, mediante las cuales se establece la interacción entre las moléculas activas y los átomos de carbono en las paredes de los NTC (MA et al., 2010).

#### **Funcionalización química de los nanotubos de carbono.**

La funcionalización química se da básicamente en los extremos de los NTC o en sus paredes a través de enlaces covalentes de entidades funcionales en Amino, otro método covalente es la funcionalización por defecto, el cual es un proceso que realiza la trasmisión química en los sitios de defectos de los CNTs localizados en los extremos o agujeros abiertos en las paredes

laterales, o creados por un proceso oxidativo ya sea usando ácidos fuertes u oxidantes fuertes (MA et al., 2010)

### **Funcionalización física de los nanotubos de carbono**

Es el método más empleado para logra dispersión en medios acuosos aún más si se trata de utilizarlos en pasta de cemento, la funcionalización de los NTC usando el método covalente tiene algunas desventajas durante la reacción de funcionalización en las paredes de los NTC, especialmente cuando se procesa a través de ultrasonido al generar un gran número de defectos en sus paredes laterales y en casos extremos pueden llegar a fracturarse en pequeñas piezas, sin embargo otro método utilizado el no covalente presenta menor daño en la estructura de los NTC y bajo costo, ya que se debe al uso de polímeros que envuelven a los NTC mediante fuerzas de Van der Waals y cadenas de polímeros que contienen anillos aromáticos otro método es el llamado endohedral, en el cual las moléculas o átomos de los huéspedes se almacenen en la cavidad interior del NTC por el efecto capilar. (MA et al., 2010)

### **Dispersión de los NTC en agentes líquidos**

Para lograr mejorar las características y propiedades mecánicas de los NTC en las matrices cementantes una adecuada dispersión de los nanotubos de carbono es la clave, ya que dependiendo de la característica y cantidad utilizada de los NTC pueden ser más o menos propensos a formar aglomeraciones por la energía de atracción de las fuerzas de van der Waals haciéndolos difíciles de separar, lo que puede incluso llegar a empeorar las propiedades del concreto (Ríos, 2016).

En lo que respecta a la distribución de los NTCs en una mezcla de cemento, diversos métodos vienen siendo utilizados destacándose la sonicación y funcionalización, el ultrasonido puede ser considerado una técnica eficaz para la dispersión de nanotubos de carbono en agua, aceite o polímeros, Konsta et al (2010) obtuvieron una dispersión eficiente con la aplicación de energía ultrasónica y el uso de un surfactante. Los resultados mostraron que hubo una buena dispersión con la aplicación de energía ultrasónica en los nanotubos de carbono de paredes múltiples logrando reforzar la mezcla de cemento al aumentar la cantidad de C-S-H y reducir la porosidad (Marcondes et al., 2015).

Los NTCPM son de gran interés sus propiedades debido a una variedad de potencial aplicaciones en sustancia líquidas y composiciones a base de polímeros, su usual propiedades incluyen un alto módulo de elasticidad, una amplia relación con los materiales, excelente capacidad térmica, excelente conductividad eléctrica y propiedades magnéticas y pueden dispersarse de manera uniforme en medios sólidos y líquidos (Hilding, Grulke, Zhang, & Lockwood, 2007).

Reciente estudio Ríos (2016) sobre la dispersión de los NTC en medios líquidos adicionados con una dosis de agentes dispersantes conformados por aditivo a base de naftaleno sulfonato de sodio (NSS) y aditivo a base de polímeros hidroxilados (PHs), ha demostrado maximizar el grado de dispersión y el efecto del agente dispersante en solución acuosa (agua destilada) con valores óptimos de energía de sonicación mediante el empleo del ultrasonido de: (i) NSS a



270 J/ml, (ii) PHs a 250 J/ml, con una determinada concentración de NTCPM, obteniendo resultados favorables en el incremento de la resistencia a la tracción por compresión diametral en morteros y un grado de resistividad y conductividad eléctrica característica de los NTCPM en la mezcla cementante, la resistencia a tracción indirecta de morteros con incorporación de NTCPMs en cantidades de hasta el 3% y dispersados con los aditivos a base de naftaleno sulfonato de sodio (NSS) y polímeros hidroxilados (PHs) contribuyeron al aumento de la resistencia a tracción indirecta con un aporte de 35% y 30% respectivamente (Ríos, 2016).

### **Mecanismo de dispersión de los NTC sonificación con ultrasonido**

Existen diversa variedad de equipos en la actualidad para dispersar los NTC en la solución líquida el mecanismo de dispersión más empleado es el ultrasonido que emplea energía ultrasónica para separar los NTC contenidos en paquetes en contacto con el agua para luego adherirlas con los átomos de los agentes dispersantes y así lograr su dispersión en la solución acuosa. (Ríos, 2016), por otro lado el empleo de este mecanismo es un poco riesgoso ya que la energía de sonificación puede acortar los nanotubos provocando serias desventajas al modificar y disminuir las propiedades de lo NTC (Hilding et al., 2007).

Sin embargo Rios (2016) obtuvo buenos resultados en la dispersión de los NTC en soluciones acuosas al determinar la energía de sonificación apropiada para los agentes dispersantes NSS y PHs con el empleo del ultrasonic Homogenizer Model JY96-IIN.

### **Agentes dispersantes para NTCs**

Los agentes dispersantes empleados en los ensayos de Ríos (2016) son aditivos que se usan para el hormigón y dispersantes químicos, que son no iónicos, aniónicos y catiónicos, entre los más sobresalientes por su grado de interacción con los NTCPM están el aditivo a base de naftaleno sulfonato de sodio (NSS) y aditivo a base de polímeros hidroxilados (PHs) (Ríos, 2016).

#### ***Aditivo a base de polímeros hidroxilados (PHs)***

Es un aditivo líquido tipo A y D, plastificante reductor de agua para hormigones, formulado a base de polímeros hidroxilados (PHs), es un compuesto no iónico derivado de los polisacáridos el cual forma polímeros de peso molecular bajo, contenido de 3 a 25 unidades de glucósido. El efecto estérico previene la aglomeración de NTCPMs (Ríos, 2016)

#### ***Aditivo a base de naftaleno sulfonato de sodio (NSS)***

Aditivo líquido súper plastificante tipo F, reductor de agua de alto rango, formulado a base de naftaleno sulfonato de sodio (figura 15), es un compuesto aniónico para climas fríos, no contiene cloruros (Ríos, 2016)

## Valor óptimo de AD/NTCPM.

El valor óptimo de agente dispersante en relación al NTCPM fue determinado por Ríos (2016) al considerar el mayor valor de absorbancia una vez saturada la superficie del nanotubo de carbono donde la relación AD/NTCPM presente un grado de saturación óptimo en la solución acuosa, cuando el valor de absorbancia no presenta un aumento considerable al seguir incrementando la cantidad de AD, en base a esta técnica se logra determinar el valor óptimo de relación AD/NTCPM (Ríos, 2016).

Para determinar valor óptimo de AD/NTCPM Ríos (2016) realizó diferentes concentraciones del agente dispersante diluyendo en un volumen de 20 ml de agua destilada, a la cual se le agrego el 0.1 % en peso NTCPM mas diferentes concentraciones en porcentaje del agente dispersante con a una energía de sonicación constante para el NSS y PHs.

Tabla 5. Energía, Concentraciones NTCPM y %wt de los ADs. Agentes Dispersantes.

Dispersante	Energía J/ml	NTCPMs, % wt.	ADs. % wt.
Naftaleno sulfonato de sodio	270	0,1	0.05 - 0.07 - 0.08 - 0.1 - 0.12 - 0.15
Polímeros Hidroxilados	150	0,1	0.04 - 0.07 - 0.11 - 0.25 - 0.5 - 1.0

Fuente:(Ríos, 2016)

Elaboración: El Autor

Con estos compuestos aplicando el tratamiento de ultrasonido, en un tiempo cerca de 10 minutos, se diluye la dispersión, obteniendo el espectro de absorbancia de las dispersiones para identificar el pico y realizar las lecturas en esa longitud de onda de las diferentes concentraciones (Ríos, 2016).

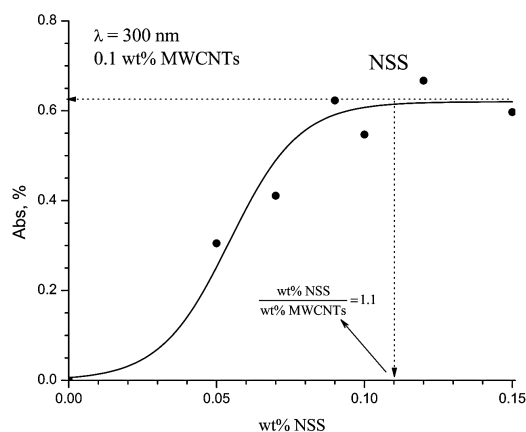


Figura 9. Valor óptimo de AD-NSS/NTCPM

Fuente:(Ríos, 2016)

Elaboración: (Ríos, 2016)

Según Ríos (2016) la tabla 6 determina los valores óptimos de AD/NTCPM para los compuestos a base de NSS y PHs.

Tabla 6. Valores óptimos de diferentes soluciones

Dispersante	¿Dispersión?	V. Óptimo AD/NTCPMs
Naftaleno sulfonato de sodio	SI	1,1
Polímeros Hidroxilados	SI	0,6

Fuente:(Ríos, 2016)

Elaboración: El Autor

### Valor óptimo de energía de sonificación

a una longitud de onda de 300nm (longitud de onda donde se observó la máxima absorbancia Para determinar el valor óptimo de sonificación a las concentraciones optimas de AD/NTCPMs, ya establecidas se obtiene el porcentaje en peso del dispersante para una cantidad de 0.1% NTC en 20 ml de agua destilada, se diluye el agente dispersante mediante una agitación magnética durante unos poco minutos y se aplica energía de sonificación a cada dispersante como se detalla en la tabla 7, y se registra la absorbancia), este proceso que se repite para cada diferente muestra de dispersión con su AD.(Ríos, 2016)

Tabla 7. Energía (J/ml) aplicada en el ultrasonido.

Naftaleno sulfonato de sodio	Polímeros Hidroxilados
0	25
75	75
150	150
270	250
400	400

Fuente:(Ríos, 2016)

Elaboración: El Autor

El progreso del valor máximo de absorbancia se puede observar en la figura 10, cuando aumenta la energía suministrada a la suspensión de H<sub>2</sub>O+AD+0.1%wt NTCPMs y la relación de AD/NTCPMs con su valor óptimo donde se alcanzó la máxima dispersión cuando la cantidad de energía fue de (I) para el aditivo a base de NSS de 270 J/ml, (II) para la GA de 150 J/ml, (III) el aditivo a base de PHs de 250 J/ml y (IV) el aditivo a base de CC de 250 J/ml (Ríos, 2016).

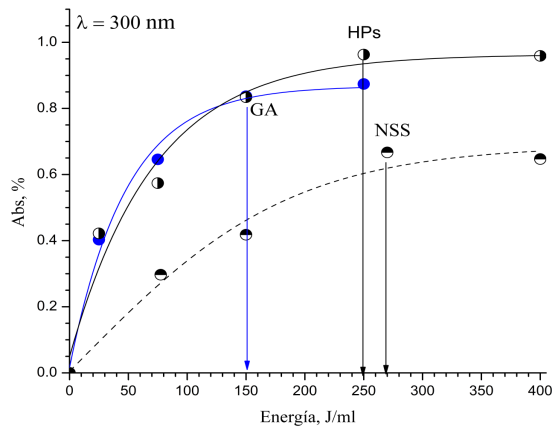


Figura 10. Valor óptimo de energía para la suspensión (H<sub>2</sub>O+AD+NTCPMs).

Fuente:(Ríos, 2016)

Elaboración: (Ríos, 2016)

## Influencia de los nanotubos de carbono en el hormigón

La nanotecnología en las últimas décadas es una ciencia muy importante que se viene estudiando para mejorar ciertas características de los compuestos a nivel microscópica y sobre todo en la estructura molecular de los materiales.

En el ámbito de la ingeniería civil el estudio de la nanotecnología se centra básicamente en los nanotubos de carbono, por sus estupendas propiedades resistentes, eléctricas, térmicas entre las que podemos citar, uno de sus retos se sitúa en la modificación de la estructura molecular del cemento combinado con los NTCs., a la fecha varios estudios han demostrado la influencia que estos pequeñísimos nano materiales provocan en la pasta del cemento llegando a incrementar sus propiedades mecánicas en hasta un 30%, una de las más características más representativas es la resistencia a la flexión, lo que motivo a la realización del presente trabajo de investigación.

Varias investigaciones que han iniciado con la incorporar los NTCs en mezclas cementicias, han utilizado a los NTCPM como a los NTCPS y han estudiado los efectos que estos provocan en las propiedades mecánicas de las pastas de cemento, esos resultados mostraron que las matrices cementantes compuestas con NTCPM tiene un mejor desempeño en las características mecánicas que los compuestos con NTCPS sus resultados se evidencian en la en la tabla 8 (Chen et al., 2011).

Tabla 8. Incremento en las propiedades mecánicas del cemento con incorporación de NTCs.

	Tipo de NTCs	Método de Dispersión	Edad de muestr a (días)	Incremento en las propiedades mecánicas			
				Módulo de Young (%)	Resistencia a la compresión (%)	Resistenci a a la flexión (%)	Módulo de rotura (%)
Campillo et al. (2003)	NTCPM	Mecánica	14	-	30	-	-
	NTCPS	Mecánica		-	6	-	-
Li et al. (2005b)	NTCPM	Covalente	28	-	19	25	-
Li et al. (2007)	NTCPM	Covalente	28	-	29	-	-
	NTCPM	Mecánica		-	22	-	-

Cwirzen et al. (2008)	NTCPM	No-covalente +covalente	-	-	50	-	-
Cwirzen et al. (2009a)	NTCPM	No-covalente +covalente	28	-	-	20	-
Konsta-Gdoutos et al. (2010a)	NTCPM	No-covalente	28*	45	-	25	-
Konsta-Gdoutos et al. (2010b)	NTCPM	No-covalente	28*	35	-	40	-
Musso et al. (2009)	NTCPM	Covalente	28	-	-	-	35
	NTCPM	No-covalente		-	-	-	-60
Nasibulin et al. (2009)	NTCPM	Direct grow	28	-	>100	-	-

Nota: \* Similar incremento también se verifica a 3 y 7 días

Fuente: (Chen et al., 2011)

Elaboración: El Autor

Marcondes et al (2015) en su estudio denominada “Nanotubos de carbono en concreto de cemento Portland. Influencia de la dispersión en las propiedades mecánicas y en la absorción de agua” investigo a la influencia de NTCPMs o comercialmente llamados NC 7000 en la pasta de cemento al realizar una mezcla de hormigón con la dispersión de NTCPMs en agua y aditivos con uso de ultrasonido (CD) y una mezcla de hormigón con NTCPMs con agua y aditivo sin dispersión de ultrasonido (SD)., y determinó como las propiedades mecánicas de resistencia a la compresión y a tracción por compresión diametral se ven afectadas en un 19% SD y 37% CD en la resistencia a la compresión, y 17% SD y 19% CD de resistencia a la tracción por compresión diametral, debido al grado de dispersión NTCPMs en el concreto de cemento Portland, la presencia de los NTCs en la mezcla de concreto también afecto a la fluidez del material con una reducción del +/- 3cm en mezcla de hormigón CD en su consistencia, los NTCs en polvo colocados directamente en el trompo mezclador y sin la dispersión previa, provoco una caída brusca en la trabajabilidad del concreto, disminuyendo su asentamiento para 7 cm, La adición de NTCs también redujo la absorción en el ensayo por inmersión y por el de la pipa. Se verifico que la dispersión por ultrasonido potencio las ventajas ocasionadas por la incorporación de NTC (Marcondes et al., 2015).

Ríos (2016) también determinó un importante incremento en la resistencia a la tracción indirecta en los morteros con la incorporación de NTCPMs en cantidades de hasta el 3% dispersado en PHs y NSS por medio de ultrasonido su aporte fue de 35 y 30% donde una de sus principales características se debe a la buena dispersión que logró los NTCs en la pasta de cemento.(Ríos, 2016)

## **Diseño de Pavimentos rígidos método empírico mecanicista de la PCA**

El método empírico mecanicista fue desarrollado por la Portland Cement Association (PAC) para el diseño de espesores de pavimentos rígidos, el método de diseño de espesores está limitada al número de repeticiones de cargas admisibles basadas en el criterio de análisis por fatiga y análisis por erosión., el concepto de análisis de fatiga es utilizado para prevenir la iniciación de la primera fisura debido a los esfuerzos críticos en el concreto y las principales consideraciones del análisis de erosión es para prevenir la falla en los pavimentos por bombeo, erosión del suelo de fundación y fallas en las juntas provocados por las deflexiones críticas en las esquinas de las losas durante el periodo de diseño del pavimento, estas ecuaciones han sido

utilizadas en múltiples aplicaciones como en el desarrollo de Programa para Diseño de Pavimentos Concretos Articulados (Lee & Carpenter, 2002).

A continuación se describirá paso a paso la aplicación de las ecuaciones de la PCA utilizadas en el diseño de espesores de pavimentos rígidos, con los criterios de fatiga y erosión; y que ayudará al desarrollo de una hoja de cálculo para el desarrollo del presente trabajo de investigación.

**Datos de entrada.**- Le corresponde a las características de los materiales y ciertos aspectos constructivos de la cual se pretende diseñar la estructura del pavimento y son los siguientes:

- Espesor de la losa (tentativo)
- Módulo “k” del apoyo
- Módulo de rotura del concreto
- Módulo de elasticidad del concreto
- Relación de poisson del concreto
- Coeficiente de variación del concreto (cv)
- Factor de seguridad de carga (fsc)
- Pasan por el borde %
- Bermas
- Pasadores

### **Análisis por fatiga.**

En el análisis por fatiga, el procedimiento de diseño de espesor PCA, determina las tensión equivalentes de la losa del pavimento basados en los esfuerzos de flexión de borde máximo resultante del análisis bajo una carga de eje simple (SA) y una carga de eje tándem (TA) para diferentes niveles de grosor de losas y Módulo de reacción de la sub-rasante.(Lee & Carpenter, 2002), el siguiente procedimiento determina el consumo de fatiga en porcentaje de las losas de un pavimento rígido sometido a diferentes espectros de carga.

1. Determinar el esfuerzo equivalente.
2. Calcular factores de relación de esfuerzo
3. Determinar para cada carga el número admisible de repeticiones de carga en función de la relación de esfuerzos.
4. Calcular consumo de fatiga parcial para cada carga
5. Calcular consumo total de fatiga y compararlo con valor admisible (<100%).

### ***Determinar el esfuerzo equivalente.***

Para la determinación del esfuerzo equivalente se realiza el siguiente proceso de cálculo.

- a) **Calculo del esfuerzo equivalente.**- Es el cálculo de la tensión de flexión inducida que podría repetirse indefinidamente sin causar ruptura siempre que la intensidad de la tensión en el extremo de la fibra no excediera en aproximadamente el 50% de su módulo de rotura pero que se encuentra relacionada con un factor de carga (Me), cuatro factores de ajuste (f).

$$\sigma_{eq} = \frac{6 M_e}{h^2} \times f_1 \times f_2 \times f_3 \times f_4 \quad \text{Ecuación 1.27}$$

Donde:

- $\sigma_{eq}$  = Esfuerzo equivalente (Kg./cm<sup>2</sup>)
- $M_e$  = Factor de Carga
- $h$  = Espesor de losa (cm.)
- $f_1$  = Factor de ajuste por área de contacto
- $f_2$  = Factor de ajuste para condiciones de borde
- $f_3$  = Factor de ajuste efecto de ubicación del camión en los esfuerzos de borde
- $f_4$  = Factor de ajuste incremento en la resistencia del concreto

b) **Calculo del factor de carga ( $M_e$ ).**- que está relacionado directamente con el radio de rigidez relativa, dependiendo de dos características de ubicación de los ejes de carga es decir con o sin borde protegido, refiriéndose como borde protegido al espaldón de la vía y del tipo de eje si es Simple o Tándem.

- Factor de carga con borde protegido para eje simple/ dual.

$$M_e = (1202,6 \cdot \text{Log}(\rho) + 53,587 \cdot \rho - 970,4) \cdot (0,8742 + 0,01088K_k^{0,447}) \quad \text{Ecuación 1.28}$$

- Factor de carga sin borde protegido para eje sencillo / dual.

$$M_e = 2525 \cdot \text{Log}(\rho) + 24,42 \cdot \rho + 0,204 \cdot \rho^2 - 1600 \quad \text{Ecuación 1.29}$$

- Factor de carga con borde protegido para eje tándem.

$$M_e = (2005,4 - 1980,9 \cdot \text{Log}(\rho) + 99,008 \cdot \rho) \cdot (0,8742 + 0,01088K_k^{0,447}) \quad \text{Ecuación 1.30}$$

- Factor de carga con borde protegido para eje tándem.

$$M_e = 3029 - 2966,8 \cdot \text{Log}(\rho) + 133,69 \cdot \rho + 0,0632 \cdot \rho^2 \quad \text{Ecuación 1.31}$$

Donde:

- $M_e$  = Factor de Carga
- $\rho$  = Radio de Rigidez Relativa de la losa

c) **Calculo del radio de rigidez relativa.**- que está en función de las características mecánicas del diseño de la mezcla de hormigón a usar.

$$\rho = \sqrt[4]{\frac{Ec \cdot h^3}{12(1-\nu^2) \cdot K_{eff}}} \quad \text{Ecuación 1.32}$$

Donde:

- $\rho$  = Radio de Rigidez Relativa de la losa (pulg.)
- $Ec$  = Módulo del Concreto (psi)

- $h$  = Espesor de la losa (pulg.)
- $u$  = Relación de Poisson
- $K_{eff}$  = Módulo de Reacción del Apoyo de la losa (pci)

d) **Calculo del factor de ajuste.**- el cálculo de esta factor le corresponde al ajuste por área de contacto, ajuste par condiciones de borde, ajuste para efectos de ubicación del camión en los esfuerzos de borde y un ajuste por incremento en la resistencia del concreto.

➤ Factor de ajuste por área de contacto ( $f_1$ ), Análisis de fatiga

Eje sencillo:

$$f_1 = \left(\frac{24}{SAL}\right)^{0,06} X \left(\frac{24}{18}\right) \quad \text{Ecuación 1.33}$$

Eje tándem:

$$f_1 = \left(\frac{48}{TAL}\right)^{0,06} X \left(\frac{TAL}{36}\right) \quad \text{Ecuación 1.34}$$

Donde:

SAL = Carga total en el eje Sencillo (Kips.)

TAL = Carga total en el eje Tándem (Kips.)

➤ Factor de ajuste para condiciones de borde ( $f_2$ ):

Para borde protegido:

$$f_2 = 1 \quad \text{Ecuación 1.35}$$

Para borde no protegido:

$$f_2 = 0,892 + \frac{h}{85,71} - \frac{h^2}{3000} \quad \text{Ecuación 1.36}$$

Donde:

$h$  = Espesor del diseño de la losa (pulgadas)

➤ Factor de ajuste para efecto de ubicación del camión en los esfuerzos de borde ( $f_3$ ):

$$f_3 = 0,894 \quad \text{Ecuación 1.37}$$

Donde la PCA, recomienda un 6% de intromisión de camiones.

➤ Factor de ajuste incremento en la resistencia del concreto a través del tiempo después de los 28 días, además de una reducción de la resistencia por un coeficiente de variación ( $f_4$ ):

$$f_4 = \frac{1}{[1,235 x (1-CV)]} \quad \text{Ecuación 1.38}$$

Donde:

CV = Coeficiente de variación.

### **Calcular factores de relación de esfuerzo.**

Este cálculo se refiere a la relación de esfuerzos entre el cociente de la tensión o esfuerzo equivalente ( $\sigma_{eq}$ ) y del módulo de rotura del hormigón ( $M_r$ ), el procedimiento de diseño de espesor de la PCA permite seleccionar un grosor de losas de ensayo, calcular la relación entre



la tensión equivalente y el módulo de rotura de hormigón ( $\sigma_{eq} / M_r$ ) para cada carga de ejes y tipo de eje.

**Determinar para cada carga el número admisible de repeticiones de carga en función de la relación de esfuerzos.**

Una vez obtenido el factor de relación de esfuerzos se determina las repeticiones de carga máxima permisible (Nf) sobre la base de la siguiente relación  $\sigma_{eq} / M_r$ , que fueron revisadas en el apartado 1.2.1., y se expresan a continuación.

$$\text{Para; } \frac{\sigma_{eq.}}{M_r} \geq 0.55 : \text{Log Nf} = 11.737 - 12.077 \left( \frac{\sigma_{eq.}}{S_c} \right) \quad \text{Ecuación 1.3}$$

$$\text{Para; } 0.45 < \frac{\sigma_{eq.}}{M_r} < 0.55 : \text{Log Nf} = \left( \frac{4.2577}{\frac{\sigma}{-0.4325}} \right)^{3.268} \quad \text{Ecuación 1.4}$$

$$\text{Para; } \frac{\sigma_{eq.}}{M_r} \leq 0.45 : \text{Log Nf} = \text{ilimitado} \quad \text{Ecuación 1.5}$$

Con estas relaciones se puede establecer el criterio de fatiga en los pavimentos rígidos.

- La fatiga en los pavimentos rígidos es el fenómeno ocasionado por la acción reiterada de las cargas de tránsito que generan esfuerzos de flexión en las losas de concreto con una magnitud superior al 45% del  $M_r$ .
- La acumulación del fenómeno de fatiga puede ocasionar la rotura de las losas.
- Las cargas que causen  $\sigma_{eq} < 0.45M_r$ , pueden repetirse indefinida/ ya que no producen fatiga

**Calcular consumo de fatiga parcial para cada carga.**

El consumo de fatiga parcial se establece con la relación del número de repeticiones de carga esperadas (Ni) obtenido del espectro de carga calculado sobre las repeticiones de carga máxima permisible (Nf) expresada en porcentaje.

$$CF_{ki} = \frac{Ni}{Nfi} \times 100 \quad \text{Ecuación 1.39}$$

$CF_{k(i)}$ . = Consumo de fatiga que genera cada grupo de cargas

Ni. = Número de repeticiones de carga esperadas para el grupo i

Nfi. = Número de repeticiones de carga máxima permisible para el grupo i

**Calcular consumo total de fatiga y compararlo con valor admisible (< o = 100%).**

Se calcula el total de fatiga acumulada de todos los grupos de carga y se determina que debe cumplir  $CF_K < o = a 100\%$ .

$$CF_k = \sum_{i=1}^m CF_{k(i)} \quad \text{Ecuación 1.40}$$

$CF_{k(i)}$  = Consumo de fatiga que genera cada grupo de cargas  
 $CF_k$  = Consumo total por fatiga  
 $m$  = Número de grupos de carga de diseño

### **Análisis por erosión.**

La desviación más crítica del pavimento ocurre en la esquina de la losa cuando una carga del eje se coloca en la junta cerca de la esquina, así se desarrollaron ecuaciones equivalentes de deflexión de esquina ( $\delta$ ) y métodos de cálculo para su análisis basado en el criterio de erosión de las losas de pavimento rígido, el procedimiento de cálculo para limitar los efectos de la deflexión del pavimento en los bordes de las losas, juntas, esquinas y controlar así la erosión de la fundación y de los materiales de las bermas es el siguiente:

1. Calcular la deflexión en la esquina de la losa.
2. Calcular el factor de potencia de deformabilidad del suelo.
3. Calcular factor de ajuste por erosionabilidad de la base de apoyo ( $c_1$ ).
4. Calcular factor ( $c_1 \cdot p$ ).
5. Determinación de las repeticiones admisibles bajo criterio de erosión
6. Calcular para cada carga por eje el consumo parcial por erosión.
7. Calcular el factor de consumo total por erosión y compararlo con valor admisible (< 100%).

### **Calcular la deflexión en la esquina de la losa.**

Se lo determina para establecer la deflexión que existe en la esquina de las losa y viene expresada por:

$$\delta_{eq} = \frac{P_c \cdot f_{ls} \cdot f_w \cdot f_{lt}}{K_{eff}} \quad \text{Ecuación 1.41}$$

Donde:

$P_c$  = Factor de Presión  
 $f_{ls}$  = Factor de pérdida de soporte  
 $f_w$  = Factor de Carga  
 $f_{lt}$  = Factor de transferencia de Carga  
 $K_{eff}$  = Módulo de reacción del Apoyo de la Losa

- 1) **Cálculo del factor de presión.**- es la zona que la interface de presión entra la losa de pavimento rígido y el suelo de fundación se lo determina con las siguientes expresiones y para distintas características de ubicación de las cargas.

Pavimentos sin transmisores de corte y sin borde protegido:

Para eje sencillo simple/dual.

$$p_c = 1,517 + \frac{46,127}{\rho} + \frac{4372,7}{\rho^2} - \frac{22886}{\rho^3} \quad \text{Ecuación 1.42}$$

Para eje tándem o tridem.

$$p_c = 1,847 + \frac{213,68}{\rho} - \frac{1260,8}{\rho^2} + \frac{22989}{\rho^3} \quad \text{Ecuación 1.43}$$

Pavimentos sin transmisores de corte y con borde protegido:  
Para eje sencillo simple/dual.

$$p_c = + 0,5874 + \frac{65,108}{\rho} + \frac{1130,9}{\rho^2} - \frac{5245,8}{\rho^3} \quad \text{Ecuación 1.44}$$

Para eje tándem o tridem.

$$p_c = 1,470 + \frac{102,2}{\rho} - \frac{1072,0}{\rho^2} + \frac{144519}{\rho^3} \quad \text{Ecuación 1.45}$$

Pavimentos con transmisores de corte y sin borde protegido:  
Para eje sencillo simple/dual.

$$p_c = - 0,3019 + \frac{128,85}{\rho} + \frac{1105,8}{\rho^2} + \frac{3269,11}{\rho^3} \quad \text{Ecuación 1.46}$$

Para eje tándem o tridem.

$$p_c = 1,258 + \frac{97,491}{\rho} + \frac{1484,1}{\rho^2} - \frac{180}{\rho^3} \quad \text{Ecuación 1.47}$$

Pavimentos con transmisores de corte y sin borde protegido:  
Para eje sencillo simple/dual.

$$p_c = + 0,018 + \frac{72,99}{\rho} + \frac{323,1}{\rho^2} + \frac{1620}{\rho^3} \quad \text{Ecuación 1.48}$$

Para eje tándem o tridem.

$$p_c = 0,0345 + \frac{146,25}{\rho} - \frac{2385,6}{\rho^2} + \frac{23848}{\rho^3} \quad \text{Ecuación 1.49}$$

2) **Cálculo del factor de transferencia de carga  $f_{lt}$ .**- se lo determina con las siguientes expresiones y para distintas características de ubicación de las cargas.

Pavimentos sin transmisores de corte:  
Sin borde protegido.

$$f_{lt} = 0,95 \quad \text{Ecuación 1.50}$$

Con borde protegido.

$$f_{lt} = 1,001 - \left(0,26363 - \frac{K_{eff}}{3034,5}\right)^2 \quad \text{Ecuación 1.51}$$

Pavimentos con transmisores de corte:

$$f_{lt} = 1,00 \quad \text{Ecuación 1.52}$$

3) **Cálculo del factor de pérdida de soporte  $f_{ls}$ .**- se lo determina con las siguientes expresiones y para distintas características de ubicación de las cargas.

Sin borde protegido.

Con borde protegido.

$$f_{ls} = 1,000 \quad \text{Ecuación 1.53}$$

$$f_{ls} = 0,896 \quad \text{Ecuación 1.54}$$

4) **Cálculo del factor de carga  $f_w$ .**- se lo determina con las siguientes expresiones y para distintas características de ubicación de las cargas.

Eje simple.

$$f_{ls} = \frac{Q_{eje}}{18} \quad \text{Ecuación 1.55}$$

Eje tándem.

$$f_{ls} = \frac{Q_{eje}}{36} \quad \text{Ecuación 1.56}$$

Eje tridem.

$$f_{ls} = \frac{Q_{eje}}{54} \quad \text{Ecuación 1.57}$$

Donde:

$Q_{eje}$  = Carga del Eje (Kips)

**Calcular el factor de potencia de deformabilidad del suelo.**

Se la define como el producto de la deflexión de la esquina y la presión en la interfaz de losa-fundación dividida por una medida de la longitud de deflexión, se lo determina con la siguiente expresión:

$$P = 268,7 \cdot \left( \frac{(K_{eff})^{1,27} \cdot (\delta_{eq})^2}{h} \right) \quad \text{Ecuación 1.58}$$

Donde:

$\square_{eq}$  = Deflexión Esquina

h = Espesor de diseño de la losa (pulg)

$K_{eff}$  = Módulo de reacción del apoyo de la losa (PCI)

**Calcular factor de ajuste por erosionabilidad de la base de apoyo ( $C_1$ ).**

$C_1$  es un factor de ajuste que tiene un valor cercano a 1,0 para bases no tratadas y disminuye a aproximadamente 0,90 para bases estabilizadas viene definida por:

$$C_1 = 1 - \left[ \left( \frac{K_{eff}}{2000} \right) \cdot \left( \frac{4}{h} \right) \right]^2 \quad \text{Ecuación 1.59}$$

Donde:

$K_{eff}$  = Módulo de Reacción de la Sub rasante (pci)

h = Espesor de diseño de la losa de concreto (pulg)

**Calcular factor ( $C_i * p$ ).**

Definida como el producto del factor de ajuste por erosionabilidad de la base de apoyo y el factor de potencia de deformabilidad del suelo y el número de repeticiones admisibles dependerá del valor obtenido del producto de estos dos factores para  $(C_1 * P) < 0 = 9$  ;  $(C_1 * P) > 9$ .

$$C_1 * P \quad \text{Ecuación 1.60}$$

### ***Determinación de las repeticiones admisibles bajo criterio de erosión.***

Para calcular el número permisible de repeticiones (Ne) basado en los criterios de erosión de PCA, se desarrollaron las siguientes ecuaciones:

Si  $(C_1 * P) > 9$ . Se aplica la siguiente ecuación:

$$\text{Log}(N_{i(e)}) = 14,524 - 6,777 \cdot (C_1 \cdot P - 9)^{0,103} - \text{Log}(C_2) \quad \text{Ecuación 1.61}$$

Si  $(C_1 * P) < 0 = 9$ . Se aplica la siguiente ecuación:

$$N_{i(e)} = \text{Infinito} \quad \text{Ecuación 1.62}$$

Siendo

$C_2 = 0.06$  (SIN Borde Protegido)

$C_2 = 0.94$  (CON Borde Protegido)

### ***Calcular para cada carga por eje el consumo parcial por erosión.***

El consumo de erosión parcial se establece con la relación del número de repeticiones de carga esperadas ( $N_i$ ) obtenido del espectro de carga calculado, sobre las repeticiones de carga máxima permisible ( $N_f$ ) expresada en porcentaje.

$$D_{ki} = \frac{N_i}{N_{fi}} \times 100 \quad \text{Ecuación 1.63}$$

$D_{k(i)}$ . = Efecto de daño por erosión que genera cada grupo de cargas

$N_i$ . = Número de repeticiones de carga esperadas para el grupo i

$N_{fi}$ . = Número de repeticiones de carga máxima permisible para el grupo i

### ***Calcular el factor de consumo total por erosión y compararlo con valor admisible (< 100%).***

Se calcula el total de daño por erosión acumulada de todos los grupos de carga y se determina que debe cumplir  $D_K < 0 = a 100\%$ .

$$D_k = \sum_{i=1}^m D_{k(i)}$$

Ecuación 1.64

$D_{k(i)}$  = Efecto de daño por erosión que genera cada grupo de cargas

$D_k$  = Daño acumulativo total por Erosión

$m$  = Número de grupos de carga de diseño

### **Hormigones con fibras de Polipropileno**

Los hormigones a base de fibra de polipropileno se lo elaboran al agregar las fibras en la mezcla de hormigón, se considera entonces a la fibra como un componente material adicional del hormigón, la configuración de la fibra se presenta como una red de filamentos de polipropileno enrollado en pequeños paquetes de longitud determinada y está fabricada de 100% polipropileno, otorgándole al hormigón una mayor resistencia a la flexión son muy comunes el uso de estos componentes en los pavimentos rígidos por su increíble mejora al módulo de rotura logrando incrementarlo en un 7%.(Caraguay, 2015)

### **Hormigones con fibras de acero.**

Los hormigones con fibras de acero tiene un mayor desempeño en lo que respecta a las propiedades mecánicas del hormigón otorgándole un incremento de un 27% al módulo de rotura esto se debe a que las fibras metálicas se adhieren a las pasta de cemento como un componente más de la mezcla y ayuda a que las micro fisuras del hormigón disminuyan su crecimiento progresivo logrando de esta manera hacer a la mezcla más resistente (Caraguay, 2015).

### **Primera etapa**

#### **Caracterización de los materiales utilizados en la mezcla de hormigón.**

El diseño del hormigón para pavimentos rígidos tendrá como base un módulo de rotura de 3.5 MPa., y estará compuesto por áridos gruesos y finos provenientes de la cantera del río Malacatos, el diseño base de referencia será un hormigón convencional elaborado de áridos grueso, fino, agua destilada y cemento, denominado muestra de referencia (MS\_RF) en las dosificaciones apropiadas para alcanzar el MR de diseño, los hormigones modificados con NTCPM tendrán dos componentes adicionales una primera mezcla de áridos grueso, fino, agua destilada, cemento, NSS y NTCPM ( $H_s + NSS + \%NTCPM$ ) y una segunda mezcla de áridos grueso, fino, agua destilada, cemento, PHs y NTCPM ( $H_s + PH_s + \%NTCPM$ ).

## Caracterización del Cemento.

Según el Instituto Nacional de Preinversión y el Ministerio de Industrias y Productividad la industria cementera en el Ecuador se caracteriza por tener una estructura oligopolio con una rivalidad y capacidad instalada entre cuatro de los más grandes competidores del país como son Holcim, Lafarge, Cementos Chimborazo e Industrias Guapán, siendo Holcim la marca que mayor nivel de recordación ostenta a nivel nacional (Ministerio de Industrias y Productividad, 2013).

El cemento utilizado para la elaboración del hormigón en la presente investigación es del tipo uso general (GU), si bien este tipo de cemento cumple con la calidad especificada en las normas ecuatorianas cuando se convierte en hormigón se comporta satisfactoriamente en diferentes condiciones atmosféricas, sin embargo en algunos ambientes se ve afectado su durabilidad al ataque por parte de ciertos agentes químicos generando la presencia de fisuras y separaciones debidas a concentración de tensiones y choque térmico, para minimizar el deterioro o reducir la velocidad con la que se produce en estos casos deben tomarse medidas específicas (Holcim Ecuador, n.d.).

Tabla 9. Característica Física del cemento Tipo GU.

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	INEN 2380-GU	2011	2014	2015	Orbe & Zúñiga 2013
Cambio de longitud por autoclave, % máximo	0.80	-0.038	-0.034	-0.06	
Tiempo de fraguado, método de Vicat B					
Inicial, no menos de, minutos	45	222	220	190	301
Inicial, no más de, minutos	420	323	318	190	456
Contenido de aire del mortero, en volumen, %	-	3.0	3.2	3.0	
Resistencia a la compresión, MPa, mínimo					
3 días	13	17	18	17	
7 días	20	22	23	22	
28 días	28	31	30	31	
Expansión en barra de mortero	0.020	0.006	0.02	0.002	
14 días, % máximo					
Densidad					2.94
Real gr/cm <sup>3</sup>					1.04
Suelta gr/cm <sup>3</sup>					1.27
Compactada gr/cm <sup>3</sup>					
Consistencia Normal %					29

Nota: El contenido de aire del mortero, en volumen, % solo es informativo según la norma NTE-INEN 2380.

Fuente: (Holcim Ecuador, 2011), (Holcim Ecuador, 2014), (Holcim Ecuador, 2015), (Orbe & Zuñiga, 2013)

Elaboración: El Autor.

En la actualidad la norma que rige para la calidad de los cementos en el Ecuador es la norma NTE INEN 2380, equivalente a la ASTM-C1157, sin embargo los requisitos de esta norma no especifica la composición química del cemento, en cuanto a las propiedades físicas en la Tabla 1 se ha analizado el grado de cumplimiento del cemento tipo GU.

### **Caracterización del árido fino.**

El árido fino como agregado fino o arena natural proviene de la cantera del río Malacatos, ubicado al sur de la ciudad de Loja, aproximadamente a 4 km de la comunidad de Malacatos en el cantón Loja, Provincia de Loja, al sur del Ecuador, los áridos finos de esta cantera son propiamente aluviales extraídos directamente del río para su uso.

Durante la ejecución de los ensayos para clasificar el material y determinar sus características físicas, se eliminó previamente cualquier material orgánico por medio de lavado, los resultados obtenidos de la granulometría fueron corregidos para obtener la gradación necesaria que solicita la norma, así presentamos los siguientes datos físicos del agregado fino.

Tabla 10. Propiedades físicas del árido fino

<b>Parámetro</b>	<b>Diseño Preliminar</b>	<b>Diseño Corregido</b>
Tamaño máximo nominal	-	-
Módulo de finura	3,06	3,14
Densidad relativa seca al horno (DSH)	2,580	2,621
Densidad relativa saturada superficialmente seca (DSSS)	2,622	2,654
Densidad relativa aparente (DRA)	2,700	2,712
Porcentaje de absorción (%)	1,75%	1,27%
Peso unitario suelto (kg/m <sup>3</sup> )	1687,79	1686,79
Peso unitaria compactada (kg/m <sup>3</sup> )	1898,64	1897,64

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

### **Caracterización del árido grueso.**

El agregado grueso se caracteriza por ser roca triturada y aluvial obtenida de la cantería del río Malacatos, los fragmentos de roca son extraídos de la fuente y son sometidos a trituración mecánica por medio de un sistema de trituradoras y zarandas donde se clasifica el material en diferentes tamaños para su comercialización y uso en la construcción para la ciudad de Loja y áreas aledañas.

Previo a los ensayos para determinar sus características físicas el material fue sometido a un lavado donde se retiró toda materia orgánica y fragmentos pulverizados de roca, sus resultados se representan en el siguiente cuadro.

Tabla 11. Propiedades físicas del árido grueso

<b>Parámetro</b>	<b>Diseño Preliminar</b>	<b>Diseño Corregido</b>
Tamaño máximo nominal	19 mm	12 mm
Módulo de finura	7,20	6,43
Densidad relativa seca al horno (DRSH)	2,600	2,587
Densidad relativa saturada superficialmente seca (DRSSS)	2,634	2,621
Densidad relativa aparente (DRA)	2,700	2,677



Porcentaje de absorción (%)	1,47%	1,29%
Peso unitario suelto (kg/m <sup>3</sup> )	1562,46	1557,46
Peso unitaria compactada (kg/m <sup>3</sup> )	1767,73	1766,73
Abrasión	31,41%	31,41%

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

### ***Caracterización del agua.***

El agua utilizada para la elaboración del hormigón es agua destilada la misma que cumple con los requisitos previstos en la normativa NTE INEN 1108 - Agua Potable, en cumplimiento a la normativa NTE INEN 1185-1-Hormigones – Hormigón premezclado requisitos.

### ***Caracterización de los agentes dispersantes.***

Los agentes dispersantes a utilizar en el presente trabajo de investigación son los denominados aditivos súper plastificante reductores de agua para hormigón, el SF-106 o naftaleno sulfonato de sodio y el súper plastificante 100N formulado a base de polímeros hidroxilados.

#### *Aditivo a base de naftaleno sulfonato de sodio (NSS).*

El NSS es un aditivo líquido super plastificante, reductor de agua de alto rango, tiene una densidad (g/cm<sup>3</sup>) de entre  $1.18 \pm 0.02$ , un valor de pH de 12 a 13, es líquido color pardo, no contiene cloruros y cumple los requerimientos de la norma ASTM C-494 tipo F, se puede utilizar para todos los hormigones donde se requiera características de fraguado normal, alta plasticidad y desarrollo rápido de resistencias, es compatible con los cementos portland que cumplen con las especificaciones ASTM, ASSHTO, o JCRD, incrementa la retención del asentamiento y permite que sea dosificado en planta de concreto (ADITEC, 2015).

#### *Aditivo a base de polímeros hidroxilados (PHs).*

El PHs un aditivo líquido plastificante reductor de agua, tiene una densidad (g/cm<sup>3</sup>) de entre  $1.145 \pm 0.015$ , un valor de pH de 8 a 9, es líquido color café oscuro, no contiene cloruros y cumple los requerimientos de la norma ASTM C-494 para los tipo A y D, facilita el bombeo y mejora la trabajabilidad de hormigones que reducen el asentamiento de 8cm hasta 20cm manteniendo sus efectos reductores en hasta dos horas sin producir exudación, son ideales para la fundición de pavimentos y contrapisos.

### ***Caracterización de los NTCs.***

Los nanotubos de carbono utilizados para el desarrollo del trabajo de investigación fueron adquiridos desde china y fabricados por la empresa Chengdu Organic Chemicals Co. Ltd, Chinese Academy of Sciences, los cuales se observan como un polvo negro (figura 11), son nanotubos de carbono de pared múltiple (NTCPM) de grado industrial, OD de 20-40nm, longitud de 10-30um y su pureza es >90 wt%.



Figura 11. Nanotubos de carbono de pared múltiple grado Industrial.

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor.

### **Diseño de la mezcla de Hormigón método ACI para pavimentos rígidos.**

El método de diseño del ACI para hormigones requiere como parámetros básicos ciertas propiedades mecánicas de los agregados y del cemento que fueron analizados en la caracterización de los materiales en la sección 2.2.1 y como datos base para el diseño del hormigón, como parámetro mínimo de la resistencia a la tracción por flexión, el módulo de rotura de diseño es de 3.5 MPa., aduciendo a las condiciones más desfavorables establecidas en las Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes - MOP-001-F 2002, sección 405-9, Pavimento de Hormigón Compactado con Rodillo (HCR) y de Hormigón Compactado con Pavimentadora (HCP), numeral 405-9.7.1.- Ensayos, literal b.

Los áridos para los hormigones son provenientes de la cantera del río Malacatos, de la ciudad de Loja, Provincia de Loja en Ecuador.

### ***Diseño preliminar de la mezcla de Hormigón método ACI para pavimentos rígidos.***

Inicialmente se diseña un hormigón para un MR igual a 3.5 MPa., y se elaboran especímenes cilíndricos para ser ensayados mediante la norma INEN 1 573 y verificar el Modulo de rotura teórico con un tamaño máximo nominal del agregado grueso de  $\frac{3}{4}$ ", para diseño preliminar de la mezcla de hormigón se establecieron parte de los lineamientos descritos por Caraguay (2015).

- 1) Establecemos el valor teórico de la resistencia a la compresión simple en función del módulo de rotura de diseño de 3.5 MPa., aplicando las ecuaciones 1.6, 1.7, 1.8 y 1.9 de la sección 1.4.5.2. se obtiene un valor promedio de  $f'c$  igual a 317 kg/cm<sup>2</sup>, sin embargo la experiencia en el diseño y fiscalización de pavimentos rígidos en obras viales, es optar por el valor de MR multiplicado por 100 que es igual a 350 kg/cm<sup>2</sup> o multiplicado por

10 si se desea el valor en MPa., que en este caso sería igual a 35 MPa, para el diseño preliminar se tomó el valor de  $f'c$  igual a 317 kg/cm<sup>2</sup>.

Tabla 12. Valor teórico de la resistencia a la compresión simple y su correlación con el módulo de rotura.

Módulo de rotura teórico (3.5 MPa.)	Ecuación	Valor $f'c$ (Kg/cm <sup>2</sup> )
Según código del ACI, $f'c$ en MPa, para $\lambda=1$	$Mr = 0.62\lambda\sqrt{f'c}$	325
Según norma colombiana, NSR-98, para valores de $f'c$ en MPa	$Mr = 0.7\sqrt{f'c}$	255
Según norma española	$Mr = 0.3^3\sqrt{f'c^2}$	406
Según Huang Yang Hsien, para valores de $f'c$	$Mr = 8\sqrt{f'c}$	283
Valor promedio		317,25
El Autor (para caso Ecuador)	$f'c = 100xMr.$	350

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor.

- 2) Se selecciona el valor del asentamiento para el hormigón a diseñarse, esto dependerá del equipo a utilizarse durante el proceso de tendido de la mezcla de hormigón para nuestro caso particular asociaremos un asentamiento de 5 cm, revisados en la sección 1.3. y que se describen en la tabla 13.

Tabla 13. Diseño de Mezcla de hormigón precondiciones de asentamiento

Descripción	Asentamiento (cm)
Revenimiento para hormigones con formaletas	2,5 a 5,0
Revenimiento para hormigones con pavimentadora deslizante	1,0 a 3,0

Fuente:(Instituto Boliviano del Cemento y El Hormigón & Ministerio de Transporte y Obras Publicas, 2012. p. 16)

Elaboración: El Autor.

- 3) Determinamos la resistencia característica requerida para nuestro diseño de hormigón de  $f'c=317\text{ kg/cm}^2$  para este caso se toma en consideración las ecuaciones establecidas en la tabla 14.

Tabla 14. Resistencia característica a la compresión cuando no hay datos para establecer la desviación estándar

Resistencia a la compresión especificada ( $f'c$ ), $\text{kgf./cm}^2$	Resistencia característica a la compresión ( $f'cr$ ), $\text{kgf./cm}^2$	
Menos de 210	$f'cr = f'c + 70$	Ecuación
	2.1	
210 – 350	$f'cr = f'c + 84$	Ecuación
	2.2	

$$f'_{cr} = 1,10 f'c + 50 \quad \text{Ecuación 2.3}$$

> 350

Fuente:(Kosmatka et al., 2004. p 195)  
Elaboración: El Autor.

Para nuestro caso adoptamos la ecuación 2.2 y obtenemos el siguiente valor de resistencia característica.

$$\begin{aligned} f'_{cr} &= f'c + 84 \\ f'_{cr} &= 317 + 84 \\ f'_{cr} &= 401 \text{ kg/cm}^2 \end{aligned}$$

Con lo que se obtiene  $f'_{cr} = 401 \text{ kg/cm}^2$

- 4) Se determina la cantidad de agua de la mezcla y su contenido de aire por m<sup>3</sup> de hormigón empleando la tabla 15 Requisitos aproximados de agua de mezcla y contenido de aire para diferentes revenimientos y tamaños máximos nominales del agregado, usando el tamaño máximo nominal del agregado y el asentamiento seleccionado para la mezcla, asumimos un valor de 183 por la imperfección del agregado se realizara un diseño con todos los materiales para verificar sus características mecánicas, con un porcentaje de grava arena de 17.59% y un porcentaje de arena grava de 1.87%.

Agua = 183 kg/m<sup>3</sup> de hormigón  
Aire incluido = 0 %

Tabla 15. Requisitos aproximados de agua de mezcla y contenido de aire para diferentes revenimientos y tamaños máximos nominales del agregado.

Cantidad de agua para los tamaños de agregado indicados*, expresada en kg/m <sup>3</sup>								
Tamaño del agregado	9,5 mm	12,5 mm	19 mm	25 mm	37,5 mm	50 mm**	75 mm**	150 mm**
<b>Asentamiento mm</b>								
	Concreto sin aire incorporado							
25 a 50	207	199	190	179	166	154	130	113
75 a 100	228	216	205	193	181	169	145	124
150 a 175	243	228	216	202	190	178	160	-
Cantidad aproximada de aire atrapado en un concreto sin aire incluido, expresado en porcentaje	3	2,5	2	1,5	1	0,5	0,3	0,2
	Concreto con aire incorporado							
25 a 50	181	199	190	179	166	154	130	113
75 a 100	202	216	205	193	181	169	145	124
150 a 175	216	228	216	202	190	178	160	-
Promedio del contenido de aire total recomendado, para el nivel de exposición, porcentaje								
Exposición blanda	4,5	4,0	3,5	3,0	2,5	2,0	1,5	1,0
Exposición moderada	6,0	5,5	5,0	4,5	4,5	4,0	3,5	3,0
Exposición severa	7,5	7,0	6,0	6,0	5,5	5,0	4,5	4,0

\* Estas cantidades de agua de mezcla se utilizan en el cálculo de los contenidos de cementos en las mezclas de prueba. Estas cantidades son máximas para agregados gruesos razonablemente angulares con granulometría dentro de los límites de las especificaciones.

\*\* El revenimiento (asentamiento) del hormigón conteniendo agregados mayores que 37,5 mm se basa en el ensayo de revenimiento realizado después de la remoción de las partículas mayores que 37,5 mm, a través de cribado húmedo.

Fuente:(Kosmatka et al., 2004)

Elaboración: (Kosmatka et al., 2004)

- 5) Se establece la relación agua/cemento mediante la Tabla 16 haciendo una interpolación, tomando en consideración la resistencia característica requerida del hormigón ( $f'_{cr}$ ) calculada en el paso n° 3 y teniendo en cuenta que el hormigón se va a diseñar sin aire incluido.

Tabla 16. Dependencia entre la relación agua/cemento y la resistencia a compresión del concreto

Resistencia a compresión a los 28 días		Relación agua/cemento en masa	
kgf/cm <sup>2</sup>	MPa	Concreto sin aire incluido	Concreto con aire incluido
450	45	0,38	0,31
400	40	0,43	0,34
350	35	0,48	0,40
300	30	0,55	0,46
250	25	0,62	0,53
200	20	0,70	0,61
150	15	0,80	0,72

Fuente:(Kosmatka et al., 2004)

Elaboración: (Kosmatka et al., 2004)

Resistencia 450      Relación a/c  
400                      0,43

Por la experiencia adquirida en proyectos de fiscalización vial en anteriores diseños adoptaremos una relación a/c de 0.35

- 6) Se calcula la cantidad de cemento por metro cúbico de hormigón:

Relación agua/cemento = 0.35

Agua = 183 kg

$$cemento = \frac{Masa\ de\ agua}{a/c} = \frac{183\ kg}{0.35}$$

$$cemento = 523\ kg$$

- 7) Se determina el volumen de agregado grueso por unidad de volumen de hormigón mediante la Tabla 17 haciendo una interpolación para valores intermedios, y tomando en consideración el módulo de finura del agregado fino (MF = 3,06) así como el tamaño máximo nominal del agregado grueso (TMN = 3/4")

Tabla 17. Volumen de agregado grueso por volumen unitario de hormigón.

Tamaño máximo nominal del agregado grueso		Volumen de agregado grueso varillado (compactado) en seco por volumen unitario de hormigón para diferentes módulos de finura de agregado fino. (M <sup>3</sup> )			
		2,40	2,60	2,80	3,00
mm	Pulg.				
9.5	(3/8)	0,50	0,48	0,46	0,44
12.5	(1/2)	0,59	0,57	0,55	0,53
19.0	(3/4)	0,66	0,64	0,62	<b>0,60</b>
25.0	(1.)	0,71	0,69	0,67	0,65
37.5	(1-1/2)	0,75	0,73	0,71	0,69
50.0	(2.)	0,78	0,76	0,74	0,72
75.0	(3.)	0,82	0,80	0,78	0,76
150.0	(6.)	0,87	0,85	0,83	0,81

Fuente:(Kosmatka et al., 2004)

Elaboración: (Kosmatka et al., 2004)

De lo cual se obtiene el volumen de agregado grueso varillado compactado por volumen unitario de hormigón en m<sup>3</sup> = 0,574

Módulo de finura	Volumen de agregado grueso x m <sup>3</sup>
2,80	0,62
<u>3,00</u>	<u>0,60</u>
3,06	x
0,20	0,02
0,26	x

$$x = 0,60 - \frac{0,26 \times 0,02}{0,20} = 0,574$$

Se calcula la masa de agregado grueso (grava):

Masa del agregado grueso = Vol. agregado grueso x peso unitario compactado

$$Mag = 0,574 \text{ m}^3 \times 1.767,73 \text{ kg/m}^3$$

$$Mag = 1.014,68 \text{ kg}$$

- 8) Se estima la masa del agregado fino determinando el volumen unitario total de mezcla como se demuestra en la siguiente tabla.

Tabla 18. Estimación del volumen del agregado fino

Material	Masa (kg)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Volumen (m <sup>3</sup> )
Agua	183	1.000	0,183
Cemento	523	2.940	0,178
Agregado grueso	1.014,68	2.634	0,385

Aire	0	0	0
Total:			0,746
Volumen del agregado fino			
=			0,254

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

Se calcula la masa de agregado fino (arena):

Masa del agregado fino = Vol. agregado fino x Densidad SSS de la arena

$$Mag = 0,254 \text{ m}^3 \times 2,622 \text{ kg/m}^3$$

$$Mag = 665,98 \text{ kg}$$

- 9) En la tabla 19 se presenta la dosificación final del diseño preliminar de la mezcla de hormigón para pavimento rígido obtenida por el método del ACI para un módulo de rotura de 35 MPa.

Tabla 19. Dosificación preliminar de la mezcla de hormigón

Material	Masa (kg)	Proporción
Agua	183	0,35
Cemento	523	1,00
Agregado grueso	1.014,68	1,94
Agregado fino	665,98	1,27
Aire	-	-

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

- 10) Con el diseño preliminar se realizaron cuatro especímenes cilíndricos de hormigón y se los ensayaron a los 7 y 28 días para verificar las características mecánicas y proceder con la corrección del diseño, en la tabla 20 se describe los resultados obtenidos a los 7 y 28 días de edad y la tabla 21 las correlaciones para obtener el módulo de rotura teórico del diseño.

Tabla 20. Resultados de los ensayos a compresión simple del diseño preliminar

Espécimen	Asentamiento (cm)	Fecha de Elaboración	Tiempo días	Fecha rotura	Diámetro cm	Área cm <sup>2</sup>	Carga Kg	Resistencia $f'c$ (Kg/cm <sup>2</sup> )	Requerida $f'c$ (Kg/cm <sup>2</sup> )
Muestra 1	4.3	22-feb-17	7	01-mar-17	15,04	177,57	42507,65	239,39	233
Muestra 2	4.3	22-feb-17	7	01-mar-17	15,03	177,33	42609,58	240,28	233
Muestra 3	4.3	22-feb-17	28	22-mar-17	15,04	177,57	62385,32	351,33	350
Muestra 4	4.3	22-feb-17	28	22-mar-17	15,03	177,33	62629,97	353,18	350

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

Tabla 21. Resultados del valor teórico del módulo de rotura para el diseño preliminar

Espécimen	Edad	Resistencia $f'c$ (MPa)	(Mr) ACI $\lambda = 1$	(Mr) Norma Colombiana	(Mr) Norma Española	(Mr) Huang-EEUU	Valor Promedio
Muestra 1	7	23,48	3,00	3,39	2,46	3,22	3,02
Muestra 2	7	23,56	3,01	3,40	2,47	3,22	3,03
Muestra 3	28	34,45	3,64	4,11	3,18	3,90	3,71

Muestra 4	28	34,64	3,65	4,12	3,19	3,91	<b>3,72</b>
-----------	----	-------	------	------	------	------	-------------

Fuente: El autor  
Elaboración: El Autor

### Preparación de los áridos.

Conocidos los resultados de diseño preliminar se procede a realizar la corrección del diseño de la mezcla de hormigón para pavimento rígido, considerando las dimensiones para la elaboración de las muestras prismáticas (viguetas) de 5x5x20cm, el tamaño máximo nominal del agregado grueso será de 1/2" o de 12mm para mejorar el acomode de los áridos en los moldes y diseñar un hormigón para un MR igual a 3.5 MPa.

Para el diseño mejorado de la mezcla de hormigón se procedió a preparar los áridos hasta obtener las mejores condiciones de laboratorio a continuación detallamos las actividades realizadas en los laboratorios de la Universidad Técnica Particular de Loja a una temperatura ambiente de 25° C., aplicación de la norma INEN 872 y ASTM-C 330, C 331, C 332, C 637 Y C 638., en la tabla 22 se detallan los diferentes ensayos a realizar a los áridos como requisitos mínimos para la elaboración de hormigones, la nomenclatura no aplica (n/a) se debe a ensayos cuyos efectos se relacionan con las impurezas orgánicas, no se las determina debido al lavado del material previo a realizar los ensayos donde se libera de toda impureza orgánica en laboratorio, sin embargo es muy necesario cuando se pretenda realizar producción en masa en una planta hormigonera, la nomenclatura (NO) se deriva de la hipótesis planteada para verificar los efectos de NTCs en la mezcla de hormigón se trata de elaborar una mezcla en condiciones de la más mínima resistencia a los agentes químicos y a las características mecánicas de las rocas.

Tabla 22. Descripción de los ensayos de áridos para hormigones requisitos Norma INEN 872.

<b>NORMA NTE INEN 872</b>				
<b>ÁRIDOS PARA HORMIGONES REQUISITOS</b>				
<b>Nro.</b>	<b>Descripción</b>	<b>Normativa Ecuatoriana</b>	<b>Aplica</b>	
1	Árido - Muestreo	NTE-INEN 695		si
2	Granulometría y módulo de finura	NTE-INEN 696		si
3	Cantidad del Material más fino que 75 µm	NTE-INEN 697		si
4	Impurezas Orgánicas	NTE-INEN 855		n/a
5	Efectos de las impurezas orgánicas sobre la resistencia	NTE-INEN 866		n/a
6	Solidez	NTE-INEN 863		no
7	Terrones de Arcillas y Partículas desmenuzables	NTE-INEN 698		n/a
8	Carbón y Lignito	NTE-INEN 699		no
9	Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido fino.	NTE-INEN 856		si
10	Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido grueso.	NTE-INEN 857		si
11	Masa Unitaria (Peso Volumétrico) y porcentaje de vacíos	NTE-INEN 858		si
12	Degradación del árido grueso	NTE-INEN 861		si
13	Áridos y Reactivos (Reactividad alcalina de un agregado)	NTE-INEN 872		no

Fuente: El Autor  
Elaboración: El Autor

Para la preparación de los áridos grueso y fino se realizaron las siguientes actividades:



- 1) De la extracción del material grueso y fino obtenido de la cantera del río Malacatos, se realiza el muestreo por cuarteo y se pesan 25 kg de grava y para la arena 15 kg.
- 2) Se lava el material hasta dejar libre de materia orgánica la grava y la arena.
- 3) Los áridos para la mezcla de hormigón como los 25 kg de grava y los 15 kg de arena son colocados en el horno a 120° C. por 24 horas.
- 4) Con el material proveniente del secado al horno por 24 horas a 120° C. se toma el peso inicial de la muestra y realiza la granulometría del material aplicando la norma INEN 696 o ASTM-C-136 en su estado normal, hasta determinar una curva granulometría ajustada dentro de la faja de especificación establecida en la figura 12 (norma INEN-872) para el árido grueso de tamaño nominal 12mm y la faja de especificación de la tabla 23, apartado 5.1.2.1 (norma INEN-872 o norma ASTM C-330) para los áridos finos

Número de tamaño	Tamaño nominal (Tamices con aberturas cuadradas) (mm)	Porcentaje acumulado en masa que debe pasar cada tamiz de laboratorio (aberturas cuadradas)													
		100 mm	90 mm	75 mm	63 mm	50 mm	37,5 mm	25,0 mm	19,0 mm	12,5 mm	9,5 mm	4,75 mm	2,36 mm	1,18 mm	300 µm
1	de 90 a 37,5	100	90 a 100	---	25 a 60	---	0 a 15	---	0 a 5	---	---	---	---	---	
2	de 63 a 37,5	---	---	100	90 a 100	35 a 70	0 a 15	---	0 a 5	---	---	---	---	---	
3	de 50 a 25,0	---	---	---	100	90 a 100	35 a 70	0 a 15	---	0 a 5	---	---	---	---	
357	de 50 a 4,75	---	---	---	100	95 a 100	---	35 a 70	---	10 a 30	---	0 a 5	---	---	
4	de 37,5 a 19,0	---	---	---	---	100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	---	0 a 5	---	---	---	
467	de 37,5 a 4,75	---	---	---	---	100	95 a 100	---	35 a 70	---	10 a 30	0 a 5	---	---	
5	de 25,0 a 12,5	---	---	---	---	---	100	90 a 100	20 a 55	0 a 10	0 a 5	---	---	---	
56	de 25,0 a 9,5	---	---	---	---	---	100	90 a 100	40 a 85	10 a 40	0 a 15	0 a 5	---	---	
57	de 25,0 a 4,75	---	---	---	---	---	100	95 a 100	---	25 a 60	---	0 a 10	0 a 5	---	
6	de 19,0 a 9,5	---	---	---	---	---	---	100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	0 a 5	---	---	
67	de 19,0 a 4,75	---	---	---	---	---	---	100	90 a 100	---	20 a 55	0 a 10	0 a 5	---	
7	de 12,5 a 4,75	---	---	---	---	---	---	---	100	90 a 100	40 a 70	0 a 15	0 a 5	---	
8	de 9,5 a 2,36	---	---	---	---	---	---	---	---	100	85 a 100	10 a 30	0 a 10	0 a 5	
89	de 9,5 a 1,18	---	---	---	---	---	---	---	---	100	90 a 100	20 a 55	5 a 30	0 a 10	0 a 5
9 <sup>A</sup>	de 4,75 a 1,18	---	---	---	---	---	---	---	---	---	100	85 a 100	10 a 40	0 a 10	0 a 5

<sup>A</sup> Al árido con número de tamaño 9, se lo define en la NTE INEN 694 como árido fino. Se lo incluye como árido grueso cuando está combinado con un material con número de tamaño 8 para crear el número de tamaño 89, que es árido grueso según se define en la NTE INEN 694.

Figura 12. Requisitos de gradación para áridos gruesos.

Fuente: (INEN 872, 2011)

Elaboración: (INEN 872, 2011)

Tabla 23. Requisito granulométrico para el árido fino

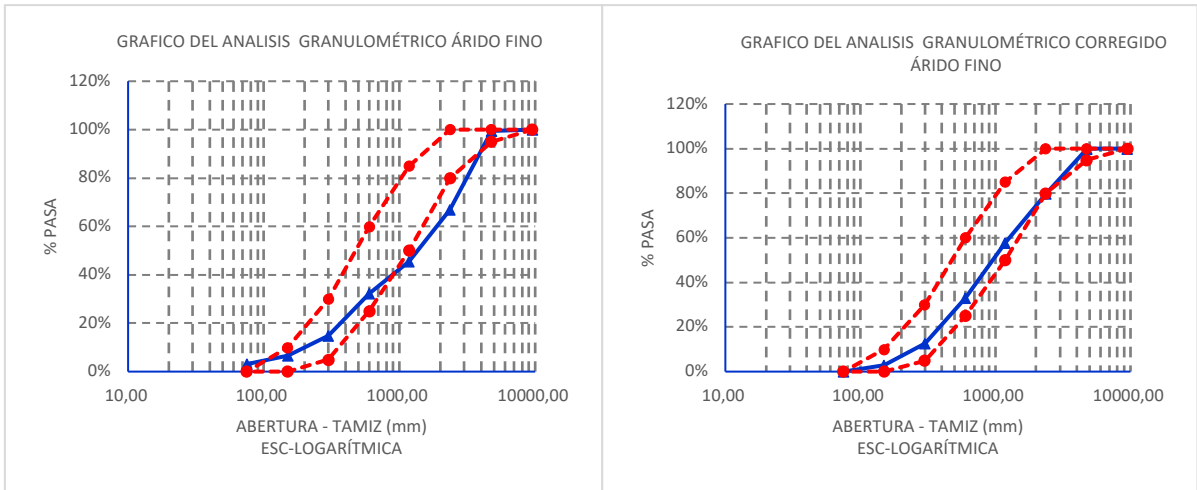
Tamiz (NTE INEN 154)	Porcentaje que pasa
9,5 mm	100
4,75 mm	95 a 100
2,36 mm	80 a 100
1,18 mm	50 a 85
600 µm	25 a 60
300 µm	5 a 30
150 µm	0 a 10

Fuente: (INEN 872, 2011)

Elaboración:(INEN 872, 2011)

- 5) Con los resultados obtenidos de la granulometría de los áridos grueso y fino se corrige la granulometría de los materiales, la figura 13 representa la corrección de la granulometría del árido fino, la curva de la izquierda representa la granulometría del árido fino en banco y la curva de la derecha la granulometría del árido fino ya corregida.

Figura 13. Ajuste de la granulometría del árido fino



Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

La figura 14, representa la corrección de la granulometría del árido grueso para una muestra de tamaño máximo nominal de 12mm, la curva de la izquierda representa la granulometría del árido grueso en banco y la curva de la derecha la granulometría del árido grueso ya corregida.

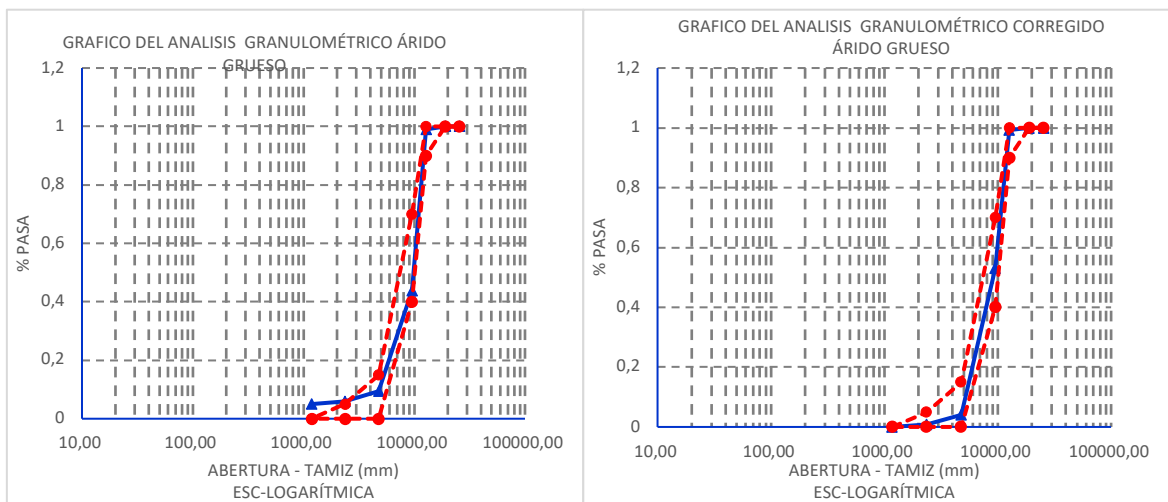


Figura 14. Ajuste de la granulometría del árido fino

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

- 6) Se pesa para cada tamiz el porcentaje retenido de la curva granulométrica corregida hasta obtener una muestra patrón de 1000 g. la granulometría de diseño lo determina la tabla 24 para el árido fino y la tabla 25 para el árido grueso.

Tabla 24. Granulometría de diseño para el árido fino

Abertura (mm)	Tamiz		Peso (g)
	Nro. INEN - 154	% diseño	
4,75 mm	# 4	0%	0
2,36 mm	# 8	20%	202
1,18 mm	# 16	22%	222
600 µm	# 30	25%	245
300 µm	# 50	20%	204
150 µm	# 100	10%	98
75 µm	# 200	3%	29
fondo	-	0%	0
<b>Total</b>		<b>100%</b>	<b>1000</b>

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

Tabla 25. Granulometría de diseño para el árido grueso

Abertura (mm)	Tamiz		Peso (g)
	Nro. INEN - 154	% diseño	
19,05 mm	3/4"	0%	0
12,70 mm	1/2"	1%	120
9,53 mm	3/8"	46%	6930
4,75 mm	# 4	49%	7335
2,36 mm	# 8	3%	480
1,18 mm	# 16	1%	135
600 µm	# 30	0%	0
<b>Total</b>		<b>100%</b>	<b>15000</b>

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

- 7) Obtenida la granulometría de diseño para los áridos grueso y fino se procede a corregir la caracterización de los materiales, valores establecidos en la tabla 10 para árido fino y tabla 11 para el árido grueso.

### **Diseño mejorado de la mezcla de hormigón método ACI para pavimentos rígidos.**

Con la caracterización corregida de los materiales se procede a diseñar la mezcla de hormigón método ACI para pavimentos rígidos, siguiendo los mismos lineamientos de la sección 2.2.2.1.

- 1) Establecemos el valor de la resistencia a la compresión simple,  $f'c$ . igual a 350 kg/cm<sup>2</sup> para el diseño definitivo de la mezcla convencional de hormigón método ACI para pavimentos rígidos.
- 2) El valor del asentamiento para el hormigón a diseñarse es de 5 cm, revisados en la sección 1.3. y que se describen en la tabla 13.

- 3) Determinamos la resistencia característica requerida para nuestro diseño de hormigón de  $f'c=350$  kg/cm<sup>2</sup> para este caso se toma en consideración las ecuaciones establecidas en la tabla 14.

Para nuestro caso adoptamos la ecuación 2.2 y obtenemos el siguiente valor de resistencia característica.

$$\begin{aligned}f'cr &= f'c + 84 \\f'cr &= 350 + 84 \\f'cr &= 434 \text{ kg/cm}^2\end{aligned}$$

Con lo que se obtiene  $f'cr = 434$  kg/cm<sup>2</sup>

- 4) Se determina la cantidad de agua de la mezcla y su contenido de aire por m<sup>3</sup> de hormigón (empleando la tabla 15), usando el tamaño máximo nominal del agregado de 12mm y el asentamiento seleccionado para la mezcla de 5cm. asumimos un valor de 199.

Agua = 199 kg/m<sup>3</sup> de hormigón  
Aire incluido = 0 %

- 5) Se establece la relación agua/cemento mediante la Tabla 16 haciendo una interpolación, tomando en consideración la resistencia característica requerida del hormigón ( $f'cr$ ) calculada en el paso n° 3 y teniendo en cuenta que el hormigón se va a diseñar sin aire incluido, sin embargo por la experiencia adquirida en proyectos de fiscalización vial en anteriores diseños adoptaremos una relación a/c de 0.35
- 6) Se calcula la cantidad de cemento por metro cúbico de hormigón:

Relación agua/cemento = 0.35  
Agua = 199 kg

$$cemento = \frac{Masa \text{ de agua}}{a/c} = \frac{199 \text{ kg}}{0.35}$$

$$cemento = 569 \text{ kg}$$

- 7) Se determina el volumen de agregado grueso por unidad de volumen de hormigón mediante la Tabla 17 haciendo una interpolación para valores intermedios, y tomando en consideración el módulo de finura del agregado fino (MF = 3,14) así como el tamaño máximo nominal del agregado grueso (TMN = 12mm), de lo cual se obtiene el volumen de agregado grueso varillado compactado por volumen unitario de hormigón en (m<sup>3</sup>) igual a 0,530 en esta etapa no extrapolamos el valor por ser el último valor tomado de la tabla 17.

Se calcula la masa de agregado grueso (grava):  
Masa del agregado grueso = Vol. agregado grueso x peso unitario compactado

$$Mag = 0,530 \text{ m}^3 \times 1.766,73 \text{ kg/m}^3$$

$$Mag = 936.37 \text{ kg}$$

- 8) Se estima la masa del agregado fino determinando el volumen unitario total de mezcla como se demuestra en la siguiente tabla.

Tabla 26. Estimación del volumen del agregado fino

<b>Material</b>	<b>Masa (kg)</b>	<b>Densidad (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Volumen (m<sup>3</sup>)</b>
Agua	199	1.000	0,199
Cemento	569	2.940	0,194
Agregado grueso	936	2.621	0,357
Aire	0	0	0
<b>Total:</b>			<b>0,75</b>
Volumen del agregado fino			
=			<b>0,25</b>

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

Se calcula la masa de agregado fino (arena):

Masa del agregado fino = Vol. agregado fino x Densidad SSS de la arena

$$Mag = 0,25 \text{ m}^3 \times 2.654 \text{ kg/m}^3$$

$$Mag = 663,5 \text{ kg}$$

### Dosificación del hormigón convencional.

En la tabla 27 se presenta la dosificación final del diseño de la mezcla de hormigón para pavimento rígido obtenida por el método del ACI para un módulo de rotura de 35 MPa.

Tabla 27. Dosificación de la mezcla de hormigón

<b>Material</b>	<b>Masa (kg)</b>	<b>Proporción</b>	<b>Volumen (m<sup>3</sup>)</b>
Agua	199	0,35	0,199
Cemento	569	1,00	0,194
Agregado grueso	936	1,64	0,357
Agregado fino	664	1,17	0,250
Aire	-	-	-

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

En la tabla 28 se aprecia la dosificación de los materiales para un espécimen de hormigón sin ser modificado con NTCs, vigueta de 5 cm x 5 cm x 20 cm. La que se utiliza para la elaboración de los especímenes de hormigón que servirán como referencia para este caso de estudio.

Tabla 28. Dosificación para especímenes de hormigón vigueta de 5 cm x 5 cm x 20 cm

**PROBETA: VIGUETA DE 5 cm x 5 cm x 20 cm****Nro. De probetas****1**

Descripción	vol. Real (m3)	Vol. Espec. (Dm3)	Proporción (Tabla 27)	Peso neto Kg.	Absorción (%)	Peso (Kg)
CEMENTO	194	0,97	1,00	0,250		0,288
AIRE	0	0,00	0,00	0,000		0,000
AGUA	199	1,00	0,35	0,088	1,000	0,101
ARENA	250	1,25	1,17	0,293		0,337
GRAVA	357	1,79	1,64	0,410		0,472
SUMAN	1000	5,00		1,041		1,198

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

**Diseño de la mezcla de Hormigón método ACI para pavimentos rígidos modificado con NTCPMs.**

El reto de la nanotecnología en la búsqueda de nuevos materiales con la aplicación de los NTCs es su grado de dispersión, la dispersión de los NTCPM es la clave para desarrollar esta tecnología (Qissab & Abbas, 2016), para el hormigón la dispersión máxima debe realizarse en la pasta cementante, los avances más recientes en la materia han demostrado buenos resultados en las características mecánicas del hormigón sobre todo en la resistencia a la tracción por flexión, la distribución de los NTCPM con agentes dispersante en un medio acuoso, aditivos a base de naftaleno sulfonato de sodio (NSS) y polímeros hidroxilados (PHs) contribuyeron al aumento de la resistencia a tracción indirecta en un 35% y 30% (Ríos, 2016).

La técnica aplicada para la dispersión de los NTCs en el medio acuoso en este caso el agua destilada, es la descrita por Ríos (2016), que utiliza un equipo de sonicación ultrasónica para dispersar los NTCPM en los agentes dispersantes y el agua, con esta técnica logró Ríos desarrollar una ecuación básica para cada agente dispersante obteniendo el grado máximo de dispersión en una solución de 20ml de agua destilada, las ecuaciones propuestas por Ríos son las que se muestran a continuación.

Para el agente dispersante, aditivo a base de naftaleno sulfonato de sodio (NSS)

$$\frac{wt \% NSS}{wt \% NTCPM} = 1.1 \quad \text{Ecuación 2.4}$$

Para el agente dispersante, aditivo a base de polímeros hidroxilados (PHs)

$$\frac{wt \% PHs}{wt \% NTCPM} = 0.6 \quad \text{Ecuación 2.5}$$

Sin embargo estas ecuaciones fueron analizadas para obtener el máximo grado de dispersión de los NTCPM, donde se “determinó el porcentaje en peso del dispersante para una cantidad de 0.1% NTC en 20 ml de agua destilada” (Ríos, 2016, p. 38)

Analizado esto podemos decir que la cantidad en peso de los NTCPM para el diseño de la mezcla de hormigón método ACI para pavimentos rígidos modificado con NTCs está en función del peso en agua y de la relación agua cemento de la mezcla de hormigón convencional, con ello planteamos la siguiente relación:

- a) Valor en peso de NTCPM para el agente dispersante aditivo a base de naftaleno sulfonato de sodio (NSS) está en función al peso en agua wt-h2o (Tabla 27) del diseño de la mezcla de hormigón método ACI.

Para determinar el peso de los NTCPM tomando la ecuación de Ríos (2016) para el agente dispersante NSS, la máxima dispersión se obtuvo al disolver 0,1% NTCs en diferentes concentraciones del agente dispersante NSS en 20 ml de agua destilada, la relación óptima para la máxima dispersión de los NTCs es 1,1, esto nos lleva a deducir con exactitud que para cumplir la relación de máxima dispersión el porcentaje del agente dispersante (wt % AD) debe ser de 0,11, planteamos entonces las relaciones de los NTCs y el AD NSS con el peso del agua cuando llega a su máxima dispersión (tabla 29).

Tabla 29. Relaciones de los NTCs y el AD-NSS con el peso del agua.

Descripción	Concentraciones (Ríos 2016)	Relaciones
NTCPM	0,10	0,0050
AD NSS	0,11	0,0055
H <sub>2</sub> O	20	
Máxima dispersión	1,1	1,1

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

Podemos concluir entonces que la máxima dispersión se logra cuando la relación entre el agente dispersante NSS y los NTCPM con respecto al agua es 0,0055 y 0,0050 respectivamente, esto nos da a plantear que para cualquier valor en peso de agua donde se necesite máxima dispersión la concentración del NSS y los NTCPM deben tener la misma relación de 0,0055 para el NSS y 0,0050 para los NTCS

$$wt\% \text{ NTCPM} = \frac{0,1 \times Wt \text{ h2o}}{20} \quad \text{Ecuación 2.6}$$

$$wt\% \text{ NSS} = \frac{0,11 \times Wt \text{ h2o}}{20} \quad \text{Ecuación 2.7}$$

- b) Valor en peso de NTCPM para el agente dispersante aditivo a base de polímeros hidroxilados (PHs) también está en función al peso en agua wt-h2o (Tabla 27) del diseño de la mezcla de hormigón método ACI., donde se plantean las mismas relaciones por concebirse con la misma metodología realizada por Ríos (2016) quien determinó la máxima dispersión en el medio acuoso, así planteamos las relaciones de los NTCs y el AD PHs con el peso del agua cuando llega a su máxima dispersión (tabla 30).

Tabla 30. Relaciones de los NTCs y el AD-PHs con el peso del agua

Descripción	Concentraciones (Ríos 2016)	Relaciones
NTCs	0,10	0,005

AD PHs	0,06	0,003
H <sub>2</sub> O	20	
Máxima dispersión	0,6	0,6

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

$$wt\% \text{ NTCPM} = \frac{0,1 \times Wt \text{ h2o}}{20} \quad \text{Ecuación 2.8}$$

$$wt\% \text{ PHs} = \frac{0,06 \times Wt \text{ h2o}}{20} \quad \text{Ecuación 2.9}$$

Con las ecuaciones 2.6, 2.7, 2.8, 2.9 procedemos a dosificar cinco concentraciones distintas en peso de los NTCPM introduciendo un factor de concentración  $f=0,333$ ,  $f=0,5$ ,  $f=1$ ,  $f=2$ ,  $f=3$ .

Concentraciones para el agente dispersante, aditivo a base de naftaleno sulfonato de sodio (NSS)

$$wt\% \text{ NTCPM} = f \times \frac{0,1 \times Wt \text{ h2o}}{20} \quad \text{Ecuación 2.10}$$

$$wt\% \text{ NSS} = f \times \frac{0,11 \times Wt \text{ h2o}}{20} \quad \text{Ecuación 2.11}$$

Concentraciones para el agente dispersante, aditivo a base de polímeros hidroxilados (PHs)

$$wt\% \text{ NTCPM} = f \times \frac{0,1 \times Wt \text{ h2o}}{20} \quad \text{Ecuación 2.12}$$

$$wt\% \text{ PHs} = f \times \frac{0,06 \times Wt \text{ h2o}}{20} \quad \text{Ecuación 2.13}$$

### Dosificación del hormigón modificado con NTCPMs.

Para la dosificación del hormigón modificado con NTCs, se realiza previamente el peso total de los materiales a necesitar para cinco concentraciones de NTCPM+NSS tres especímenes por cada concentración, cinco concentraciones de NTCPM+PHs tres especímenes por cada concentración y cinco muestras de hormigón convencional en forma prismática de medidas 5cmx5cmx20 cm, con un total de 35 especímenes de hormigón.

Para la dosificación con NSS, con las ecuaciones 2.10, 2.11 establecemos el peso de los NTCPM y el agente dispersante NSS para los especímenes con cinco factores de concentración que son  $f_1=0,333$ ,  $f_2=0,5$ ,  $f_3=1$ ,  $f_4=2$ ,  $f_5=3$ , se describen en la tabla 31.

Tabla 31. Dosificación del hormigón modificado con NTCPM en agente dispersante a base de NSS.

Descripción	Hormigón convencional I Dosificación peso (g)	Dosificación especímenes para una vigueta de 5cm x 5cm x 20cm Hormigón modificado con NTCs.				
		Dosificación	Dosificación	Dosificación	Dosificación	Dosificación
		$f_1=0,333$ peso (g)	$n f_2=0,5$ peso (g)	$n f_3=1$ peso (g)	$n f_4=2$ peso (g)	$n f_5=3$ peso (g)
% NTCPM		0,058%	0,088%	0,175%	0,351%	0,526%
Wt NTCPM (g)		0,17	0,25	0,51	1,01	1,52
% NSS		0,064%	0,096%	0,193%	0,386%	0,579%
Wt NSS (g)		0,18	0,28	0,56	1,11	1,67
CEMENTO	288,00	288,00	288,00	288,00	288,00	288,00
AIRE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00



AGUA	101,00	101,00	101,00	101,00	101,00	101,00
ARENA	337,00	337,00	337,00	337,00	337,00	337,00
GRAVA	472,00	472,00	472,00	472,00	472,00	472,00
SUMAN	1198,00	1198,35	1198,53	1199,07	1200,12	1201,19

Nota: el porcentaje de los NTCPM y NSS se representa en relación del peso del cemento

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

Para la dosificación con PHs., con las ecuaciones 2.12, 2.13 establecemos de la misma manera el peso de los NTCPM y el agente dispersante PHs., para los especímenes con los mismos factores de concentración  $f_1=0,333$ ,  $f_2=0,5$ ,  $f_3=1$ ,  $f_4=2$ ,  $f_5=3$ , se describen en la tabla 32.

Tabla 32. Dosificación del hormigón modificado con NTCPM en agente dispersante a base de PHs.

Descripción	Hormigón convencional	Dosificación especímenes para una vigueta de 5cm x 5cm x 20cm				
		Hormigón modificado con NTCs.				
		Dosificación n f=0,333	Dosificación n f=0,5	Dosificación n f=1	Dosificación n f=2	Dosificación n f=3
	Dosificación peso (g)	Dosificación peso (g)	Dosificación peso (g)	Dosificación peso (g)	Dosificación peso (g)	
% NCTPM		0,058%	0,088%	0,175%	0,351%	0,526%
Wt NCTPM (g)		0,17	0,25	0,51	1,01	1,52
% PHs		0,035%	0,053%	0,105%	0,210%	0,316%
Wt NSS (g)		0,10	0,15	0,30	0,61	0,91
CEMENTO	288,00	288,00	288,00	288,00	288,00	288,00
AIRE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
AGUA	101,00	101,00	101,00	101,00	101,00	101,00
ARENA	337,00	337,00	337,00	337,00	337,00	337,00
GRAVA	472,00	472,00	472,00	472,00	472,00	472,00
SUMAN	1198,00	1198,27	1198,40	1198,81	1199,62	1200,43

Nota: el porcentaje de los NTCPM y PHs se representa en relación del peso del cemento

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

## Segunda etapa

### Elaboración de especímenes de hormigón prismáticos vigas a escala de 5cm x 5cm x 20cm.

El conocimiento sobre la microestructura del hormigón y su evolución al paso del tiempo es un factor importante al momento de elaborar los especímenes de hormigón prismáticos, pues el caso de estudio plantea a los NTCs como un nuevo material a incorporarse en la mezcla de hormigón pero como actúa este nano material en la pasta de cemento es algo que se debe aún seguirse investigando, sin embargo con la hipótesis establecida de que estos NTCs logran incrementar las propiedades mecánicas de resistencia a la tracción por flexión del hormigón cabe plantearse la idea de cómo puede funcionar estos nano materiales en la micro estructura del hormigón, e hipotéticamente se plantea un posible funcionamiento .

Al estar dotados los NTCs de una alta capacidad de resistencia a la flexión es importante que sus características actúen en la pasta de cemento y no aglomerados en la superficie de los áridos pues los NTCs no crecen más de lo debido a diferencia de los cristales del cemento que aumentan y crecen con la edad, entonces una las consideraciones más importantes es no permitir que en la superficie de los agregados se aglomeren los NTCs, esto lo podemos lograr

saturando la superficie del agregado y permitiendo se desenvuelva de manera normal el desarrollo de los cristales en la ZI a través de la reacción del cemento en los poros del árido (figura 15).

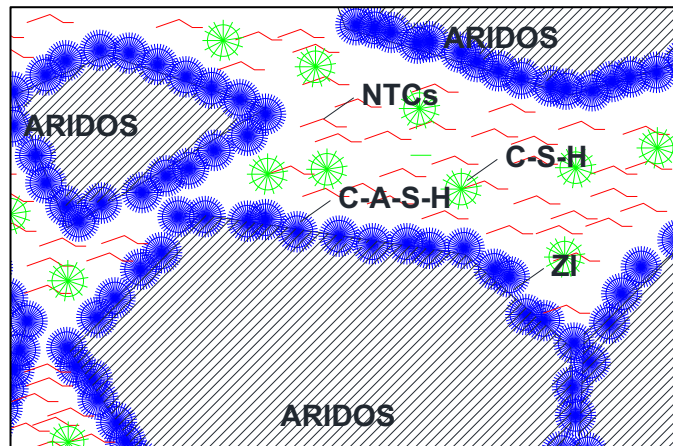


Figura 15. Mecanismo de actuación con buena dispersión de los NTCs.

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

Al no dejar desarrollar normalmente la ZI podrían aglomerarse los NTCs en la superficie de los áridos impidiendo el crecimiento de los cristales en los poros del agregado debilitando su adherencia y por consiguiente disminuir la resistencia mecánica a la compresión y la flexión.

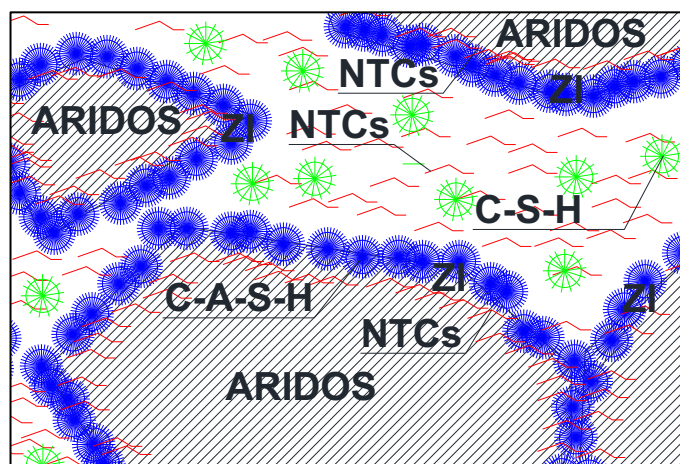


Figura 16. Mecanismo de actuación mala dispersión de los NTCs.

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

Analizado esto procedemos a elaborar nuestros especímenes prismáticos para lo cual detallaremos a continuación los procedimientos a seguir.

### ***Equipos a utilizar.***

Los equipos a utilizar para la elaboración de los especímenes prismáticos son parte de los laboratorios de la Universidad Técnica Particular de Loja constan de los siguientes:

- 1) Laboratorio de mecánica de suelos, Horno, balanza, tamices, picnómetro, recipientes.



Figura 17. Ensayo de granulometría y densidades.

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

- 2) Laboratorio de Materiales.

### **Ultrasonido**

Se utiliza un equipo Homogeneizador ultrasónico modelo JY96-IIN (figura 18), para la dispersión de los NTCs en la solución de agua destilada el agente dispersante y los NTCs, tiene una capacidad de potencia variable hasta de un máximo de 150W en un volumen de 10 a 100 ml ( $V_m = 100$  ml). Está dotado de una punta cilíndrica de una aleación de titanio esta puede producir una frecuencia de 20-25 kHz. Con una energía ultrasónica que logra separar a los NTCs y dispersarlos en la solución acuosa.

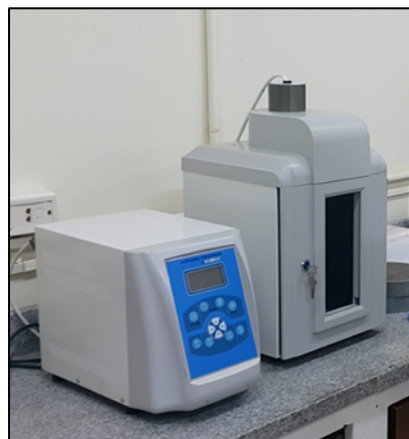


Figura 18. Ultrasonic Homogenizer Model JY96-IIN.

Fuente: El Autor  
Elaboración: El Autor

### **Preparación de materiales.**

La mezcla de hormigón para la elaboración de los especímenes a forma de viguetas de 5cm x 5cm x 20cm, está conformada por el árido grueso (grava), árido fino (arena), cemento, agua destilada, NTCPM, NSS o PHs., dependiendo del agente dispersante son las concentraciones de NTCPM, sin embargo el peso de los áridos grueso y fino no se ve alterado por la presencia del agente dispersante o los NTCs., ver tabla 28, 31 y 32.

Previo a la elaboración de cada espécimen se debe preparar cada uno de los materiales debido al mecanismo de dispersión por la simple razón de no mantener demasiado tiempo los NTCs dispersos en el medio acuoso ya que podrían presentarse aglomeraciones, la grava y la arena debe estar lista en cantidad suficiente para cada vigueta, así como también el cemento, para la elaboración de 35 viguetas, 5 especímenes de referencia que no fueron modificados con los NTCs. (MS-RF), 15 especímenes con mezcla de hormigón modificado con nanotubos de carbono de pared múltiple dispersado en súper plastificante a base de naftaleno sulfonato de sodio (Ho + wt% NNS + wt% NTCPM), y 15 especímenes con mezcla de hormigón modificado con nanotubos de carbono de pared múltiple dispersado en súper plastificante a base de polímeros hidroxilados (Ho + wt% PHs + wt% NTCPM), para la preparación de los materiales se llevaron a cabo los siguientes pasos.

- 1) Para cada espécimen se prepara en peso el material fino (arena) tal como se describe en la sección 2.2.3., se prepara un total de 12,5 kg de arena, totalmente limpia y libre de material orgánico en los porcentajes establecidos en la tabla 24, esta muestra es considerada como una arena de óptimas condiciones granulométricas, se separa en peso para tres viguetas en los diferentes factores de concentración de las tablas 31 y 32 y también se separa en peso para las cinco viguetas de referencia de la tabla 28.



Figura 19. Preparación de la arena.

Fuente: El Autor  
Elaboración: El Autor

- 2) El material grueso (grava) debe ser preparada tal como se describe en la sección 2.2.3., se prepara un total de 17,5 kg de grava de tamaño nominal 12mm, totalmente limpia y libre de material orgánico en los porcentajes establecidos en la tabla 25., considerada una grava bien graduada se separa en peso para tres viguetas en los diferentes factores de concentración de las tablas 31 y 32., y también se separa en peso para las cinco viguetas de referencia de la tabla 28.



Figura 20. Preparación de la grava.

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

- 3) El cemento a usar es el tipo GU elaborados por la empresa Holcim Ecuador en la Planta Cerro Blanco de la ciudad de Guayaquil, se pesa el valor en peso para tres viguetas en los diferentes factores de concentración de las tablas 31 y 32., y también se separa en peso para las cinco viguetas de referencia de la tabla 28.



Figura 21. Preparación del cemento.

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

- 4) Para la elaboración de los especímenes se preparan los moldes en forma de viguetas de dimensiones de interiores de 5cm x 5cm x 20cm, introduciendo un material conductor cable de cobre de 5cm de longitud # 10 en las caras laterales de 5cm x 5cm.



Figura 22. Preparación de los moldes.

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

- 5) Debe tenerse listo aproximadamente 5 litros de agua destilada que se ocuparan para las 35 viguetas, cuchara de plástico, papel aluminio, los NTCPM dentro de un recipiente cerrado, una vaso de precipitación de 250ml, vaso de precipitación de 100ml, una jeringa de 6 cm, una balanza con medida en gramos, un recipiente metálico y cucharon para la mezcla.



Figura 23. Preparación de los NTC, Agua, AD.  
Fuente: El Autor

### ***Mecanismos de dispersión de los NTCs. en la mezcla de hormigón.***

Para obtener la dispersión deseada de los NTCPM en el agente dispersante es necesario la configuración del equipo de sonificación ultrasónica con los parámetros adecuados para iniciar con la dispersión, en esta sección se describe como debe configurarse el equipo para lograr la dispersión de los NTCPM diluidos en agua destilada con la adhesión de los NSS y en PHs.

#### ***Configuración del equipo para dispersión de los NTCPM en NSS.***

La máxima dispersión de los NTCPM en NSS se logra cuando el valor óptimo de energía de sonificación es de 270 J/ml (Ríos, 2016) y como el empleo del equipo para la dispersión es un equipo Homogenizador ultrasónico modelo JY96-IIN las características para los datos de entrada se calcula previamente utilizando la tabla 33.

Tabla 33. Valor óptimo de energía de sonificación para AD-NSS

CALCULO DEL TIEMPO DE US.									
WT	%	Volumen, ml	W	J/min	Volumen de US	J/ml	ml	J	
150	60	100	1	60	100	25	100	2.500	
			90	5.400		75		7.500	
duty cycle	50%					150		15.000	
J/ml	ml	J	J/min	min_1	Duty Cycle	Total min			
25	100	2.500	5.400	0,46	0,5	1			
75		7.500		1,39		3			
120		12.000		2,22		4			
250		25.000		4,63		9			
270		27.000		5,00		10			
400		40.000		7,41		15			
600		60.000		11,11		22			
800		80.000		14,81		30			

Fuente: (Ríos, 2016)

Elaboración: El Autor

Como el Homogeneizador ultrasónico modelo JY96-IIN trabaja hasta su máxima potencia de 150 Wt, Ríos (2016), determino que si utilizaba esa potencia al 60% de su capacidad y con un ciclo de trabajo del 50%, obtiene una energía de sonicación de 270 J/min durante 5min considerando el ciclo de trabajo del 50% el total son 10min, para un volumen total de 100 ml.

*Configuración del equipo para dispersión de los NTCPM en PHs.*

La máxima dispersión de los NTCPM en PHs. se logra cuando el valor óptimo de energía de sonicación es de 250 J/ml (Ríos, 2016) y como el empleo del equipo para la dispersión es un equipo Homogeneizador ultrasónico modelo JY96-IIN las características para los datos de entrada se calcula previamente utilizando la tabla 34.

Tabla 34. Valor óptimo de energía de sonicación para AD-NSS

CALCULO DEL TIEMPO DE US.									
WT	%	Volumen, ml	W	J/min	Volumen de US	J/ml	ml	J	
150	60	100	1	60	100	25	100	2.500	
			90	5.400		75		7.500	
duty cycle	50%					150		15.000	
J/ml	ml	J	J/min	min_1	Duty Cycle	Total min			
25	100	2.500	5.400	0,46	0,50	1			
75		7.500		1,39		3			
120		12.000		2,22		4			
250		25.000		4,63		9			
270		27.000		5,00		10			
400		40.000		7,41		15			
600		60.000		11,11		22			
800		80.000		14,81		30			

Fuente: (Ríos, 2016)

Elaboración: El Autor

Para programar la dispersión de los NTCP con AD PHs, al 60% de su capacidad y con un ciclo de trabajo del 50%, se obtiene una energía de sonicación de 250 J/min durante 4,63 min de trabajo, considerando el ciclo de trabajo del 50% el total son 9 min, para un volumen a dispersar de 100 ml.

**Metodología para la elaboración de especímenes del hormigón convencional y modificado con NTCs.**

Una vez preparados todos los materiales y programado el mecanismo de dispersión con el equipo Homogeneizador ultrasónico modelo JY96-IIN para la dispersión de los NTCPM en NSS y PHs, procedemos a elaborar nuestras probetas de la siguiente manera.

- 1) Se calcula la humedad natural de los áridos gruesos y fino para calibrar la cantidad de agua necesaria para la mezcla, en este caso no fue necesario, los materiales fueron expuestos al horno por 24 horas donde la humedad natural es igual a cero.
- 2) Se pesa 337 g de arena (ver tabla 31 y 32).
- 3) Se pesa 472 g de grava de tamaño máximo nominal 12 mm (ver tabla 31 y 32).
- 4) Se pesa 288 g de cemento portland tipo GU (ver tabla 31 y 32).

- 5) Se pesa 101 g de agua destilada en un recipiente de vidrio de 100 ml (ver tabla 31 y 32).
- 6) Se pesa el valor correspondiente en gramos del agente dispersante NSS o PHs (ver tabla 31 y 32).
- 7) Se pesa los NTCPM en papel aluminio para poder colocar sobre el recipiente de 100 ml donde se encuentra el agua destilada.
- 8) Se pesa 29,29 g de agua destilada, para llevar a los áridos a la condición de SSS, con los valores de absorción del árido fino (tabla 10) y árido grueso (tabla 11), donde el valor por absorción de los áridos para la mezcla es de 1.29%.
- 9) Se realiza la dispersión por el proceso de sonicación con el equipo de ultrasonido de los NTCPM en el agente dispersante NSS o PHs, este proceso dura diez minutos, se coloca en el recipiente de vidrio de 100ml el peso de 101g de agua destilada más el % de NSS o PHs en los diferentes factores de concentración  $f_1=0,333$ ,  $f_2=0,5$ ,  $f_3=1$ ,  $f_4=2$ ,  $f_5=3$ , se introduce la solución en el equipo Homogenizador ultrasónico modelo JY96-IIN hasta que la aguja llegue a un tercio de la altura de la solución y se da inicio a la dispersión.
- 10) Durante los diez minutos de dispersión se prepara el encofrado en forma de vigueta de 5 cm x 5 cm x 20 cm, colocando desmoldante en las paredes y base del molde a la cual también se coloca el conector de cobre de 5 cm (Alambre de cobre # 10).
- 11) En el minuto 8 de dispersión de los NTCPM, se procede a mezclar de manera manual con un cucharón y recipiente metálico los 472 g de grava, los 337 g de arena con los 29,29 g de agua destilada por el lapso de 1 min, hasta llevar a los áridos a la condición de SSS.
- 12) En el minuto 9 de dispersión, a la mezcla se agrega los 288 g de cemento y continuamos la mezcla de manera manual por 1 min.
- 13) Finalizada la dispersión en el décimo minuto se vierte inmediatamente la mezcla homogenizada de NTCPM+%AD en la mezcla de hormigón y se bate manualmente por 3 min.
- 14) Pasado el tiempo de 3 min de mezcla se coloca una primera capa en el molde de la vigueta de 5 cm x 5 cm x 20 cm hasta llenar a la mitad y sedan 50 golpes leves con una varilla de aluminio de diámetro de 8mm con la cabeza redondeada y pequeños golpes a los costados para impedir que se formen vacíos de aire dentro de la mezcla, luego se coloca la segunda capa y procede de la misma forma hasta colmatar el molde.
- 15) Finalmente se resantea los bordes superiores y se deja reposar por 24 horas.
- 16) Pasada las 24 horas se pone a curar las viguetas en agua por el tiempo necesario hasta realizar el siguiente ensayo.

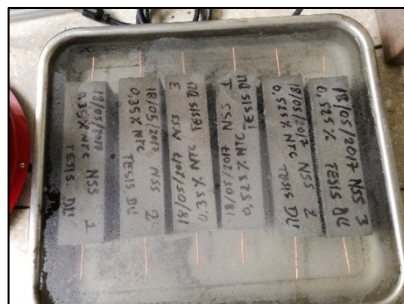


Figura 24. Curado de los especímenes de hormigón viguetas de (5x5x20) cm

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor



### **Tercera etapa**

En esta etapa se evalúa los especímenes de hormigón (viguetas de 5x5x20 cm) por medio de ensayos de resistividad y conductividad eléctrica, ensayo a flexión aplicando la norma NTE INEN 2554 para determinar el módulo de rotura y ensayo a compresión de especímenes cúbicos de hormigón (5x5x5) cm aplicando la norma NTE INEN 0488, se correlaciona y evalúa con ensayos de ultrasonido para determinar el módulo de Elasticidad y la relación de poisson,

#### ***Equipos a utilizar.***

Los equipos a usar para la evaluación y caracterización del hormigón modificado con NTCs y el hormigón convencional son los siguientes:

#### **Accu Tek**

Es un equipo dotado de una capacidad para dar carga y someter probetas a presión mediante el ensayo de compresión simple con la particularidad que se pueden ingresar datos a través de un sistema electrónico para la rotura de cubos de hormigón y comprobar su resistencia.



Figura 25. Accu tek.

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

#### **Versa Tester.**

Es una maquina universal a la que se le puede acoplar un sistema de sensores para medir la resistencia a la compresión, a la tracción y medir la deformación unitaria a través de un computador y una consola conectada a los sensores de entrada/salida Fieldpoint y la plataforma de programación LabView 8.5 de National Instrument Inc. USA, donde se registra la curva de esfuerzo-deformación mediante deformímetros y una celda de 5 kN. Los ensayos se realizaron en el modo de desplazamiento controlado a una velocidad de 0.015 pulgadas/min (1 MPa/min).

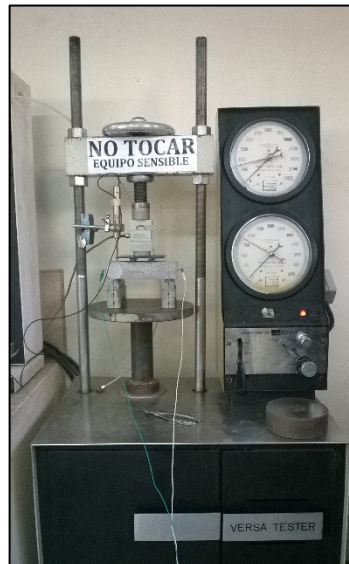


Figura 26. Versa Tester.

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

### Equipo Pundit PL-200

Es un equipo dotado de un sistema para la medición de velocidades de onda ultrasónica a través de los materiales dependiendo de los transductores se pueden medir ondas de desplazamiento horizontal y vertical, tiene múltiples aplicaciones entre ellas medir el módulo de elasticidad y la relación de poisson, el equipo está compuesto de una pantalla táctil principal, dos transductores de 54 kHz, 2 cables BNC de 1.5 m, acoplador, varilla de calibración, cable adaptador BNC y fuente de alimentación.

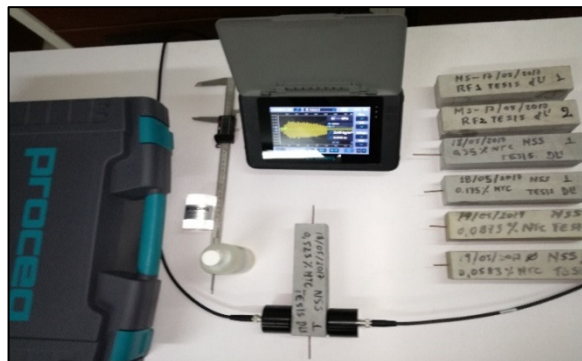


Figura 27. Equipo Pundit PL-200.

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

### Equipo para medición de la resistividad y conductividad eléctrica ideal con corriente continua.

El equipo para medir la resistividad eléctrica está configurado de un circuito eléctrico en serie compuesto por una fuente de corriente continua variable de 0 a 500 voltios c.c. y 0.1 A., un conector de polo positivo acoplado a un multímetro digital (en rango de 20 miliamperios.), un segundo conector que va desde el multímetro al elemento resistivo (Especimen de hormigón), y otro conector que va del espécimen a tierra.



Figura 28. Equipo de medición de resistividad eléctrica ideal con C.C.

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

### **Equipo de medición de resistividad eléctrica inicial y final con corriente alterna.**

El equipo para medición de la resistividad inicial y final cuando el espécimen este sometido a carga está configurado de un circuito eléctrico conformado por una fuente de corriente alterna variable de 0 a 20 voltios c.a, con conectores acoplados a una resistencia fija de  $5\text{ M}\Omega$  y la resistencia que ofrece el espécimen conectadas en serie y un medidor de señal digital (osciloscopio computarizado) conectado en paralelo con la resistencia fija de  $5\text{ M}\Omega$ .



Figura 29. Equipo de medición de resistividad eléctrica con C.A.

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

### **Evaluación de la estructura de los especímenes de hormigón (5x5x20) cm mediante ensayos de resistividad y conductividad eléctrica ideal.**

El principal objetivo de este ensayo es la de evaluar y conocer cómo se ve influenciado en la estructura del hormigón convencional y el hormigón modificado con NTCPM la resistividad y conductividad eléctrica por el paso de los electrones cuando se le aplica una cierta cantidad de corriente continua por medio de una fuente de energía cuando los especímenes no se han sometido a ninguna acción mecánica o carga.

Para discernir la manera de ejecución del ensayo lo hemos estructurado en materiales, equipos y aplicación.

Materiales:

- Espécimen o probeta prismática en forma de vigueta de (5x5x20) cm.

Equipo:

Equipo para medición de la resistividad eléctrica ideal con corriente continua.

- Multímetro Digital con rango de 20 miliamperios.
- Fuente de corriente continua, variable de 0 a 500 voltios C.C., 0.1 A.
- Cables conductor con puntas de prueba tipo lagarto.
- Termómetro manual.

Aplicación del ensayo:

- Se ajusta el voltaje de la fuente de corriente continua en 50 voltios y se apaga el equipo, luego proceder con el armado del circuito eléctrico que se define de la siguiente manera.

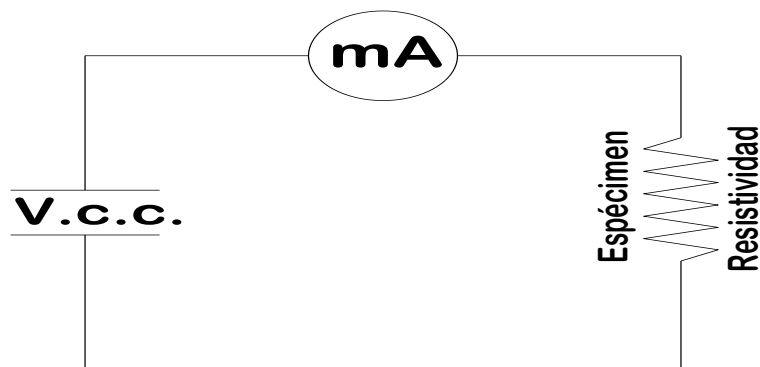


Figura 30. Diagrama del circuito para la medición, (V.c.c) Voltaje de corriente continua, (mA) Miliamperios, (Espécimen) Probeta prismática en forma de vigueta de (5x5x20) cm.

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor



Figura 31. Circuito para la medición, (V.c.c) Voltaje de corriente continua, (mA) Miliamperios, (Espécimen) Probeta prismática en forma de vigueta de (5x5x20) cm.

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

- Se enciende la fuente de corriente continua ajustado a los 50 voltios, y se aplica carga eléctrica al espécimen, se registra la intensidad de corriente que marca el multímetro digital en miliamperios que circula a través del circuito.
- Luego de aplicada la carga de 50 voltios se desconecta el espécimen del circuito y se registra la retención de voltaje de corriente continua con el multímetro digital en el espécimen al inicio de aplicación de la carga, después de 1 minuto y luego de transcurrido 5 minutos
- Esta actividad la realizamos para los especímenes de referencia de hormigón convencional, especímenes modificados con NTCPM+%NSS en concentraciones  $f_1=0,333$ ,  $f_2=0,5$ ,  $f_3=1$ ,  $f_4=2$ ,  $f_5=3$ ., y para los especímenes modificados con NTCPM+%PHs. En concentraciones  $f_1=0,333$ ,  $f_2=0,5$ ,  $f_3=1$ ,  $f_4=2$ ,  $f_5=3$ .
- Todas las actividades anteriores se repiten de la misma manera para 100, 150 y 200 voltios de corriente continua.
- Con los valores registrados de intensidad y voltaje de cada espécimen se calcula la resistencia en ohmios de las probetas aplicando la ecuación 1.24, la resistividad con la ecuación 1.25, y con la ecuación 1.26 se determina la conductividad eléctrica del material.

### **Ensayo a flexión de los especímenes de hormigón (5x5x20) cm aplicando la norma NTE INEN 2554 para determinar el módulo de rotura.**

Este ensayo se lo realizo aplicando la normativa NTE INEN 2554 o ASTM-C-78-09, para determinar la resistencia a la flexión del hormigón mediante el uso de una viga simple apoyada en los extremos y cargada en los tercios de la luz libre, el valor resultado es el módulo de rotura del espécimen, para lograr nuestro objetivo se adecuó el equipo Versa tester para los especímenes (viguetas de 5x5x20 cm) a escala siguiendo las recomendaciones de la norma ASTM-C-78-09 o INEN 2554.

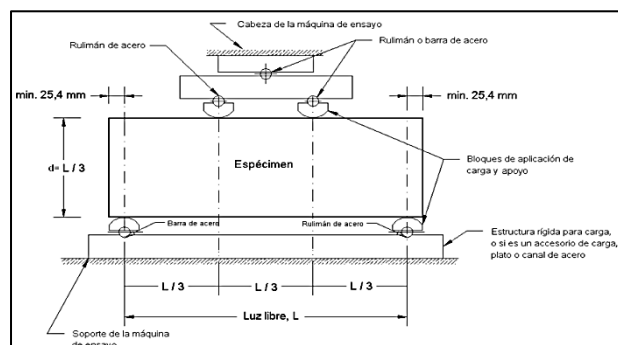


Figura 32. Esquema de un aparato apropiado para ensayos de flexión en el hormigón,

Fuente: (INEN 2554, 2011)

Elaboración: (INEN 2554, 2011)



Figura 33. Equipo Versa Tester adecuado con placa de carga de  $w_t=595,45$  g.  
Fuente: El Autor  
Elaboración: El Autor

Para discernir la manera de ejecución del ensayo lo hemos estructurado en materiales, equipos y aplicación.

#### Materiales:

- Espécimen o probeta prismática en forma de vigueta de (5x5x20) cm.

#### Equipo:

- Equipo Versa Tester con un computador y una consola conectada a los sensores de entrada/salida Fieldpoint y la plataforma de programación LabView 8.5 de National Instrument Inc. USA.
- Celda de carga de 5 kN.
- Celda acoplada con deformímetro donde se registra la curva de esfuerzo-deformación.
- Placa de carga  $w_t= 595,45$  g (superior).
- Placa y apoyos espaciados a 15 cm (inferior).
- Escuadra metálica.

#### Aplicación del ensayo:

- Se prepara el equipo Versa Tester se instala la celda de carga de 5 kN., y la celda acoplada con el deformímetro, ambos se conectan a la consola de entrada/salida de los sensores y este a un computador que es maniobrado por la plataforma de programación LabView 8.5 de National Instrument Inc. USA.
- Se alinea y se ajusta el plato de apoyo trazando los ejes perpendiculares con la alineación de los apoyos inferiores y el trazo del espécimen para que estén centrados

con la celda de carga y la placa de apoyo en las dimensiones establecidas en la figura Nro. 34 y que se puede observar en la figura Nro. 33.

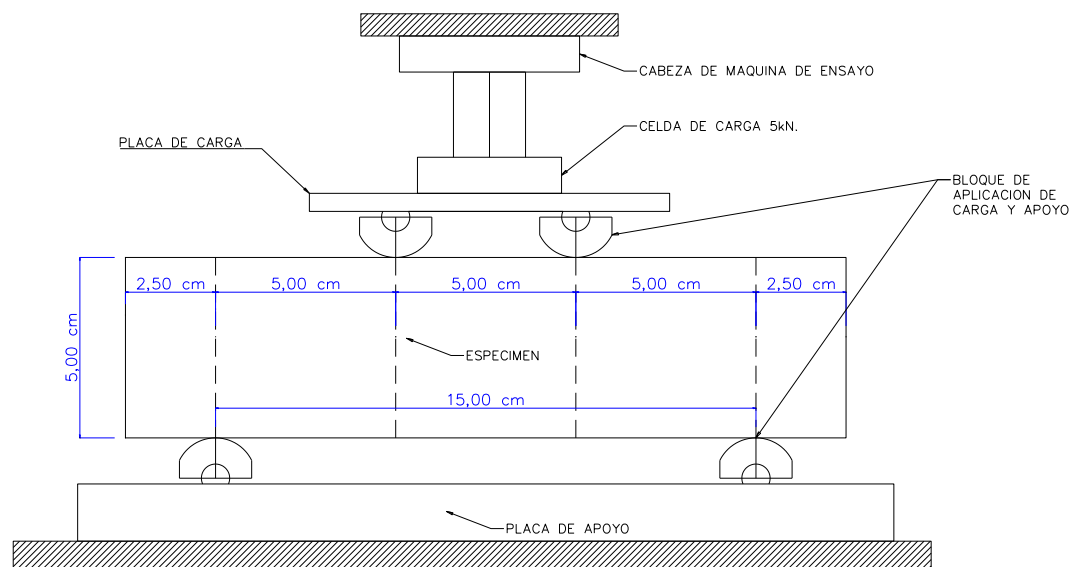


Figura 34. Diagrama del ensayo a flexión a escala para viguetas de 5x5x20 cm.

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

- Se enciende la computadora y se inicia el programa LabView 8.5, en la sección Marshall se verifica que la celda de carga de 5 kN y el deformímetro estén en el rango de carga y marquen los valores en el equipo, a continuación se encera el programa.
- Con la palanca de avance del equipo Versa Tester se aproxima la celda de carga de 5 kN a la placa de carga en una altura aproximada de 2 mm de la cara superior, se encera nuevamente los valores en el programa damos click en guardar y se aplica carga con el equipo a una velocidad de 0.015 pulgadas/min (1 MPa/min).
- La carga es aplicada hasta que la probeta falle y el programa LabView 8.5, registra automáticamente los valores de aplicación de la carga vs la deformación a través del tiempo hasta alcanzar su máxima carga aplicada en kg.
- Dependiendo de donde se produzca la fractura se calcula el módulo de rotura, si se produce en la superficie de tracción dentro del tercio medio de la luz libre se calcula el módulo de rotura de la siguiente manera

$$R = \frac{PL}{bd^2} \quad \text{Ecuación 2.14}$$

Donde:

R = módulo de rotura, en MPa.

P = carga máxima aplicada, indicada por la máquina de ensayo, en N.

L = Luz libre, en mm.

b = promedio del ancho del espécimen, en la fractura, en mm.

d = promedio de la altura del espécimen, en la fractura, en mm.

- Si la fractura se produce en la superficie de tracción fuera del tercio medio de la luz libre, pero no más allá del 5% de la luz libre, calcular el módulo de rotura de la siguiente manera

$$R = \frac{3Pa}{ba^2} \quad \text{Ecuación 2.15}$$

Donde:

a = distancia media entre la línea de fractura y el apoyo más cercano medido en la superficie de la tracción de la viga, en mm.

### **Evaluación de la estructura de los especímenes de hormigón (5x5x20) cm mediante ensayos de resistividad y conductividad eléctrica sometidos a una acción mecánica de carga.**

La aplicación de este ensayo consiste en conocer la variación de voltaje cuando un espécimen de hormigón prismático (vigüeta 5x5x20 cm), es sometido a la aplicación de una carga, este ensayo se lo realiza durante el ensayo de flexión de los especímenes de hormigón (5x5x20) cm aplicando la norma NTE INEN 2554 para determinar el módulo de rotura, donde se pretende conocer la resistividad y conductividad eléctrica inicial antes de la aplicación de la carga y la resistividad y conductividad eléctrica final cuando la probeta haya fallado.

Para discernir la manera de ejecución del ensayo lo hemos estructurado en materiales, equipos y aplicación.

Materiales:

- Espécimen o probeta prismática en forma de vigüeta de (5x5x20) cm.

Equipo:

Equipo de medición de resistividad eléctrica inicial y final con corriente alterna.

- Multímetro Digital con rango de 20 voltios A.C.
- Fuente de corriente alterna, variable de 0 a 25 voltios A.C., max. 8 A.
- Cables conductor con puntas de prueba tipo lagarto.
- Computadora portátil, con programa Visual Analyzer 2011.

Aplicación del ensayo:

- Se prepara el equipo Versa Tester se instala la celad de carga de 5 kN., y la celda acoplada con el deformimetro, ambos se conectan a la consola de entrada/salida de los sensores y este a un computador que es maniobrado por la plataforma de programación LabView 8.5 de National Instrument Inc. USA.
- Se ajusta el voltaje de la fuente de corriente alterna A.C. en 15 voltios y se apaga el equipo, luego proceder con el armado del circuito eléctrico que se define de la siguiente manera.



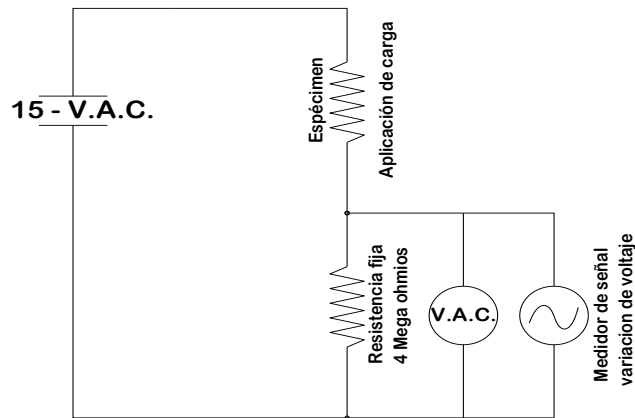


Figura 35. Diagrama del circuito para medición de la variación de voltaje en especímenes de hormigón sometidos a carga (viguetas de 5x5x20 cm.)

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

- Se alinea y se ajusta el plato de apoyo trazando los ejes perpendiculares con la alineación de los apoyos inferiores y el trazo del espécimen para que estén centrados con la celda de carga y la placa de apoyo en las dimensiones establecidas en la figura Nro. 34.
- Se enciende la computadora y se inicia el programa Visual Analiser 2011, se coordina las acciones con el programa LabView 8.5 en la sección Marshall se verifica que la celda de carga de 5 kN y el deformímetro estén en el rango de carga y marquen los valores en el equipo, a continuación se encera el programa LabView 8.5.
- Luego de armado el circuito en el programa Visual Analiser 2011 se calibra el voltaje que circula antes de aplicar la carga al espécimen con la perilla del potenciómetro hasta regular y verificar que el voltaje que mide el multímetro digital sea el mismo que este midiendo en la pantalla el programa Visual Analiser 2011.



Figura 36. Circuito de medición de variación de voltaje calibrado.

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

- En el programa Visual Analiser 2011 se ajusta las cuadrículas de la señal hasta obtener una señal estable y legible a una frecuencia de 60 Hertz.

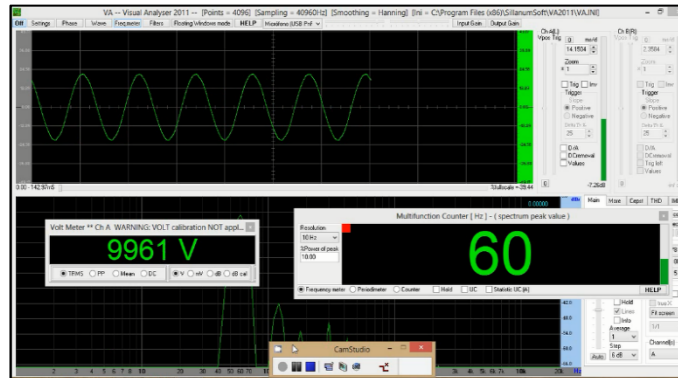


Figura 37. Pantalla del programa Visual Analiser 2011.

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

- Con la palanca de avance del equipo Versa Tester se aproxima la celda de carga de 5 kN a la placa de carga en una altura aproximada de 2 mm de la cara superior, se encera nuevamente los valores en el programa LabView 8.5 y damos click en guardar y se aplica carga con el equipo a una velocidad de 0.015 pulgadas/min (1 MPa/min).
- La carga es aplicada hasta que la probeta falle y el programa Visual Analiser 2011, muestra la variación de voltaje de A.C. hasta el instante de la falla, para registrar el valor de la variación de voltaje A.C., se aplica el programa CamStudio que guarda en un video la pantalla del Visual Analiser 2011 durante el ensayo de flexión, luego se revisa el video y se registra el valor de voltaje A.C. inicial y A.C. final.
- Con los valores registrados de voltaje A.C. inicial y A.C. final aplicando la ley de Ohm y la teoría de divisor de voltaje se calcula para cada espécimen la resistencia en ohmios de la siguiente manera.

$$\frac{v}{v1} = \frac{R1+R2}{R2} \quad \text{Ecuación 2.16}$$

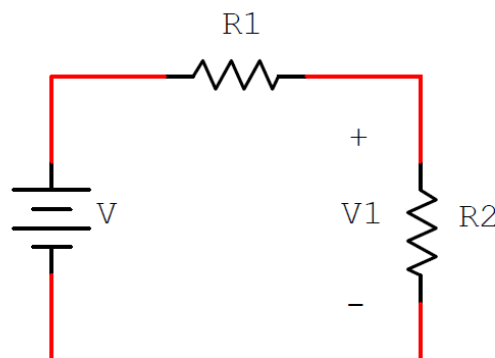


Figura 38. Representación gráfica de la ecuación 2.16

Fuente: (Santiago de Cali, n.d.)

Elaboración: (Santiago de Cali, n.d.)

- Con los valores registrados de intensidad y voltaje de cada espécimen se calcula la resistencia en ohmios de las probetas aplicando las ecuaciones 1.24 y resistividad con la ecuación 1.25, y con la ecuación 1.26 se determina la conductividad eléctrica del material.

**Ensayo a compresión de especímenes (5x5x5) cm cúbicos de hormigón aplicando la norma NTE INEN 0488.**

La aplicación de este ensayo consiste en conocer la resistencia a la compresión de los especímenes de hormigón prismático (cubitos 5x5x5 cm), cuando son sometidos a la acción de una carga, aplicando la norma NTE INEN 488, Determinación de la resistencia a la compresión de morteros en cubos de 50 mm de arista.

Para discernir la manera de ejecución del ensayo lo hemos estructurado en materiales, equipos y aplicación.

**Materiales:**

- Espécimen o probeta prismática en forma de cubos de (5x5x5) cm.

**Equipo:**

- Accu Tek
- Placas de Apoyo superior e inferior.
- Escuadra metálica.

**Aplicación del ensayo:**

- Se elaboran especímenes prismáticos en forma de cubos de 5x5x5 cm en las mismas proporciones y concentraciones establecidas en la sección 2.2.1.4.
- Se prepara el equipo Accu Tek y se trazan las placas de apoyo para centrar los especímenes cúbicos entre la placa superior y placa inferior.
- Se ajustan los controles del equipo hasta una velocidad de carga con un incremento uniforme de velocidad entre los cabezales superior e inferior hasta alcanzar una carga sobre el espécimen entre el rango de 900 a 1.800 N/s se centra el espécimen y se aplica la carga hasta la falla.
- Se registra la máxima carga aplicada y procede con el cálculo.
- La resistencia a la compresión en cubos de 50 mm de arista se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$fm = \frac{P}{A} \quad \text{Ecuación 2.17}$$

Donde:

$fm$  = Resistencia a la compresión en MPa.

P = Carga total máxima de la falla, en N.

$A$  = Área de la sección transversal del cubo a la que se aplica la carga, en  $\text{mm}^2$ .



Figura 39. Representación gráfica de la ecuación 2.16

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

### **Evaluación de la estructura de los especímenes de hormigón (5x5x20) cm mediante ensayos de ultrasonido y determinación del módulo de Elasticidad y relación de poisson.**

La ejecución de este ensayo se realiza para determinar el módulo de Elasticidad y la relación de poisson de los especímenes de hormigón prismático, por medio de la determinación de las velocidades de pulso ultrasónicas elásticas constantes en rocas con la aplicación de la norma ASTM D-2845.

Para discernir la manera de ejecución del ensayo lo hemos estructurado en materiales, equipos y aplicación.

Materiales:

- Espécimen o probeta prismática en forma de cubos de (5x5x5) cm.
- Gel para medición de velocidad ultrasónica.

Equipo:

- Pundit Pl-200
- Transductores 54 Hz.
- Calibrador vernier
- Esclerómetro.

Aplicación del ensayo:

- Con el equipo de medición ultrasónica Pundit PL-200, se correlaciona la resistencia a la compresión de las probetas cubicas de arista 50mm con el número de golpes obtenidos de un ensayo con esclerómetro, el valor del número de rebotes del esclerómetro denominado (X) se ingresa en el equipo Pundit PL-200 en la sección de resistencia a la compresión del equipo utilizando la tabla RILEM-NDT, hecho esto se puede evaluar la resistencia a la compresión de la estructura mediante medición de onda ultrasónica.
- Para la medición del módulo de elasticidad y la relación del poisson, debe previamente definir el tiempo de transmisión del pulso ultrasónico, la distancia de los transductores, de las ondas de pulso ultrasónico y la velocidad de la onda, seleccionamos en el equipo la sección Modulo E, esta permite analizar la onda de pulso dual entre la velocidad de propagación de la onda transversal Vs y la velocidad de onda longitudinal Vp, El modo de cursor dual es activado automáticamente, usar el primer cursor para marcar el comienzo del componente de onda P y usar el segundo cursor para marcar el comienzo del componente de onda transversal.
- Para calcular el módulo de elasticidad es necesario introducir la densidad del material, para calcular el coeficiente de Poisson y el módulo de elasticidad se aplica las ecuaciones 1.22 y 1.23.



Figura 40. Pantalla Equipo Pundit PL-200, Determinación del Módulo de Elasticidad

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

### Resultados de la primera etapa.

Para determinar los efectos que producen los NTCPM en las probetas de hormigón, se elaboró cinco muestras de referencia Ho-MS-RF, sobre las cuales se evaluó y se aplicó el mismo ensayo y en las mismas condiciones a los que fueron evaluados y ensayados los especímenes modificados de Ho+wt%NTCPM+wt%AD-NSS y Ho+wt%NTCPM+wt%AD-PHs, para cada combinación y factor de concentración se elaboraron tres especímenes PHs-f+wt%NTCPM-N y NSS-f+wt%NTCPM-N, con el afán de corroborar la valoración de los datos obtenidos.

## Efectos de los NTCPM en la resistividad y conductividad eléctrica ideal en probetas de hormigón (viguetas de 5x5x20 cm).

El propósito de medir la resistividad y conductividad eléctrica en las probetas de hormigón es la de conocer si la estructura del hormigón fue modificada por los NTCPM en la pasta cementante donde se pretende van actuar las propiedades eléctricas de los NTCPM, si los NTCs son capaces de transportar en su interior al menos un electrón, el movimiento de los electrones en toda la masa de la estructura del hormigón debe ser tal que en escala manométrica convierta al hormigón en un material conductor de energía eléctrica siempre y cuando la dispersión de los NTCs en la pasta cementante sea homogénea.

Como las probetas son sometidas a un curado intenso bajo el agua para que actúen los cristales del cemento, el agua se convierte en un material altamente conductivo, para revertir el efecto del H<sub>2</sub>O y eliminar todo contacto con ella, dos muestras de probetas sin ser modificadas, cinco muestras de PHS-n-f+%NCPM y cinco muestras de NSS-n-f+%NCPM son sometidas al calor a 120°C en un horno por 24 horas.

Los resultados que se muestran en la Tabla Nro. 35, determinan los efectos que ocasionan la incorporación de los NTCPM en la pasta de cemento, el hormigón convencional no modificado se comporta como un material no conductor al presentar una alta resistencia al paso de la corriente continua, lo contrario ocurre con el hormigón modificado con NTCPM, las probetas en las que se usaron los NTCPM dispersadas con AD a base de PHS presentan mayor conductividad eléctrica al disminuir su resistencia al paso de la corriente directa (ohmios) en hasta 435 veces (figura Nro. 41), convirtiendo al hormigón en un material altamente conductor (figura Nro. 42), las probetas que fueron dispersadas con NTCPM en AD a base de NSS, también presentan un notable grado de conductividad eléctrica pero su resistencia al paso de la corriente directa (ohmios) es un poco mayor que los hormigones donde se utilizó el PHS. como AD (figura Nro. 41 y 43).

Tabla 35. Resistividad y Conductividad Eléctrica en Probetas de Hormigón en condición seca.

PROBETA:		VIGUETA DE 5 cm x 5 cm x 20 cm			
Nro. De probetas		12			
PROBETA:	factor de concentración (f)	Resistencia C.C. Ohmios	Resistencia Mega-ohmios (mΩ)	Resistividad Eléctrica (mΩ. metro)	Conductividad Eléctrica Mega Siemens (mS)
MS-RF-1	0,000	50.000.000,00	50,00	0,616	1,623
MS-RF-2	0,000	50.000.000,00	50,00	0,629	1,590
PHS-1+0,0583 % NTCPMs.	0,333	699.874,07	0,700	0,0090	111,11
PHS-1+0,0875 % NTCPMs	0,500	219.102,93	0,219	0,0030	333,33
PHS-1+0,1750 % NTCPMs	1,000	114.759,26	0,115	0,0010	1.000,00
PHS-1+0,3500 % NTCPMs	2,000	200.137,90	0,200	0,0030	333,33
PHS-1+0,5250 % NTCPMs	3,000	310.658,83	0,311	0,0040	250,00
NSS-1+0,0583 % NTCPMs.	0,333	2.869.550,66	2,87	0,04	27,78
NSS-1+0,0875 % NTCPMs.	0,500	4.449.664,92	4,45	0,06	17,86

NSS-1+0,1750 % NTCPMs.	1,000	1.895.699,07	1,90	0,02	41,67
NSS-1+0,3500 % NTCPMs.	2,000	965.435,16	0,97	0,01	83,33
NSS-1+0,5250 % NTCPMs.	3,000	8.645.833,33	8,65	0,11	9,26

**Nota:** Las probetas fueron sometidas a 120° C durante 24 horas antes del ensayo

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

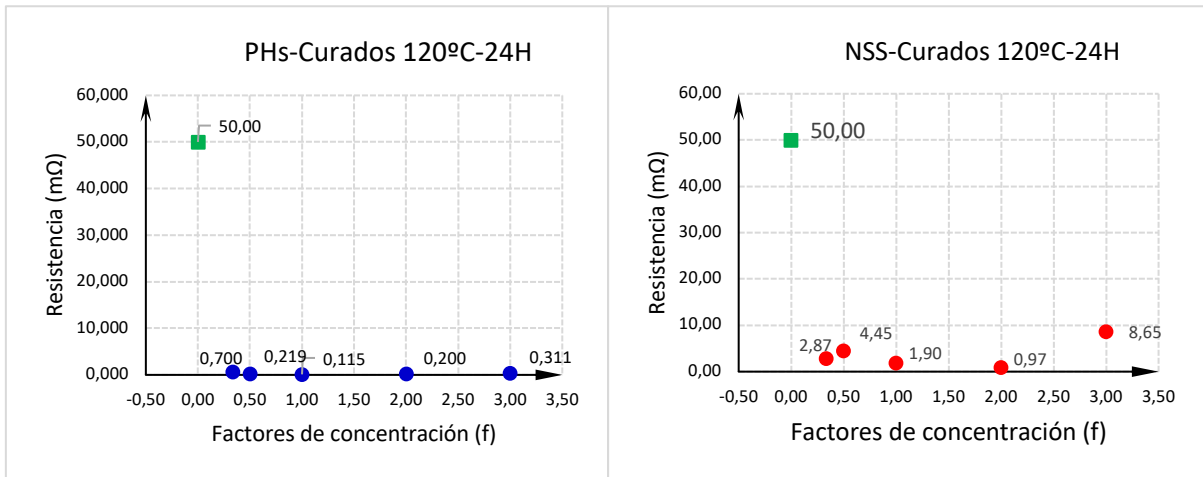


Figura 41. Resistencia eléctrica en mega ohmios de hormigones MS-RF, PHs-f-wt%NTCPM y NSS-f-wt%NTCPM condición seca.

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

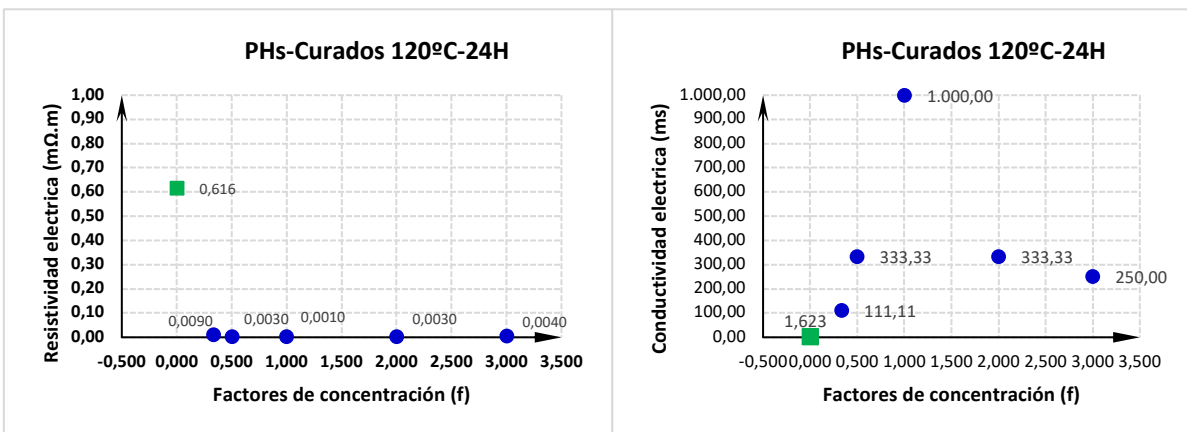


Figura 42. Resistividad (mΩ.m) y Conductividad (mS), de hormigones MS-RF, PHs-f-wt%NTCPM en condición seca.

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

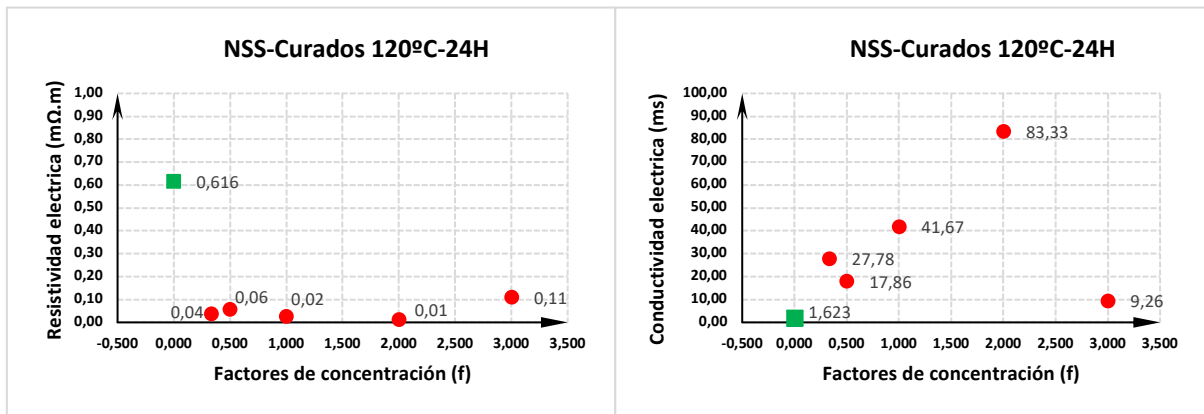


Figura 43. Resistividad (mΩ.m) y Conductividad (mS), de hormigones MS-RF, NSS-f-wt%NTCPM  
Fuente: El Autor  
Elaboración: El Autor

Para verificar los efectos de la humedad natural en el hormigón modificado con NTCPM, tres probetas de hormigón convencional MS-RF, diez probetas de PHS-n-f+%NCPM y diez probetas de NSS-n-f+%NCPM, se someten a temperatura de 60°C por seis horas con el ánimo de tener en condiciones de saturada superficialmente seca las probetas de hormigón y a una temperatura ambiente de 25°C se realiza la medición de la resistividad y conductividad eléctrica, los resultado obtenidos se presentan en la tabla Nro. 36, donde claramente se puede establecer que la humedad crea un efecto de conductividad homogénea en las probetas PHS-n-f+%NCPM y NSS-n-f+%NCPM llevándolas a similares condiciones de resistividad y conductividad eléctrica independientemente del AD que se utilice para la dispersión de los NTCs.

Tabla 36. Resistividad y Conductividad Eléctrica en Probetas de Hormigón en condición húmeda SSS.

<b>PROBETA:</b>					
<b>VIGUETA DE 5 cm x 5 cm x 20 cm</b>					
<b>Nro. De probetas</b>					
<b>23</b>					
<b>PROBETA:</b>	<b>factor de concentración n (f)</b>	<b>Resistencia C.C. Ohmios</b>	<b>Resistencia Mega-ohmios (mΩ)</b>	<b>Resistividad Eléctrica (mΩ. metro)</b>	<b>Conductividad Eléctrica Mega Siemens (mS)</b>
MS-RF- 3	0,000	50.000.000,00	50,00	0,637	1,570
MS-RF- 4	0,000	50.000.000,00	50,00	0,637	1,570
MS-RF- 5	0,000	50.000.000,00	50,00	0,634	1,577
PHS-2+0,0583 % NTCPMs.	0,333	3.381.008,36	3,38	0,043	23,256
PHS-2+0,0875 % NTCPMs.	0,500	3.050.400,54	3,05	0,039	25,641
PHS-2+0,1750 % NTCPMs.	1,000	3.347.457,63	3,35	0,042	23,810
PHS-2+0,3500 % NTCPMs.	2,000	3.555.764,41	3,56	0,046	21,739
PHS-2+0,5250 % NTCPMs.	3,000	3.741.859,99	3,74	0,048	20,833
PHS-3+0,0583 % NTCPMs.	0,333	4.512.696,00	4,51	0,057	17,544



PHS-3+0,0875 % NTCPMs.	0,500	3.179.224,75	3,18	0,040	25,000
PHS-3+0,1750 % NTCPMs.	1,000	3.179.224,75	3,18	0,040	25,000
PHS-3+0,3500 % NTCPMs.	2,000	4.401.350,46	4,40	0,057	17,544
PHS-3+0,5250 % NTCPMs.	3,000	4.218.591,69	4,22	0,053	18,868
NSS-2+0,0583 % NTCPMs.	0,333	3.699.679,30	3,70	0,044	22,727
NSS-2+0,0875 % NTCPMs.	0,500	4.545.454,55	4,55	0,057	17,544
NSS-2+0,1750 % NTCPMs.	1,000	5.032.051,28	5,03	0,063	15,873
NSS-2+0,3500 % NTCPMs.	2,000	5.000.000,00	5,00	0,064	15,625
NSS-2+0,5250 % NTCPMs.	3,000	5.555.555,56	5,56	0,070	14,286
NSS-3+0,0583 % NTCPMs.	0,333	3.372.093,02	3,37	0,043	23,256
NSS-3+0,0875 % NTCPMs.	0,500	4.449.664,92	4,45	0,056	17,857
NSS-3+0,1750 % NTCPMs.	1,000	1.895.699,07	1,90	0,024	41,667
NSS-3+0,3500 % NTCPMs.	2,000	965.435,16	0,97	0,013	76,923
NSS-3+0,5250 % NTCPMs.	3,000	8.645.833,33	8,65	0,110	9,091

**Nota:** Las probetas fueron sometidas a 60° C durante 6 horas antes del ensayo

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

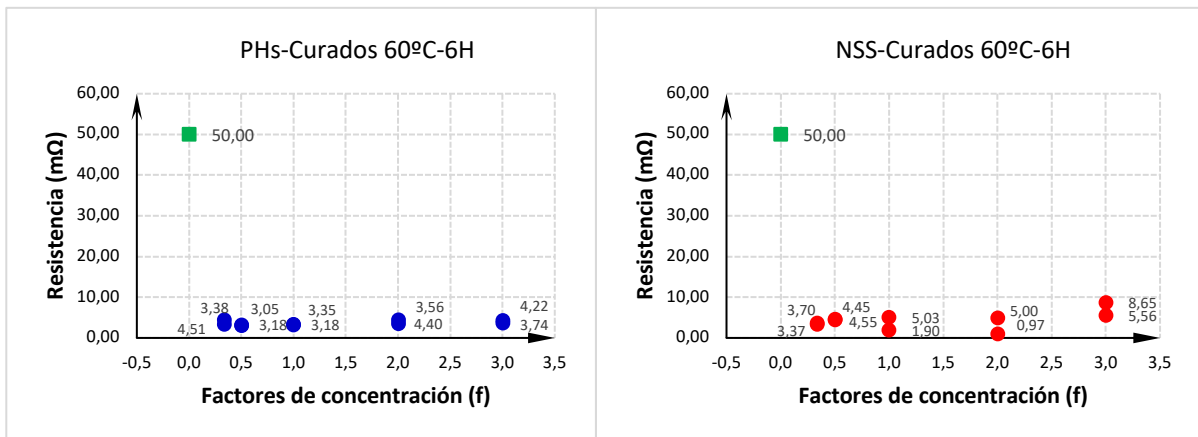


Figura 44. Resistencia eléctrica en mega ohmios de hormigones MS-RF, PHS-f-wt%NTCPM y NSS-f-wt%NTCPM condición húmeda SSS.

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

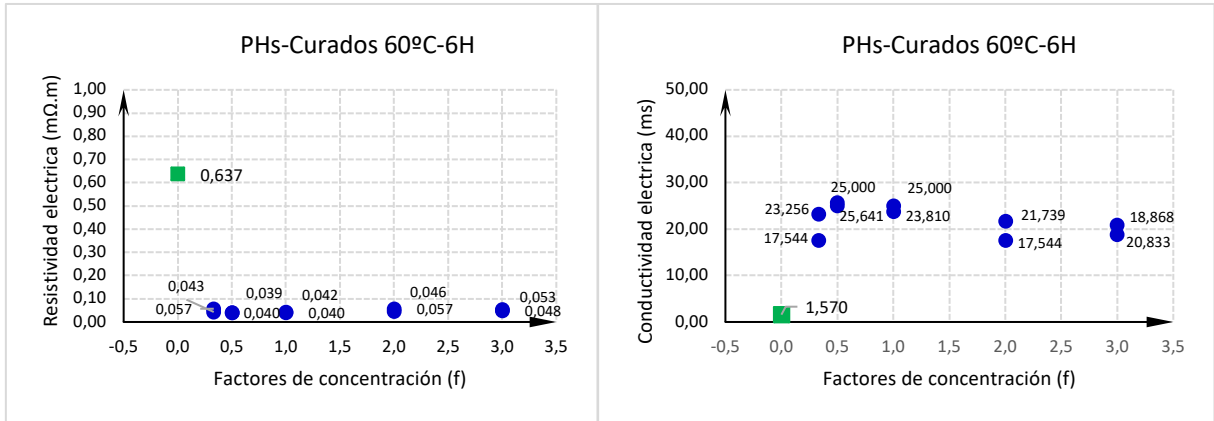
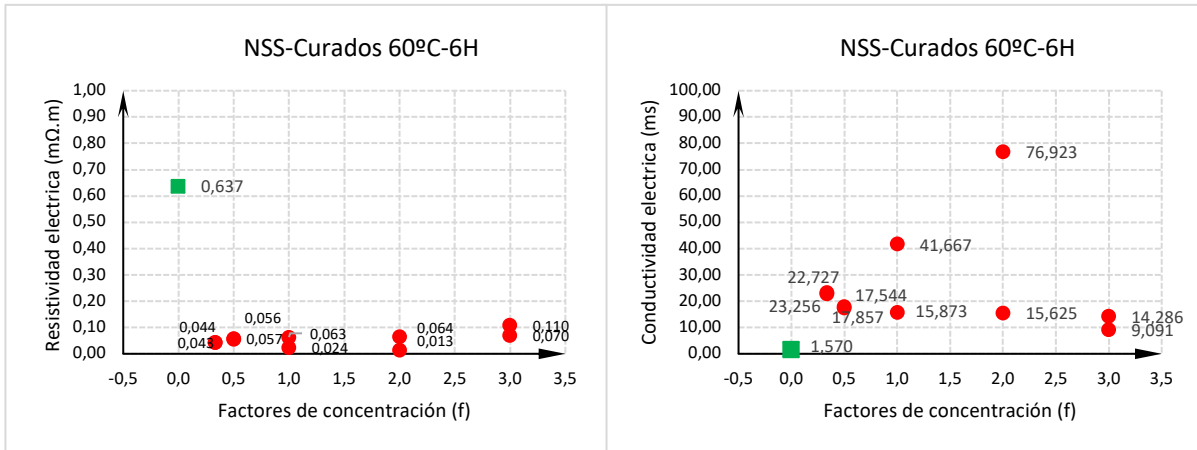


Figura 45. Resistividad (mΩ.m) y Conductividad (mS), de hormigones MS-RF, PHs-f-wt%NTCPM en condición húmeda SSS.

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

Figura 46. Resistividad (mΩ.m) y Conductividad (mS), de hormigones MS-RF, NSS-f-wt%NTCPM en



condición húmeda SSS.

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

Para aseverar que el efecto en las propiedades eléctricas del hormigón se produce por la incorporación de los NTCPM se midió también la capacidad de retención de voltaje de corriente continua en las probetas de hormigón al inicio de la aplicación de la carga al 1 min y a los 5 min., cuyos resultados obtenidos en condiciones secas (probetas sometidas a 120°C durante 24 horas) tabla Nro. 37, y en condiciones húmedas (probetas sometidas a 60°C durante 6 horas) tabla Nro. 38, corroboran que la presencia de los NTCPM en la estructura del hormigón a más de otorgarle la capacidad de ser conductivo le da la capacidad de retener voltaje.

La retención del voltaje de corriente continua para las probetas de hormigón en estado seco varía entre 1,958 V.c.c. a 1,342 V.c.c para las probetas modificadas con PHs-n-f+%NCPM y entre 2,333 V.c.c. a 1,450 V.c.c para las modificadas NSS-n-f+%NCPM, a diferencia de las muestras de referencia que no retienen energía, ver figura Nro. 47.

Tabla 37. Retención de voltaje de corriente continua V.c.c. en estado seco.

<b>PROBETA:</b>		<b>VIGUETA DE 5 cm x 5 cm x 20 cm</b>
<b>Nro. De probetas</b>		<b>12</b>
<b>Tiempo Max. de retención medida:</b>		<b>5 min</b>
<b>PROBETA:</b>	<b>factor de concentración (f)</b>	<b>Voltaje C.C. retenido (VCC)</b>
MS-RF- 1	0,000	0,000
MS-RF- 2	0,000	0,000
PHS-1+0,0583 % NTCPMs.	0,333	1,958
PHS-1+0,0875 % NTCPMs.	0,500	1,504
PHS-1+0,1750 % NTCPMs.	1,000	1,358
PHS-1+0,3500 % NTCPMs.	2,000	1,342
PHS-1+0,5250 % NTCPMs.	3,000	1,875
NSS-1+0,0583 % NTCPMs.	0,333	1,779
NSS-1+0,0875 % NTCPMs.	0,500	1,450
NSS-1+0,1750 % NTCPMs.	1,000	1,513
NSS-1+0,3500 % NTCPMs.	2,000	2,333
NSS-1+0,5250 % NTCPMs.	3,000	1,479

**Nota:** Las probetas fueron sometidas a 120° C durante 24 horas antes del ensayo

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

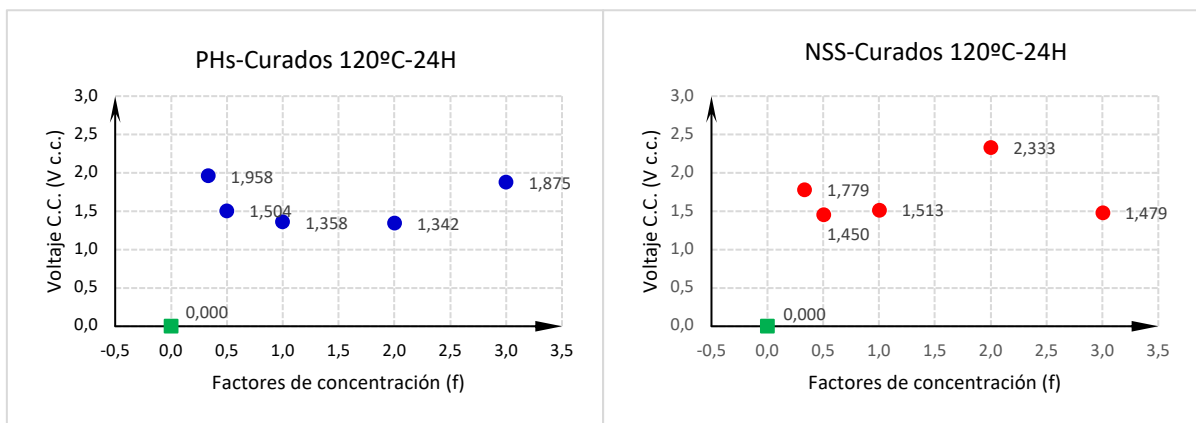


Figura 47. Capacidad de retención de voltaje c.c. en hormigones MS-RF, PHS-f-wt%NTCPM y NSS-f-wt%NTCPM condición seca.

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

La retención del voltaje de corriente continua para las probetas de hormigón en estado húmedo condición de SSS., son mucho más estables varía entre 1,275 V.c.c. a 1,508 V.c.c para las probetas modificadas con PHS-n-f+%NCPM y entre 1,333 V.c.c. a 1,700 V.c.c para las modificadas NSS-n-f+%NCPM, a diferencia de las muestras de referencia que no retienen energía, ver figura Nro. 48, una de las características relevantes es el aporte que realiza la presencia del agua en la estructura del hormigón que en estado húmedo a ambas combinaciones de AD-PHS y AD-NSS, los lleva a tener valores muy similares.

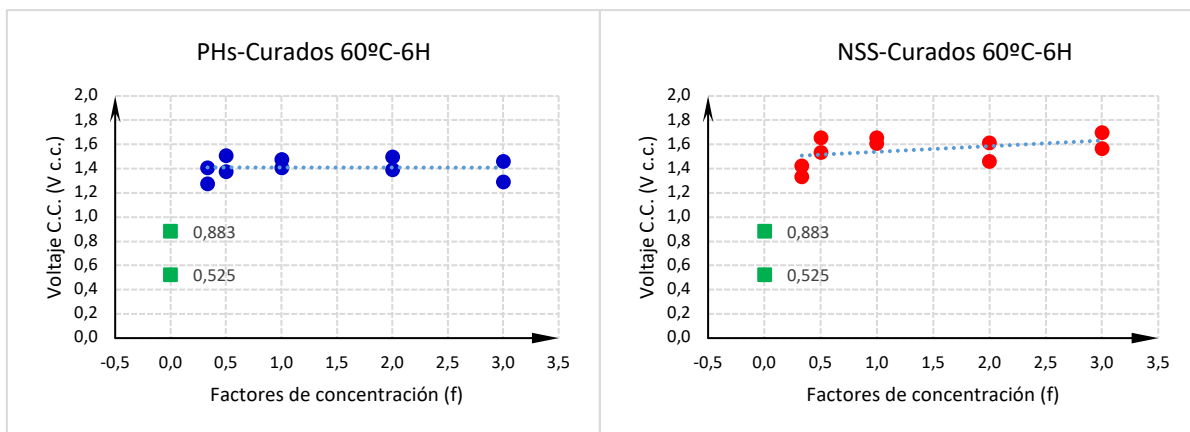


Figura 48. Capacidad de retención de voltaje c.c. en hormigones MS-RF, PHS-f-wt%NTCPM y NSS-f-wt%NTCPM condición húmeda SSS.

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

Tabla 38. Retención de voltaje de corriente continua V.c.c. en estado húmedo SSS.

<b>PROBETA:</b>		<b>VIGUETA DE 5 cm x 5 cm x 20 cm</b>	
<b>Nro. De probetas</b>		<b>23</b>	
<b>Tiempo Max. de retención medida:</b>		<b>5 min</b>	
<b>PROBETA:</b>	<b>factor de concentración (f)</b>	<b>Voltaje C.C. retenido (VCC)</b>	
MS-RF- 3	0,000	0,883	
MS-RF- 4	0,000	0,525	
MS-RF- 5	0,000	0,525	
PHS-2+0,0583 % NTCPMs.	0,333	1,408	
PHS-2+0,0875 % NTCPMs.	0,500	1,508	
PHS-2+0,1750 % NTCPMs.	1,000	1,408	
PHS-2+0,3500 % NTCPMs.	2,000	1,392	
PHS-2+0,5250 % NTCPMs.	3,000	1,458	
PHS-3+0,0583 % NTCPMs.	0,333	1,275	
PHS-3+0,0875 % NTCPMs.	0,500	1,375	
PHS-3+0,1750 % NTCPMs.	1,000	1,475	
PHS-3+0,3500 % NTCPMs.	2,000	1,500	
PHS-3+0,5250 % NTCPMs.	3,000	1,292	
NSS-2+0,0583 % NTCPMs.	0,333	1,333	
NSS-2+0,0875 % NTCPMs.	0,500	1,533	
NSS-2+0,1750 % NTCPMs.	1,000	1,658	
NSS-2+0,3500 % NTCPMs.	2,000	1,617	
NSS-2+0,5250 % NTCPMs.	3,000	1,700	
NSS-3+0,0583 % NTCPMs.	0,333	1,425	
NSS-3+0,0875 % NTCPMs.	0,500	1,658	
NSS-3+0,1750 % NTCPMs.	1,000	1,608	

NSS-3+0,3500 % NTCPMs.	2,000	1,458
NSS-3+0,5250 % NTCPMs.	3,000	1,567

**Nota:** Las probetas fueron sometidas a 60° C durante 6 horas antes del ensayo

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

### **Efectos de los NTCPM en la resistencia a la flexión o módulo de rotura en probetas de hormigón (viguetas de 5x5x20 cm).**

Uno de los factores más importantes desde el punto de vista estructural en pavimentos rígidos es el Modulo de Rotura del hormigón, pues de este depende la capacidad de soportar el número de repeticiones permisibles de ejes de vehículos sobre la capa de rodadura de un pavimento rígido y es quien va controlar la capacidad de resistencia al agrietamiento por fatiga del hormigón.

Las probetas de hormigón para el presente trabajo de investigación fueron ensayadas bajo la norma NTE INEN 2554 o ASTM-C-78-09 en diferentes edades con el propósito de conocer los efectos que producen en el módulo de rotura la presencia de los NTCPM, se consideraron cinco muestras de referencia de hormigones que no fueron modificados con NTCs, quince muestras modificadas con PHS-n-f+%NCPM y quince modificadas NSS-n-f+%NCPM.

Los resultados obtenidos de las probetas curadas a la edad de 22 días están establecidas en la tabla 39, donde se puede observar claramente como los NTCPM modifican la estructura del hormigón a escala nanométrica incrementando el Módulo de rotura en un 64,86% para hormigones modificados con PHS-f+%NCPM y 64,86% para hormigones modificados con NSS-f+%NCPM, debido a las propiedades mecánicas de los NTCs ya que poseen una alta resistencia a la tracción de hasta 45 GPa., para los NTCPM, (ver tabla Nro. 4).

Tabla 39. Módulo de rotura en especímenes de hormigón no modificado y modificado con NTCPM, promedio de edades a 22 días.

DESCRIPCIÓN:	EDAD	factor de concentración (f)	Mr Promedio (MPa)	% Incremento
MS-RF	x	0,000	3,33	0,00%
PHS-f+0,0583 % NTCPMs.	x	0,333	4,75	42,64%
PHS-f+0,0875 % NTCPMs.	x	0,500	5,49	64,86%
PHS-f+0,1750 % NTCPMs.	x	1,000	4,70	41,14%
PHS-f+0,3500 % NTCPMs.	x	2,000	5,49	64,86%
PHS-f+0,5250 % NTCPMs.	x	3,000	5,20	56,16%
NSS-f+0,0583 % NTCPMs.	x	0,333	2,16	-35,14%
NSS-f+0,0875 % NTCPMs.	x	0,500	4,43	33,03%
NSS-f+0,1750 % NTCPMs.	x	1,000	4,85	45,65%
NSS-f+0,3500 % NTCPMs.	x	2,000	5,12	53,75%
NSS-f+0,5250 % NTCPMs.	x	3,000	5,49	64,86%

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

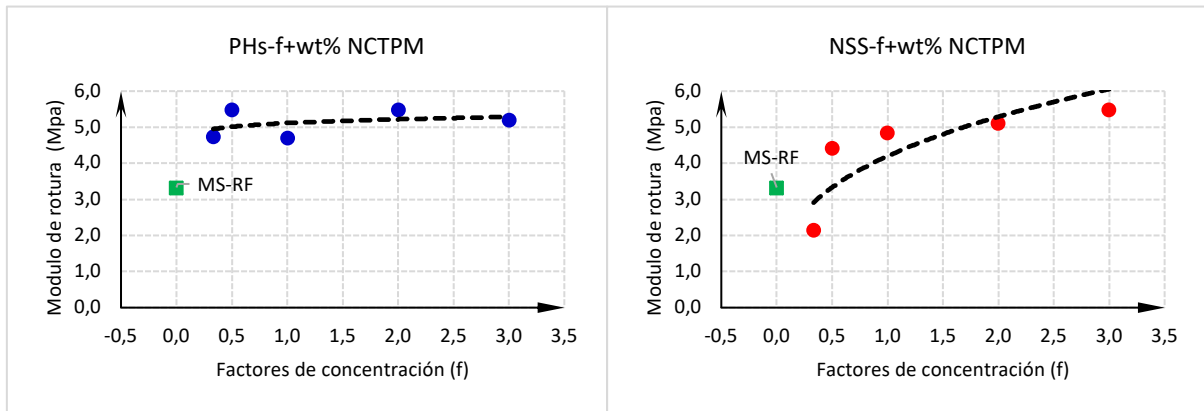


Figura 49. Distribución del Módulo de rotura vs el factor de concentración de los NTCPM a 22 días.

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

Para edades de 35 hasta 64 días, los resultados se detallan en la tabla 40, en la que se puede observar la capacidad que tiene los NTCPM de mantener la estructura del hormigón modificada a escala nanométrica manteniendo el Módulo de rotura en niveles superiores a los hormigones no modificados con NTCPM, incrementando el módulo de rotura en 46,70% para hormigones modificados con PHS-f+%NCPM y 62,61% de incremento para hormigones modificados con NSS-f+%NCPM.

Tabla 40. Módulo de rotura en especímenes de hormigón no modificado y modificado con NTCPM, promedio de edades a 35-64 días.

DESCRIPCIÓN:	EDAD	factor de concentración (f)	Mr Promedio (MPa)	% Incremento
MS-RF	x	0,000	3,33	0,00 %
PHS-f+0,0583 % NTCPMs.	x	0,333	3,87	16,07%
PHS-f+0,0875 % NTCPMs.	x	0,500	3,58	7,36%
PHS-f+0,1750 % NTCPMs.	x	1,000	4,32	29,58%
PHS-f+0,3500 % NTCPMs.	x	2,000	4,78	43,54%
PHS-f+0,5250 % NTCPMs.	x	3,000	4,89	46,70%
NSS-f+0,0583 % NTCPMs.	x	0,333	4,97	49,10%
NSS-f+0,0875 % NTCPMs.	x	0,500	4,83	45,05%
NSS-f+0,1750 % NTCPMs.	x	1,000	5,42	62,61%
NSS-f+0,3500 % NTCPMs.	x	2,000	4,27	28,08%
NSS-f+0,5250 % NTCPMs.	x	3,000	4,82	44,59%

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

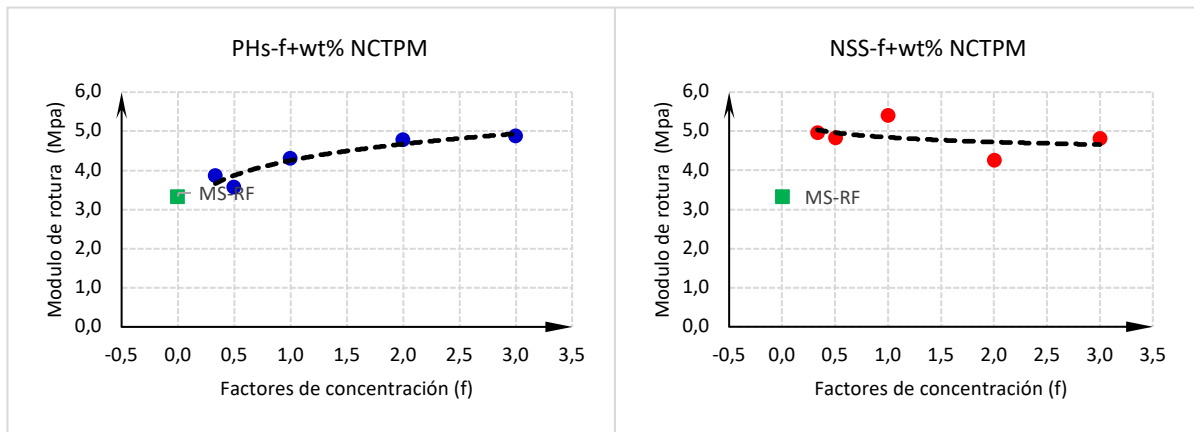


Figura 50. Distribución del Módulo de rotura vs el factor de concentración de los NTCPM a 35-64 días.

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

La figura Nro. 49 y la figura Nro. 50, denotan claramente como se ve influenciado la estructura del hormigón por la presencia de los NTCPM en la pasta cementante con los diferentes factores de concentración empleado, como la diferencia de edades no es tan extensa hasta que los cristales de cemento alcancen su mayor crecimiento en los 28 días, y sabiendo que estos son los únicos elementos que evolucionan con la edad se ha elaborado la figura Nro. 51, la que incluye todos los valores de los módulos de rotura de todas la edades y todas las probetas con el ánimo de conocer su curva de valoración módulo de rotura vs factor de concentración.

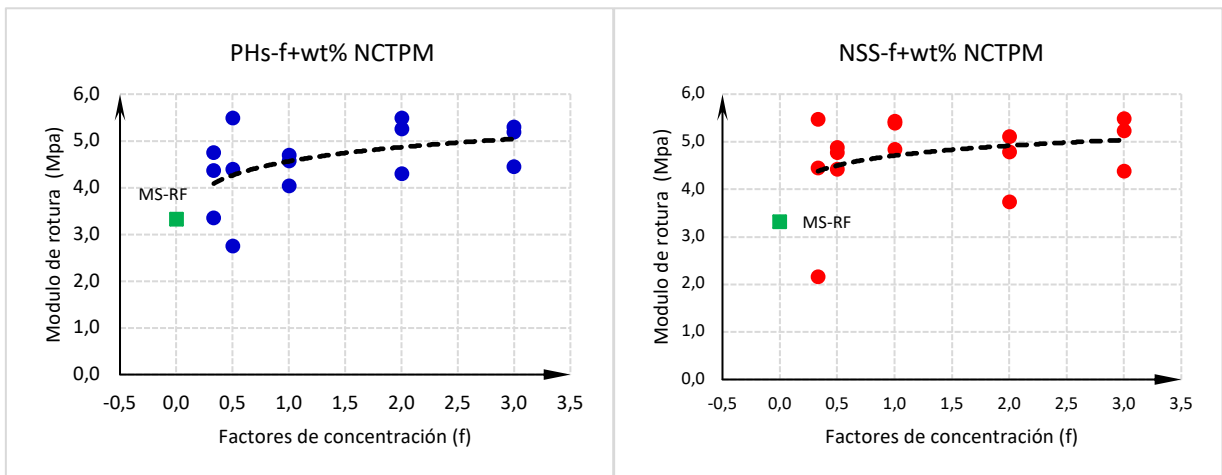


Figura 51. Curva de valoración Módulo de rotura vs el factor de concentración de los NTCPM a 22-35-64 días.

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

Tabla 41. Correlaciones del Módulo de rotura teórico vs el Modulo de rotura medido.

ESCRIPCIÓN:	EDAD	Resistencia f'c (MPa)	ACI $\lambda = 1$ (MPa)	Norma Colombiana (MPa)	Norma Española (MPa)	Huang- EEUU (MPa)	Ensayo ASTM- C-78- 09 (MPa)	Variación
MS-RF- 1	24	40,78	3,96	4,47	<b>3,55</b>	4,24	<b>3,03</b>	0,85
MS-RF- 2	24	34,34	3,63	4,10	<b>3,17</b>	3,89	<b>2,69</b>	0,85
MS-RF- 3	34	42,18	4,03	4,55	<b>3,64</b>	4,31	<b>3,77</b>	1,03
MS-RF- 4	34	39,27	3,89	4,39	<b>3,47</b>	4,16	<b>3,42</b>	0,99
MS-RF- 5	34	38,60	3,85	4,35	<b>3,43</b>	4,13	<b>3,72</b>	1,08
PHS-1+0,0583 % NTCPMs.	22	32,18	3,52	3,97	<b>3,04</b>	3,77	<b>4,75</b>	1,56
PHS-1+0,0875 % NTCPMs.	22	28,30	3,30	3,72	<b>2,79</b>	3,53	<b>5,49</b>	1,97
PHS-1+0,1750 % NTCPMs.	21	36,24	3,73	4,21	<b>3,29</b>	4,00	<b>4,70</b>	1,43
PHS-1+0,3500 % NTCPMs.	21	34,94	3,66	4,14	<b>3,21</b>	3,93	<b>5,49</b>	1,71
PHS-1+0,5250 % NTCPMs.	22	34,49	3,64	4,11	<b>3,18</b>	3,90	<b>5,20</b>	1,64
PHS-2+0,0583 % NTCPMs.	32	35,76	3,71	4,19	<b>3,26</b>	3,97	<b>3,36</b>	1,03
PHS-2+0,0875 % NTCPMs.	32	41,83	4,01	4,53	<b>3,62</b>	4,30	<b>4,40</b>	1,22
PHS-2+0,1750 % NTCPMs.	31	38,73	3,86	4,36	<b>3,43</b>	4,13	<b>4,58</b>	1,34
PHS-2+0,3500 % NTCPMs.	31	45,92	4,20	4,74	<b>3,85</b>	4,50	<b>5,26</b>	1,37
PHS-2+0,5250 % NTCPMs.	32	40,28	3,93	4,44	<b>3,53</b>	4,22	<b>4,46</b>	1,26
PHS-3+0,0583 % NTCPMs.	32	36,46	3,74	4,23	<b>3,30</b>	4,01	<b>4,37</b>	1,32
PHS-3+0,0875 % NTCPMs.	32	36,32	3,74	4,22	<b>3,29</b>	4,00	<b>2,75</b>	0,83
PHS-3+0,1750 % NTCPMs.	31	38,53	3,85	4,35	<b>3,42</b>	4,12	<b>4,05</b>	1,18
PHS-3+0,3500 % NTCPMs.	31	40,84	3,96	4,47	<b>3,56</b>	4,25	<b>4,30</b>	1,21
PHS-3+0,5250 % NTCPMs.	32	43,01	4,07	4,59	<b>3,68</b>	4,36	<b>5,31</b>	1,44
NSS-1+0,0583 % NTCPMs.	22	26,12	3,17	3,58	<b>2,64</b>	3,39	<b>2,16</b>	0,82
NSS-1+0,0875 % NTCPMs.	22	36,05	3,72	4,20	<b>3,27</b>	3,99	<b>4,43</b>	1,35
NSS-1+0,1750 % NTCPMs.	21	37,70	3,81	4,30	<b>3,37</b>	4,08	<b>4,85</b>	1,44
NSS-1+0,3500 % NTCPMs.	21	40,05	3,92	4,43	<b>3,51</b>	4,20	<b>5,12</b>	1,46
NSS-1+0,5250 % NTCPMs.	22	35,24	3,68	4,16	<b>3,22</b>	3,94	<b>5,49</b>	1,70
NSS-2+0,0583 % NTCPMs.	32	39,42	3,89	4,39	<b>3,47</b>	4,17	<b>5,48</b>	1,58
NSS-2+0,0875 % NTCPMs.	32	40,98	3,97	4,48	<b>3,57</b>	4,25	<b>4,88</b>	1,37
NSS-2+0,1750 % NTCPMs.	33	43,49	4,09	4,62	<b>3,71</b>	4,38	<b>5,40</b>	1,46
NSS-2+0,3500 % NTCPMs.	33	43,64	4,10	4,62	<b>3,72</b>	4,39	<b>3,74</b>	1,01
NSS-2+0,5250 % NTCPMs.	33	42,76	4,05	4,58	<b>3,67</b>	4,34	<b>5,24</b>	1,43
NSS-3+0,0583 % NTCPMs.	32	44,01	4,11	4,64	<b>3,74</b>	4,41	<b>4,45</b>	1,19
NSS-3+0,0875 % NTCPMs.	63	53,78	4,55	5,13	<b>4,27</b>	4,87	<b>4,78</b>	1,12
NSS-3+0,1750 % NTCPMs.	64	50,09	4,39	4,95	<b>4,08</b>	4,70	<b>5,43</b>	1,33
NSS-3+0,3500 % NTCPMs.	64	44,86	4,15	4,69	<b>3,79</b>	4,45	<b>4,79</b>	1,26
NSS-3+0,5250 % NTCPMs.	64	54,63	4,58	5,17	<b>4,32</b>	4,91	<b>4,39</b>	1,02

**Nota:** La resistencia a la compresión fue obtenida mediante ensayos de compresión simple de cubos de aristas 5cm. Todas las muestras a edad de 35 días.

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

Para verificar que la estructura del hormigón ha sido modificada con los NTCPM se realiza correlaciones para obtener el módulo de rotura teórico en función de la resistencia a la compresión de los especímenes de hormigón aplicando las ecuaciones del código ACI, Norma Colombiana, Norma Española, y el descrito por Huang, revisados en el apartado 1.4.5.2,



ecuaciones 1.6, 1.7, 1.8 y 1.9, respecto al módulo de rotura obtenido del ensayo NTE INEN 2554 o ASTM-C-78-09 (ver tabla 41).

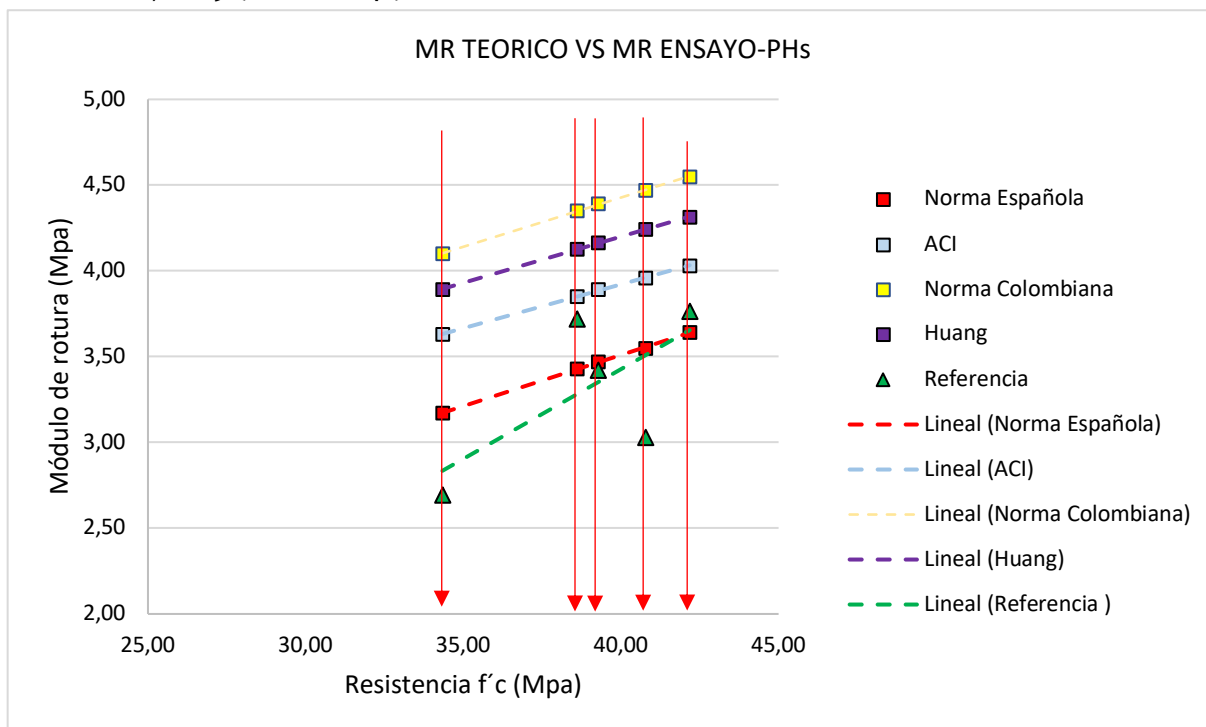


Figura 52. Correlaciones entre el módulo de rotura teórico (Resistencia a la compresión) vs el módulo de rotura del ensayo en hormigones no modificados con NTCPM – Muestras de referencia (MS-RF).

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

Con el fin de conocer los valores teóricos del módulo de rotura obtenidos a partir de las ecuaciones 1.6, 1.7, 1.8 y 1.9, del código ACI, Norma Colombiana, Norma Española, y el descrito por Huang, que están en función de la resistencia a la compresión simple de las probetas de hormigón, para analizar la estructura del hormigón y su comportamiento a las acciones mecánicas de carga, y para lograr corroborar los valores del módulo de rotura obtenidos mediante el ensayo de resistencia a la flexión del hormigón utilizando una viga simple con carga en los tercios, se correlacionan los valores del módulo de rotura obtenidos del ensayo a flexión con los valores teóricos del módulo de rotura obtenidos de las ecuaciones 1.6, 1.7, 1.8 y 1.9 a partir de la resistencia a la compresión simple de esas mismas probetas.

Si analizamos la figura Nro. 52, podemos observar que los valores teóricos del módulo de rotura de la Norma Española son los que más se asemejan a los obtenidos a través del ensayo de la viga simple con carga en los tercios, además que se observa a los valores teóricos de las diferentes ecuaciones seguir un mismo patrón de pendiente, a mayor resistencia a la compresión simple de los especímenes de hormigón mayor será el valor del módulo de rotura teórico, algo se asemeja cuando esos mismos hormigones son sometidos a ensayos a flexión.

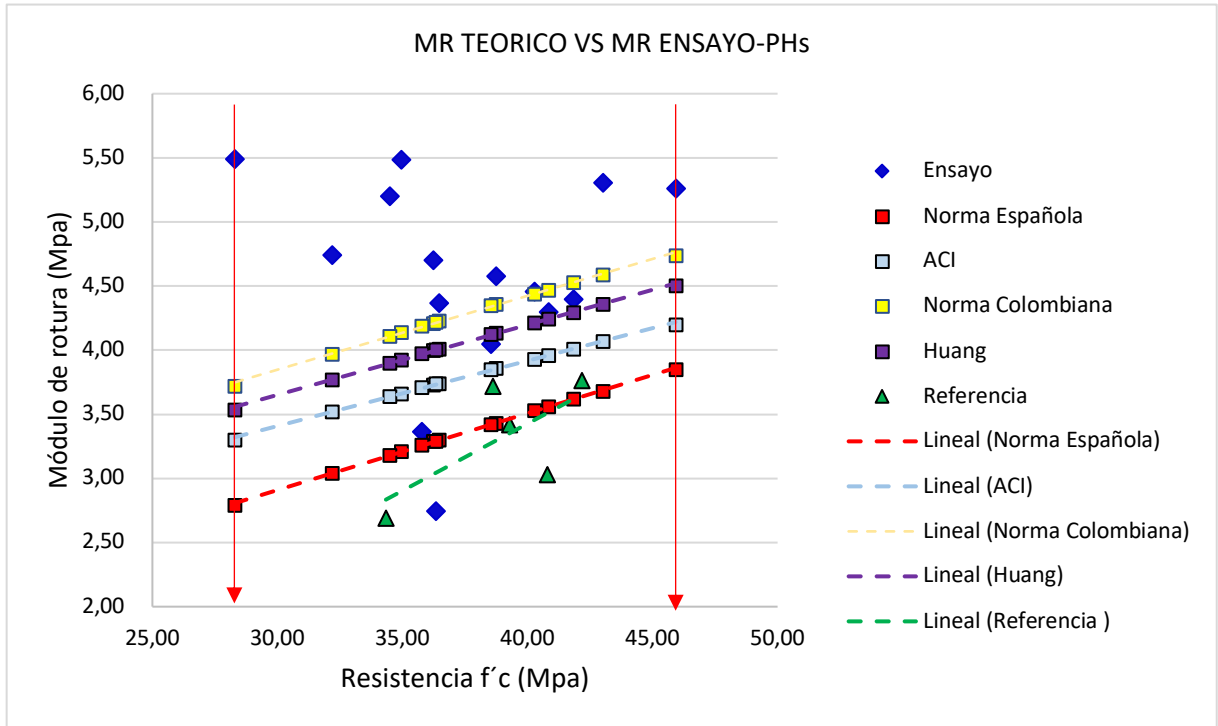


Figura 53. Correlaciones entre el módulo de rotura teórico (Resistencia a la compresión) vs el módulo de rotura del ensayo en hormigones MS-RF y PHs-f-wt%NTCPM.

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

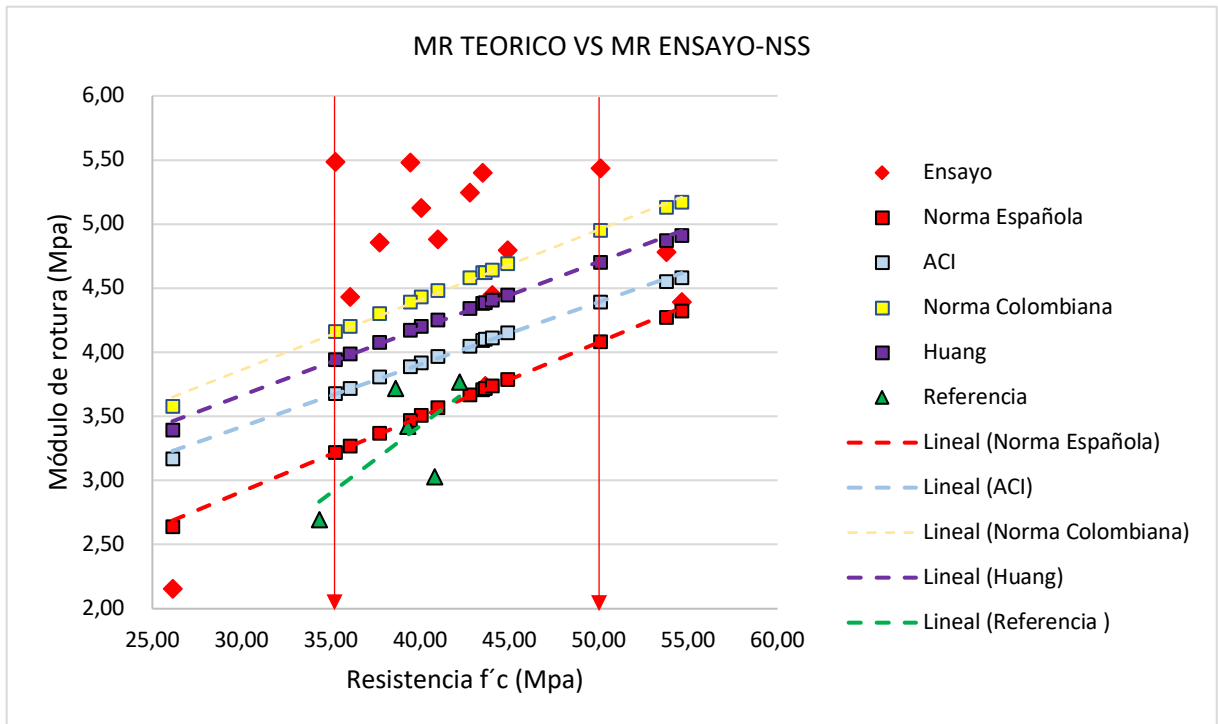


Figura 54. Correlaciones entre el módulo de rotura teórico (Resistencia a la compresión) vs el módulo de rotura del ensayo en hormigones MS-RF y NSS-f-wt%NTCPM.

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

Para los diferentes valores del módulo de rotura obtenidos del ensayo a flexión de las probetas de hormigón modificado con PHs-f-wt%NTCPM, se determinó la resistencia a compresión simple de la probeta y se correlaciona con el valor del módulo de rotura teórico obtenido con las ecuaciones 1.6, 1.7, 1.8 y 1.9, del código ACI, Norma Colombiana, Norma Española, y el descrito por Huang, en la figura Nro. 53 se observa que como valor del módulo de rotura obtenidas del ensayo a flexión de las probetas modificadas con PHs-f-wt%NTCPM incrementa notablemente respecto a los valores de las probetas que no han sido modificadas con NTCPM, e inclusive muy por encima de los valores teóricos, para aquellos valores de hormigones modificados con NTCPM que se encuentran igual o por debajo de los valores de la referencia MS-RF pueden atribuirse a fallas en la distribución o tipo de los agregados utilizados en las probetas, por la razón de que estas probetas si modificaron sus propiedades eléctricas.

En la figura Nro. 54 se observa el mismo comportamiento el valor del módulo de rotura obtenidas del ensayo a flexión de las probetas modificadas con NSS-f-wt%NTCPM también presenta un incremento notablemente respecto a los valores de las probetas que no han sido modificadas con NTCPM, también muy por encima de los valores teóricos, para aquellos valores de hormigones modificados con NTCPM que se encuentran igual o por debajo de los valores de la referencia MS-RF, asimismo pueden atribuirse a fallas en la distribución o tipo de los agregados utilizados en las probetas, por la razón de que estas probetas si modificaron sus propiedades eléctricas.

Sin embargo la mejor distribución para obtener valores de resistencia a la flexión altos son los hormigones modificados con NSS-f-wt%NTCPM por presentar mejores resultados respecto a los de referencia MS-RF, este análisis asevera que los hormigones con presencia de NTCPM en diferentes concentraciones y dispersados con AD a base de PHs y NSS, modificaron la estructura del hormigón a escala nanométrica convirtiéndolo en un hormigón más resistente a la flexión incrementando su módulo de rotura en 46,70% para hormigones modificados con PHs-f+%NCPM y 62,61% para hormigones modificados con NSS-f+%NCPM.

Este análisis se lo realiza a probetas de hormigón no modificado con NTCPM, sometidas a ensayos a flexión, las vigas ensayadas se cortaron cubos en forma de aristas de 5 cm y se sometieron a ensayos a compresión simple con estos valores se obtiene el módulo de rotura teórico.

### **Efectos de los NTCPM en la resistividad y conductividad eléctrica inicial y final en probetas de hormigón sometidos a una acción de carga (viguetas de 5x5x20 cm).**

Conocido que las propiedades eléctricas de los NTCPM son capaces de modificar la estructura molecular del hormigón otorgándole también a este una característica eléctrica en esta sección se trata de verificar si esas características pueden ser medibles cuando los hormigones son sometidos a una acción de carga, estas mediciones fueron realizadas mediante el programa Visual Analyser 2011 y un circuito eléctrico descrito en la sección 2.3.4, durante el ensayo de resistencia a la flexión del hormigón utilizando una viga simple con carga en los tercios.

Lo que se trata es de verificar si los NTCPM dispersos en la estructura ya modificada pueden alterar las propiedades eléctricas del hormigón, esta etapa es una de las más críticas e interesantes de esta investigación, es conocido que la estructura del hormigón está compuesta de dos materiales cuando ya se encuentra en estado sólido bien consolidado, los áridos

provenientes de las rocas y el cemento, que debido al crecimiento de los cristales cementicios por la reacción química con el agua forman un solo conglomerado creando una nueva roca artificial, si lo analizamos desde el punto de vista volumétrico un nuevo componente formaría parte del hormigón y son la cantidad de vacíos presentes en la estructura.

Los NTCs están formado de estructura nano métrica tal que posee una gran resistencia a la flexión, al incorporarlos como un nuevo material al hormigón forman parte de todo el conglomerado en pequeñas cantidades, hipotéticamente bien distribuidos llegan a formar una red matricial en escala nano métrica sobre la pasta cementante donde es que actúan, si esta red es capaz de otorgarle un interconexión entre los cristales cementicios y los NTCPMs para que los electrones puedan circular con el paso de la corriente y convertir al hormigón en un material conductor, la rotura de esta interconexión impediría el paso el paso de los electrones volviendo al hormigón menos conductor y con mayor resistencia eléctrica, si esto puede consolidarse como teoría los fallos de la estructura interna ente los cristales cementicios y los NTCPMs podría medirse con la aplicación de una carga eléctrica y determinar el grado de deterioro de la estructura del hormigón.

Tabla 42. Valores de Resistividad y conductividad eléctrica inicial y final en probetas de hormigón no modificados (MS-RF) y hormigones modificados con NTCPM, sometidos a una acción de carga.

DESCRIPCIÓN:	Factor C. (f)	Resistencia Inicial de la probeta Ohmios ( $\Omega$ )	Resistencia Final de la probeta Ohmios ( $\Omega$ )	Resistividad Eléctrica Inicial ( $m\Omega.m$ )	Resistividad Eléctrica Final ( $m\Omega.m$ )	Conductividad Eléctrica Inicial Mega Siemens (ms)	Conductividad Eléctrica Final Mega Siemens (ms)
MS-RF- 1	0	24144,87	24144,87	0	0	0	0
MS-RF- 2	0	29550,03	5340,45	0	0	0	0
MS-RF- 3	0	0,00	0	0	0	0	0
MS-RF- 4	0	5340,45	5340,45	0	0	0	0
MS-RF- 5	0	8016,03	8016,03	0	0	0	0
PHS-1+0,0583 % NTCPMs.	0,333	780876,49	6591350,4	0,01	0,083	100,00	12,05
PHS-1+0,0875 % NTCPMs.	0,500	878048,78	7331444,76	0,011	0,093	90,91	10,75
PHS-1+0,1750 % NTCPMs.	1,000	1524861,88	3430340,5	6	0,019	0,043	52,63
PHS-1+0,3500 % NTCPMs.	2,00	743083,00	3079646,0	2	0,009	0,039	111,11
PHS-1+0,5250 % NTCPMs.	3,00	918032,79	4450704,2	3	0,012	0,056	83,33
PHS-2+0,0583 % NTCPMs.	0,333	800000,00	7111111,11	0,01	0,09	100,00	11,11
PHS-2+0,0875 % NTCPMs.	0,500	878048,78	6544815,47	0,011	0,085	90,91	11,77
PHS-2+0,1750 % NTCPMs.	1,000	1928853,75	3936507,94	0,024	0,05	41,67	20,00
PHS-2+0,3500 % NTCPMs.	2,00	800000,00	5448818,9	0,01	0,07	100,00	14,29
PHS-2+0,5250 % NTCPMs.	3,00	1084745,76	3509386,73	0,014	0,045	71,43	22,22
PHS-3+0,0583 % NTCPMs.	0,333	761904,76	6118043,84	0,01	0,078	100,00	12,82
PHS-3+0,0875 % NTCPMs.	0,500	878048,78	8244897,9	6	0,011	0,103	90,91
PHS-3+0,1750 % NTCPMs.	1,000	1172413,79	2984866,12	0,015	0,038	66,67	26,32

PHS-3+0,3500 % NTCPMs.	2,00 0	687500,00	1660377,36	0,009	0,022	111,11	45,46
PHS-3+0,5250 % NTCPMs.	3,00 0	761904,76	5661835,75	0,01	0,072	100,00	13,89
NSS-1+0,0583 % NTCPMs.	0,333	1004170,14	5216589,86	0,012	0,065	83,33	15,39
NSS-1+0,0875 % NTCPMs.	0,500	767580,45	3792207,79	0,01	0,048	100,00	20,83
NSS-1+0,1750 % NTCPMs.	1,000	1274725,27	5097801,36	0,016	0,064	62,50	15,63
NSS-1+0,3500 % NTCPMs.	2,00 0	1128205,13	3931262,39	0,014	0,05	71,43	20,00
NSS-1+0,5250 % NTCPMs.	3,00 0	1172413,79	3682458,3 9	0,015	0,046	66,67	21,74
NSS-2+0,0583 % NTCPMs.	0,333	651162,79	4379888,2 7	0,008	0,052	125,00	19,23
NSS-2+0,0875 % NTCPMs.	0,500	225352,11	2458557,59	0,003	0,031	333,33	32,26
NSS-2+0,1750 % NTCPMs.	1,000	878048,78	5463722,4	0,011	0,068	90,91	14,71
NSS-2+0,3500 % NTCPMs.	2,00 0	724409,45	3782101,17	0,009	0,048	111,11	20,83
NSS-2+0,5250 % NTCPMs.	3,00 0	580152,67	3317073,17 6238907,8	0,007	0,042	142,86	23,81
NSS-3+0,0583 % NTCPMs.	0,333	1415162,45	5	0,018	0,079	55,56	12,66
NSS-3+0,0875 % NTCPMs.	0,500	1469462,17	5819967,27	0,018	0,073	55,56	13,70
NSS-3+0,1750 % NTCPMs.	1,000	1.741.626,79	4759124,09	0,022	0,061	45,46	16,39
NSS-3+0,3500 % NTCPMs.	2,00 0	1607476,64	7	0,021	0,053	47,62	18,87
NSS-3+0,5250 % NTCPMs.	3,00 0	1940594,06	7	0,025	0,052	40,00	19,23

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

La tabla Nro. 42, muestra los resultados de resistividad y conductividad inicial y final que fueron medidos mientras se aplica una carga a una velocidad de constante de 1 MPa/min en las probetas de hormigones modificados con PHS-f+%NCPM y NSS-f+%NCPM, el valor inicial fue medido cuando la probeta no es sometida a ninguna carga y la final cuando la probeta llega a la falla de rotura en el ensayo de flexión.

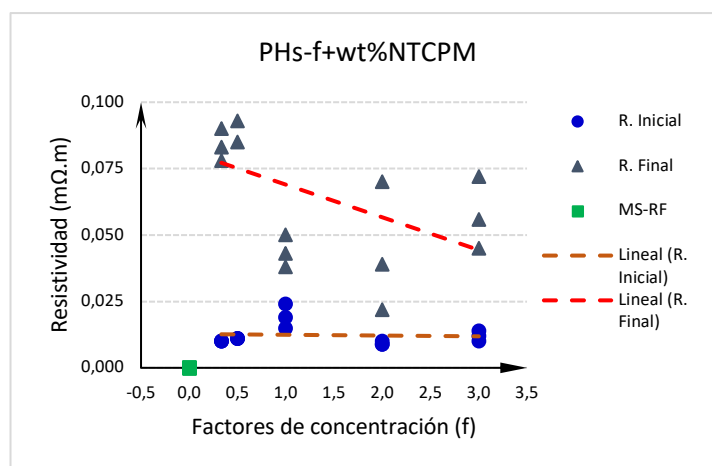


Figura 55. Resistividad eléctrica inicial y final en muestras de referencia (MS-RF) y hormigones modificados PHS-f+%NCPM, sometidos a una acción de carga

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

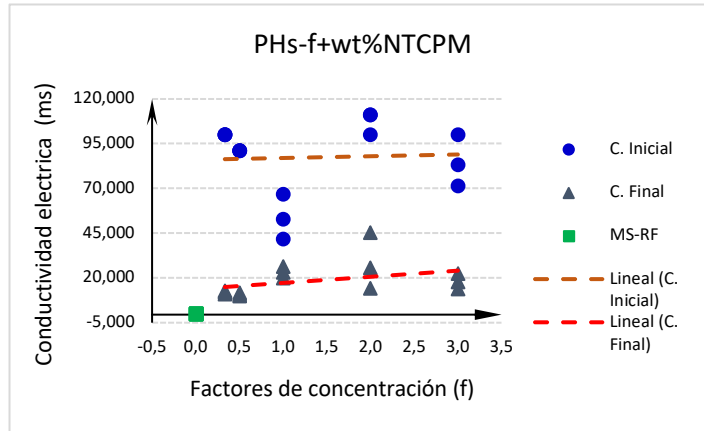


Figura 56. Conductividad eléctrica inicial y final en muestras de referencia (MS-RF) y hormigones modificados PHS-f+%NCPM, sometidos a una acción de carga

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

La figura Nro. 55 y 56, muestran los efectos que producen los NTCPM en la estructura del hormigón cuando son sometidos a una acción de carga, ya que al otorgarle propiedades eléctricas, se puede medir la variación de voltaje desde que se inicia la aplicación de la carga hasta que la probeta de hormigón falla por flexión, así se puede medir el voltaje, la resistencia e intensidad inicial y final, y con ello calcular la resistividad y conductividad eléctrica antes de la aplicación de la carga, durante la aplicación de la carga y cuando la el voltaje llega a su máximo valor antes de la falla de la estructura del hormigón modificado con PHS-f+%NCPM, los hormigones de referencia no modificados con NTCPM no pueden ser medidos al no poseer propiedades eléctricas.

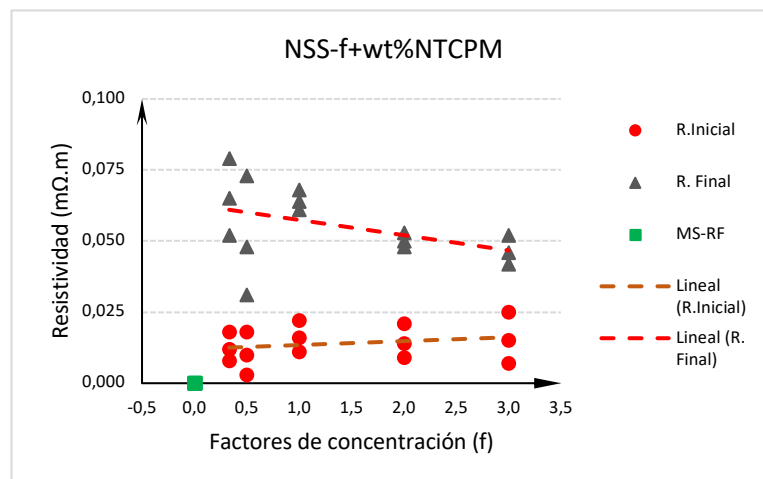


Figura 57. Resistividad eléctrica inicial y final en muestras de referencia (MS-RF) y hormigones modificados NSS-f+%NCPM, sometidos a una acción de carga.

Fuente: El Autor  
Elaboración: El Autor

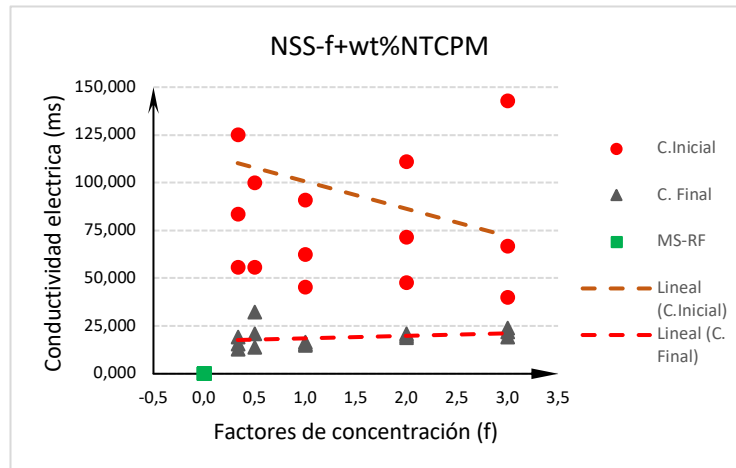


Figura 58. Conductividad eléctrica inicial y final en muestras de referencia (MS-RF) y hormigones modificados NSS-f+%NCPM, sometidos a una acción de carga.

Fuente: El Autor  
Elaboración: El Autor

De la misma forma los hormigones modificados con NSS-f+%NCPM, también poseen propiedades eléctricas y pueden medirse el voltaje, la resistencia e intensidad inicial y final, y con ello calcular la resistividad y conductividad eléctrica antes de la aplicación de la carga, durante la aplicación de la carga y cuando la el voltaje llega a su máximo valor antes de la falla de la estructura del hormigón.

### **Efectos de los NTCPM en el Modulo de elasticidad y la relación de poisson en probetas de hormigón (viguetas de 5x5x20 cm).**

Para analizar los efectos que producen los NTCPM se midieron las propiedades reo lógicas del hormigón específicamente el módulo de elasticidad y la relación de poisson mediante el ensayo bajo la norma ASTM D-2845 con la aplicación de un equipo de medición de ultrasonido PUNDIT PL-200, las mediciones se las realizaron a los especímenes de hormigón en lo ancho de 50 cm, aplicando las ecuaciones 1.22 y 1.23, correlacionando los valores con el módulo de elasticidad teórico obtenidos de las ecuaciones 1.10,1.12,1.20 del código ACI, Norma Colombiana, Norma Española, que están en función de la resistencia a la compresión simple, y ecuación 1.21 el descrito por Huang que está en función del módulo de rotura.

En la figura Nro. 59, se establece la demostración gráfica del módulo de elasticidad medido a través del equipo de ultrasonido y los diferentes valores teóricos del módulo de elasticidad en función de la resistencia a la compresión y del módulo de rotura cuando el hormigón es modificado con PHs-f+%NCPM.

Se puede notar que no hay variaciones de los datos obtenidos del ensayo con los valores obtenidos de las correlaciones teóricas, esto nos determina que el módulo de elasticidad no ha sido alterado por la presencia de los NTCPM en la estructura del hormigón, sin embargo las características mecánicas respecto a la resistencia a la flexión si lo demuestran, debido a que el ensayo de ultrasonido mide las velocidades de onda a través de un cierto material, en estado estático los NTCPM pasan desapercibidos a las mediciones de ultrasonido que no refleja variación en el módulo de elasticidad del material ni en la relación de Poisson.

En la figura Nro. 60, la demostración gráfica del módulo de elasticidad medido a través del equipo de ultrasonido y los diferentes valores teóricos en función de la resistencia a la compresión y del módulo de rotura tampoco presentan variaciones cuando el hormigón es modificado con NSS-f+%NCPM.

Los resultados obtenidos del módulo de elasticidad y la relación de poisson del ensayo de ultrasonido y de las correlaciones a través de las ecuaciones 1.10, 1.12, 1.20, 1.21 del código ACI, Norma Colombiana, Norma Española, y la descrita por Huang para los valores teóricos se presentan en la tabla Nro. 43.

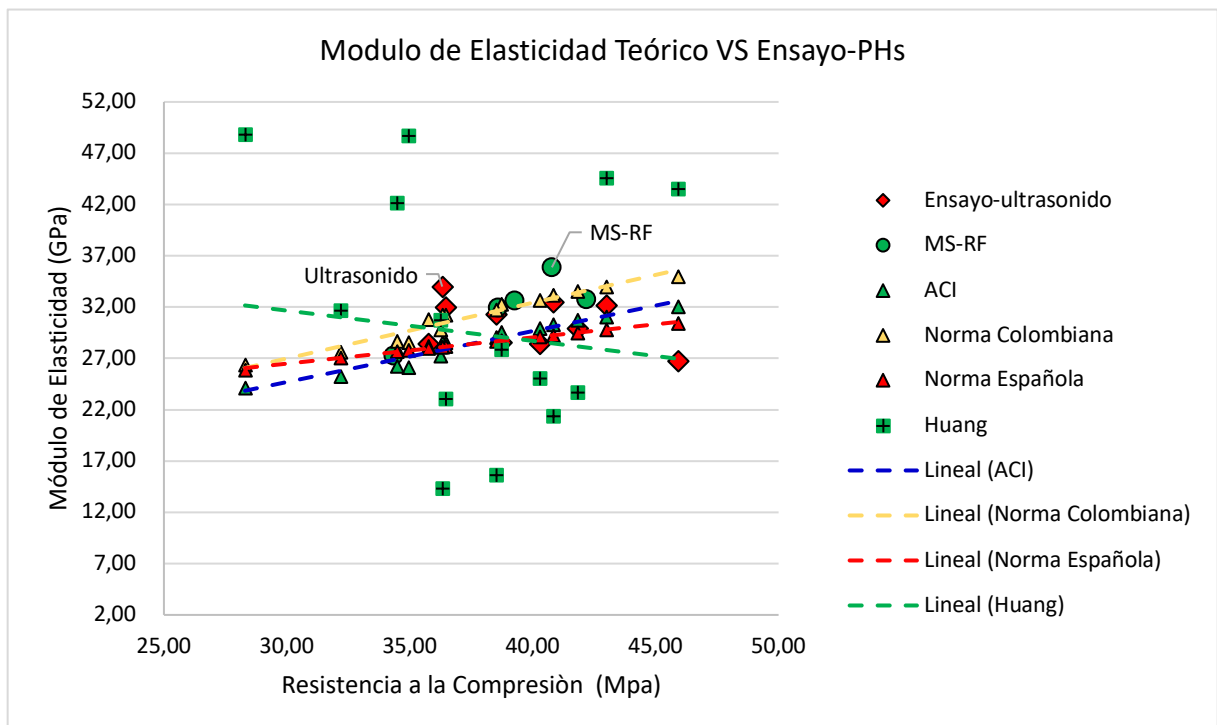


Figura 59. Módulo de elasticidad teórico y de ensayo de ultrasonido vs resistencia a la compresión en probetas de hormigón modificado con PHS-f+%NCPM.

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor



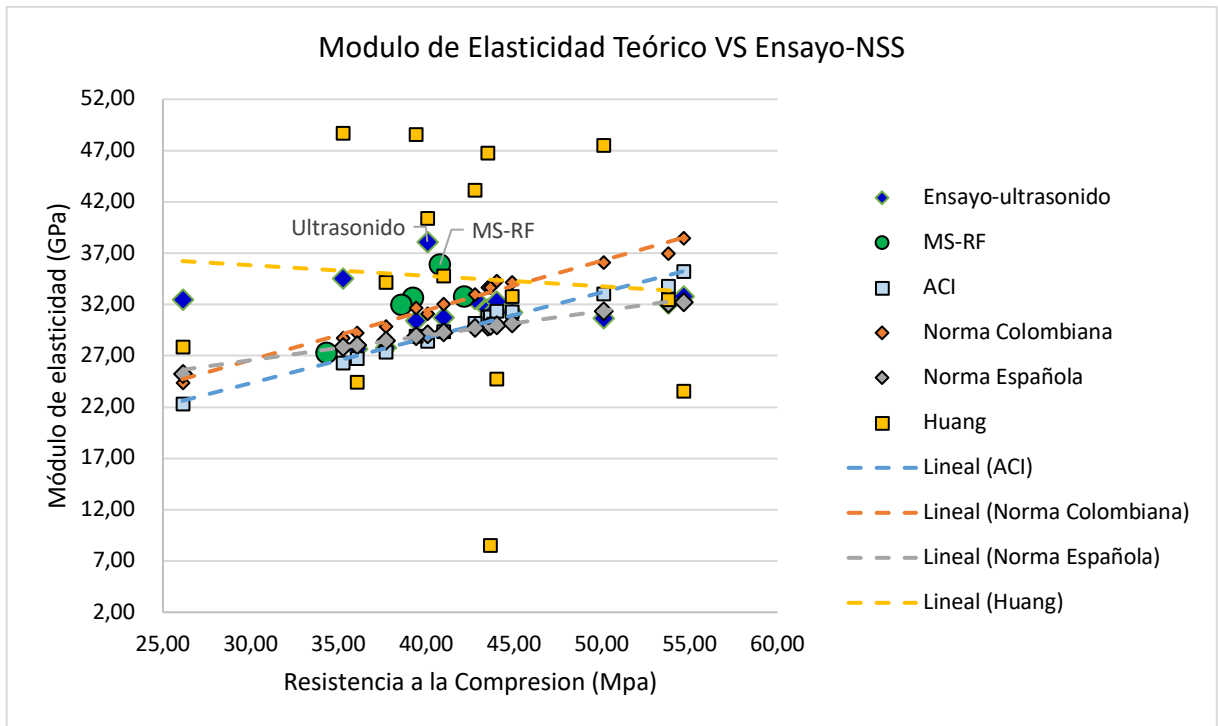


Figura 60. Módulo de elasticidad teórico y de ensayo de ultrasonido vs resistencia a la compresión en probetas de hormigón modificado con NSS-f+%NCPM

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

Tabla 43. Valores del Módulo de Elasticidad y Relación de Poisson de Hormigones modificado con NTCPM.

DESCRIPCIÓN:	Módulo de Rotura (MPa)	Resistencia a f'c (MPa)	ACI (ε)	Norma Colombiana (ε)	Norma Española (ε)	Huang -EEUU (ε)	Ensayos ultrasonido (ε)	Relación de Poisson (ν)
MS-RF- 1	3,03	40,78	29,03	31,73	29,26	7,8	35,88	0,19
MS-RF- 2	2,69	34,34	25,43	27,8	27,63	15,51	27,24	0,28
MS-RF- 3	3,77	42,18	31,2	34,1	29,59	9,14	32,71	0,30
MS-RF- 4	3,42	39,27	30,17	32,97	28,89	1,25	32,61	0,29
MS-RF- 5	3,72	38,6	29,07	31,77	28,73	8,06	31,92	0,31
PHS-1+0,0583 % NTCPMs.	4,75	32,18	25,26	27,61	27,04	31,68	28,42	0,29
PHS-1+0,0875 % NTCPMs.	5,49	28,3	24,11	26,36	25,9	48,8	29,9	0,30
PHS-1+0,1750 % NTCPMs.	4,7	36,24	27,25	29,79	28,13	30,75	28,58	0,30
PHS-1+0,3500 % NTCPMs.	5,49	34,94	26,15	28,58	27,79	48,7	26,72	0,31
PHS-1+0,5250 % NTCPMs.	5,2	34,49	26,26	28,71	27,67	42,16	28,41	0,30
PHS-2+0,0583 % NTCPMs.	3,36	35,76	28,18	30,81	28	0,09	31,99	0,28
PHS-2+0,0875 % NTCPMs.	4,4	41,83	30,71	33,57	29,51	23,7	34	0,30

PHS-2+0,1750 % NTCPMs.	4,58	38,73	29,53	32,27	28,76	27,88	31,3	0,31
PHS-2+0,3500 % NTCPMs.	5,26	45,92	32,0 3	35,01	30,44	43,55	32,5	0,29
PHS-2+0,5250 % NTCPMs.	4,46	40,28	29,91	32,69	29,14	25,05	32,18	0,32
PHS-3+0,0583 % NTCPMs.	4,37	36,46	28,5 8	31,24	28,19	23,06	32,16	0,31
PHS-3+0,0875 % NTCPMs.	2,75	36,32	28,5 8	31,24	28,15	14,32	32,26	0,31
PHS-3+0,1750 % NTCPMs.	4,05	38,53	29,0 4	31,74	28,71	15,61	33,82	0,27
PHS-3+0,3500 % NTCPMs.	4,3	40,84	30,3 4	33,16	29,27	21,37	35,14	0,26
PHS-3+0,5250 % NTCPMs.	5,31	43,01	31,07	33,96	29,78	44,57	30,92	0,31
NSS-1+0,0583 % NTCPMs.	2,16	26,12	22,3	24,38	25,22	27,87	32,47	0,21
NSS-1+0,0875 % NTCPMs.	4,43	36,05	26,74	29,23	28,08	24,43	27,68	0,30
NSS-1+0,1750 % NTCPMs.	4,85	37,7	27,34	29,89	28,5	34,2	27,79	0,29
NSS-1+0,3500 % NTCPMs.	5,12	40,05	28,4 4	31,08	29,08	40,4	38,11	0,02
NSS-1+0,5250 % NTCPMs.	5,49	35,24	26,3	28,74	27,87	48,71	34,56	0,02
NSS-2+0,0583 % NTCPMs.	5,48	39,42	28,95	31,65	28,93	48,55	30,41	0,30
NSS-2+0,0875 % NTCPMs.	4,88	40,98	29,33	32,06	29,31	34,81	30,73	0,30
NSS-2+0,1750 % NTCPMs.	5,4	43,49	30,77	33,64	29,89	46,8	31,54	0,30
NSS-2+0,3500 % NTCPMs.	3,74	43,64	30,8 2	33,69	29,93	8,54	31,05	0,28
NSS-2+0,5250 % NTCPMs.	5,24	42,76	30,18	32,99	29,72	43,14	32,52	0,30
NSS-3+0,0583 % NTCPMs.	4,45	44,01	31,36	34,28	30,01	24,77	32,29	0,29
NSS-3+0,0875 % NTCPMs.	4,78	53,78	33,8 2	36,96	32,08	32,46	32,1	0,31
NSS-3+0,1750 % NTCPMs.	5,43	50,09	33,0 3	36,1	31,33	47,51	30,69	0,28
NSS-3+0,3500 % NTCPMs.	4,79	44,86	31,29	34,2	30,2	32,8	31,21	0,28
NSS-3+0,5250 % NTCPMs.	4,39	54,63	35,20	38,47	32,25	23,57	32,81	0,30

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

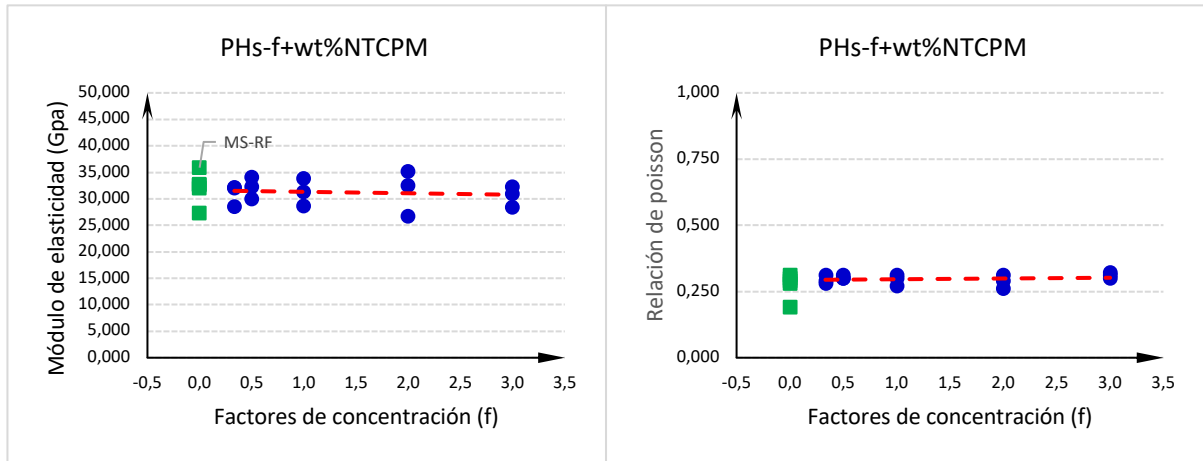


Figura 61. Módulo de elasticidad y relación de poisson en probetas de hormigón modificado con PHs-f+wt%NTCPM

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

En la figura Nro. 61, podemos observar la curva de valoración del módulo de rotura y la relación de poisson de los hormigones modificados con PHs-f+wt%NTCPM, se pude observar que no presentan variaciones respecto a los valores obtenidos de los hormigones que no han sido modificados con NTCPM.

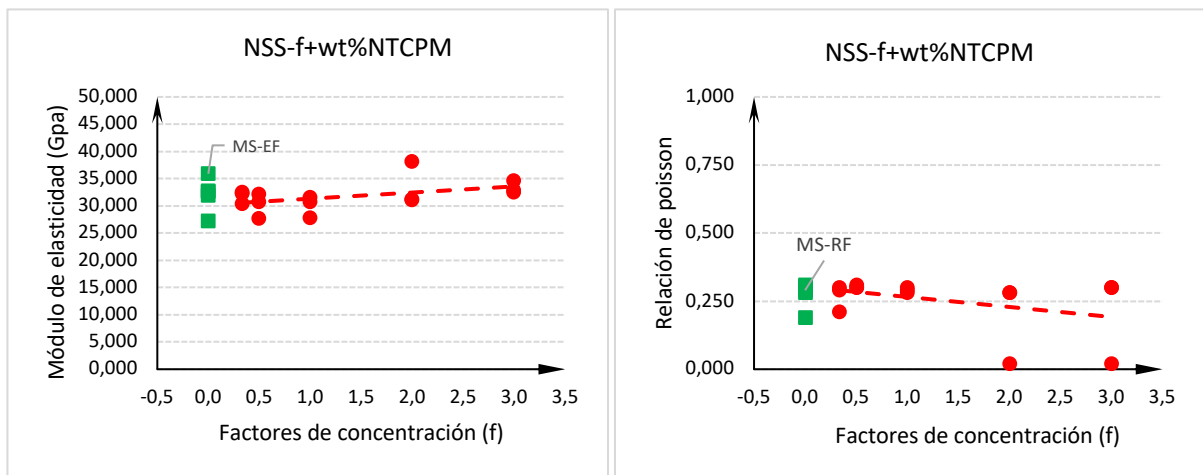


Figura 62. Módulo de elasticidad y relación de poisson en probetas de hormigón modificado con NSS-f+wt%NTCPM

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

En la figura Nro. 62, podemos observar la curva de valoración del módulo de rotura y la relación de poisson de los hormigones modificados con NSS-f+wt%NTCPM, se pude observar que tampoco presentan variaciones respecto a los valores obtenidos de los hormigones que no han sido modificados con NTCPM.

## Efectos de los NTCPMs en la resistencia a la compresión en probetas de hormigón cúbicas (5x5x5 cm).

Para correlacionar los valores y obtener datos informativos sobre la estructura del hormigón, las probetas luego de ser ensayadas a la resistencia a la flexión se cortó parte de ellas formado un cubo con una arista de 5 cm por lado, los cubos formados fueron sometidos en la compresión simple en la máquina de Accu tek para determinar la resistencia a la compresión bajo la norma NTE INEN 488, los resultados obtenidos se presentan en la tabla 44.

Tabla 44 Resistencia a la compresión de probetas cúbicas en hormigones modificados con NTCPM

DESCRIPCIÓN:	factor de concentración	EDAD	Resistencia f'c (MPa)
MS-RF- 1	0	35	40,78
MS-RF- 2	0	35	34,34
MS-RF- 3	0	35	42,18
MS-RF- 4	0	35	39,27
MS-RF- 5	0	35	38,6
PHS-1+0,0583 % NTCPMs.	0,333	33	32,18
PHS-1+0,0875 % NTCPMs.	0,500	33	28,3
PHS-1+0,1750 % NTCPMs.	1,000	32	36,24
PHS-1+0,3500 % NTCPMs.	2,000	32	34,94
PHS-1+0,5250 % NTCPMs.	3,000	33	34,49
PHS-2+0,0583 % NTCPMs.	0,333	33	35,76
PHS-2+0,0875 % NTCPMs.	0,500	33	41,83
PHS-2+0,1750 % NTCPMs.	1,000	32	38,73
PHS-2+0,3500 % NTCPMs.	2,000	32	45,92
PHS-2+0,5250 % NTCPMs.	3,000	33	40,28
PHS-3+0,0583 % NTCPMs.	0,333	33	36,46
PHS-3+0,0875 % NTCPMs.	0,500	33	36,32
PHS-3+0,1750 % NTCPMs.	1,000	32	38,53
PHS-3+0,3500 % NTCPMs.	2,000	32	40,84
PHS-3+0,5250 % NTCPMs.	3,000	33	43,01
NSS-1+0,0583 % NTCPMs.	0,333	33	26,12
NSS-1+0,0875 % NTCPMs.	0,500	33	36,05
NSS-1+0,1750 % NTCPMs.	1,000	34	37,7
NSS-1+0,3500 % NTCPMs.	2,000	34	40,05
NSS-1+0,5250 % NTCPMs.	3,000	34	35,24
NSS-2+0,0583 % NTCPMs.	0,333	33	39,42
NSS-2+0,0875 % NTCPMs.	0,500	33	40,98
NSS-2+0,1750 % NTCPMs.	1,000	34	43,49
NSS-2+0,3500 % NTCPMs.	2,000	34	43,64
NSS-2+0,5250 % NTCPMs.	3,000	34	42,76
NSS-3+0,0583 % NTCPMs.	0,333	33	44,01
NSS-3+0,0875 % NTCPMs.	0,500	63	53,78
NSS-3+0,1750 % NTCPMs.	1,000	64	50,09
NSS-3+0,3500 % NTCPMs.	2,000	64	44,86
NSS-3+0,5250 % NTCPMs.	3,000	64	54,63

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

## Segunda etapa

Con los resultados obtenidos de la evaluación realizada a los hormigones no modificados y los hormigones modificados con PHs-f+wt%NTCPM y NSS-f+wt%NTCPM en el presente capítulo se analizarán para determinar el factor de concentración (f) más favorable para el desarrollo de hormigones modificados con NTCPM, aplicando la metodología de dispersión de los NTCs desarrollada por Ríos en su proyecto de tesis denominado “Dispersión de nanotubos de carbono en probetas de concreto” y la metodología de diseño para hormigones establecida en este proyecto de investigación desarrollada en el capítulo 2, sección 2.1.3

### **Curva de valoración y determinación de la dosificación óptima para el diseño de hormigones modificados con NTCPM para pavimento rígido.**

Para determinar el factor de concentración más apropiado y diseñar una mezcla de hormigón modificada con NTCPM, debe ser analizado bajo tres condiciones características que los NTCPM aportaron en la modificación de la estructura nanométrica del hormigón, la característica mecánica, característica reológica y características eléctricas:

- Característica mecánica por incremento en el módulo de rotura del hormigón.
- Característica reológica en el módulo de elasticidad y la relación de Poisson.
- Las características en la resistividad y conductividad eléctrica del hormigón en estado estático
- Las características en la resistividad y conductividad eléctrica del hormigón en estado dinámico sometido a una acción de carga.
- La resistividad y conductividad eléctrica del hormigón en estado seco y húmedo.
- Voltaje retenido en la estructura del hormigón en estado seco y húmedo

Como la característica más importante en el diseño de hormigones para pavimentos rígidos es el módulo de rotura y en consecuencia de la hipótesis planteada para este proyecto de investigación que si se cumple, este parámetro es la base sobre el cual se analizan los demás parámetros para determinar el factor óptimo de concentración más apropiado para el diseño de hormigones modificados con NTCPMs.

Obtenido los resultados de los efectos que producen los NTCPMs en la estructura del hormigón de aquellos dispersados con agentes PHs y NSS, se procede a determinar los parámetros que corresponden al factor óptimo de concentración de los NTCPM (ver tabla 45).

### ***Determinación del factor óptimo de concentración y los parámetros en las características mecánica, reológica y eléctrica en el diseño de hormigones modificados con PHs-f-wt%NTCPM.***

- a) Para determinar el factor de concentración más óptimo y obtener el máximo valor de módulo de rotura del hormigón modificados con PHs-f-wt%NTCPM, verificamos en la curva de valoración el máximo valor del módulo de rotura para el factor de concentración donde  $f = 3,00$ ; con este factor óptimo de concentración se determinarán los demás parámetros.

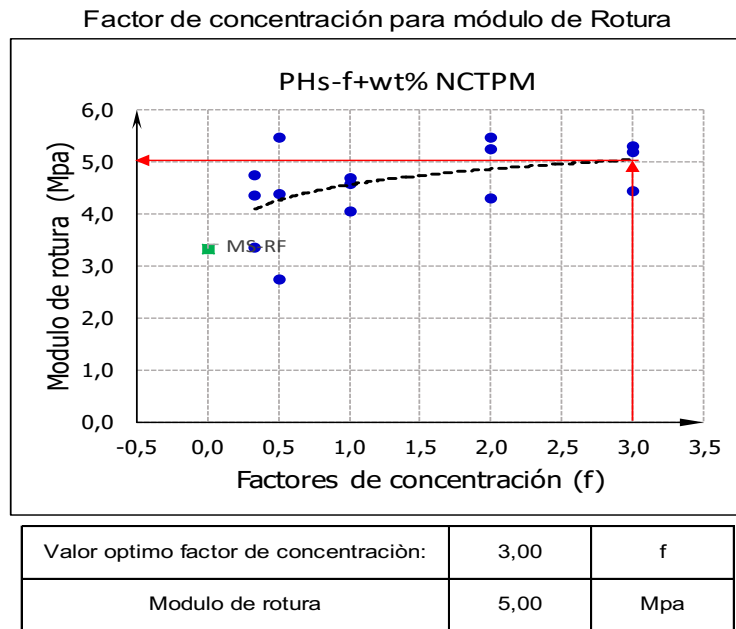


Figura 63. Factor de concentración óptimo para máximo módulo de rotura del hormigón modificado con PHs-f-wt%NCTPM  
Fuente: El Autor  
Elaboración: El Autor

- b) Con el factor de concentración óptimo que es  $f = 3,00$  para hormigón modificado con PHs-f-wt%NCTPM, se procede a determinar en cada una de las curvas o tendencias los siguientes valores:
- Los valores de conductividad y resistividad eléctrica inicial y final del hormigón en estado dinámico sometido a una acción de carga cuando el factor de concentración es igual a tres se reflejan en la figura Nro. 64, donde la conductividad eléctrica inicial es de 87.50 mega siemens (ms) y la final 25 ms., el valor de la resistividad inicial es 0.012 mega ohmios por metro ( $m\Omega.m$ ) y la final 0.041  $m\Omega.m$ .

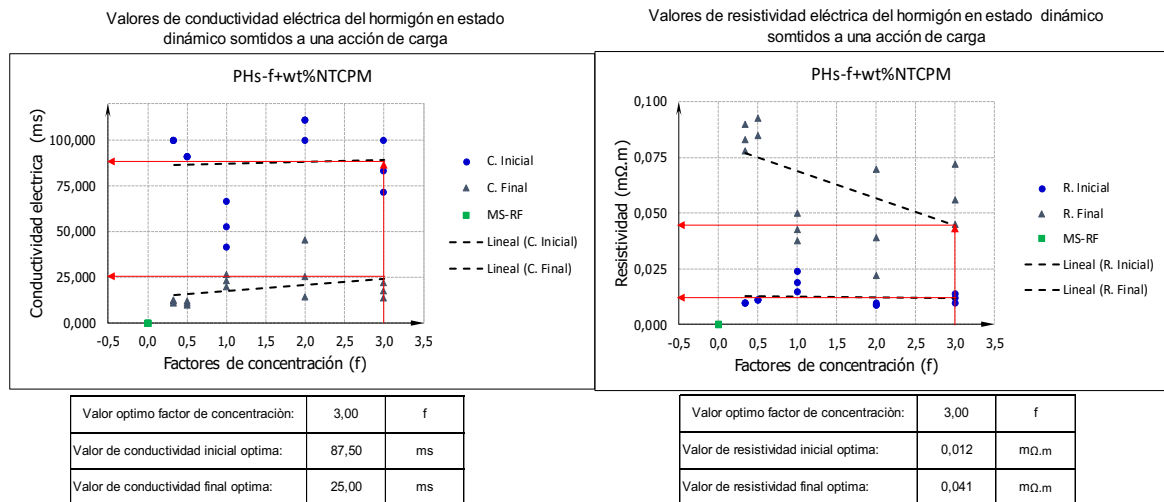


Figura 64. Valores de conductividad y resistividad eléctrica inicial y final del hormigón modificado con PHs-f-wt%NCTPM sometido a una acción de carga, cuando  $f=3$   
Fuente: El Autor  
Elaboración: El Autor

- Los valores de conductividad y resistividad eléctrica del hormigón en estado seco están representados en la figura Nro. 65, sometidos a un secado de 120° C durante 24 horas, cuando el factor de concentración es  $f=3$ , la conductividad eléctrica del hormigón en estado seco es de 350 mega siemens (ms) y el valor de la resistividad en estado seco es 0.004 mega ohmios por metro ( $m\Omega.m$ ).

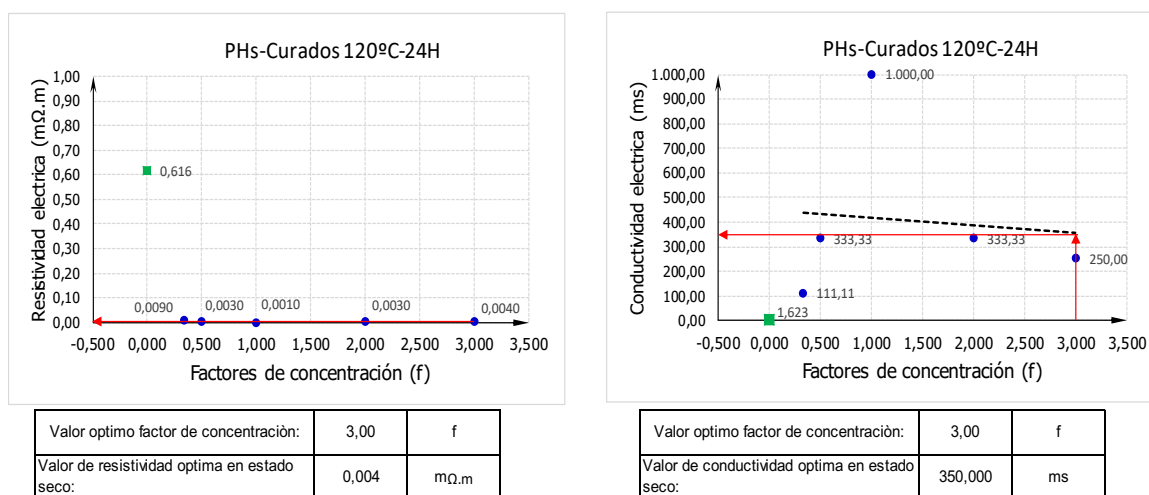


Figura 65. Valores de conductividad y resistividad eléctrica del hormigón modificado con PHS-f-wt%NTCPM en estado seco, cuando  $f=3$

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

- Los valores de conductividad y resistividad eléctrica del hormigón en estado húmedo están representados en la figura Nro. 66, sometidos a un secado de 60° C durante 6 horas, cuando el factor de concentración es  $f=3$ , la conductividad eléctrica del hormigón en estado húmedo es de 19.851 mega siemens (ms) y el valor de la resistividad en estado húmedo es 0.051 mega ohmios por metro ( $m\Omega.m$ ).

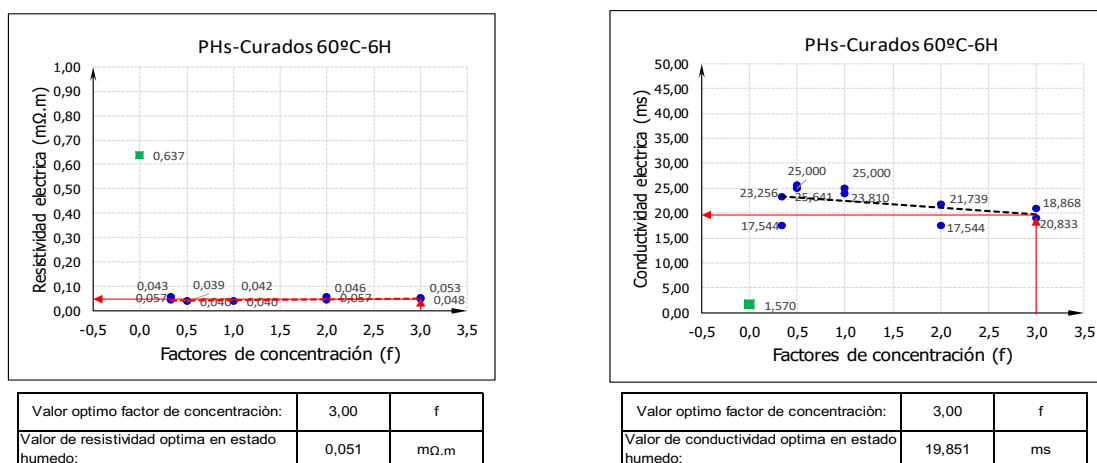


Figura 66. Valores de conductividad y resistividad eléctrica del hormigón modificado con PHS-f-wt%NTCPM en estado húmedo, cuando  $f=3$

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

- Los valores del Módulo de Elasticidad y Relación de poisson del hormigón modificado con PHS-f-wt%NTCPM se presentan en la figura Nro. 67, cuando el factor de concentración  $f=3$  el módulo de elasticidad es de 31 GPa. y la relación de poisson es de 0.30.

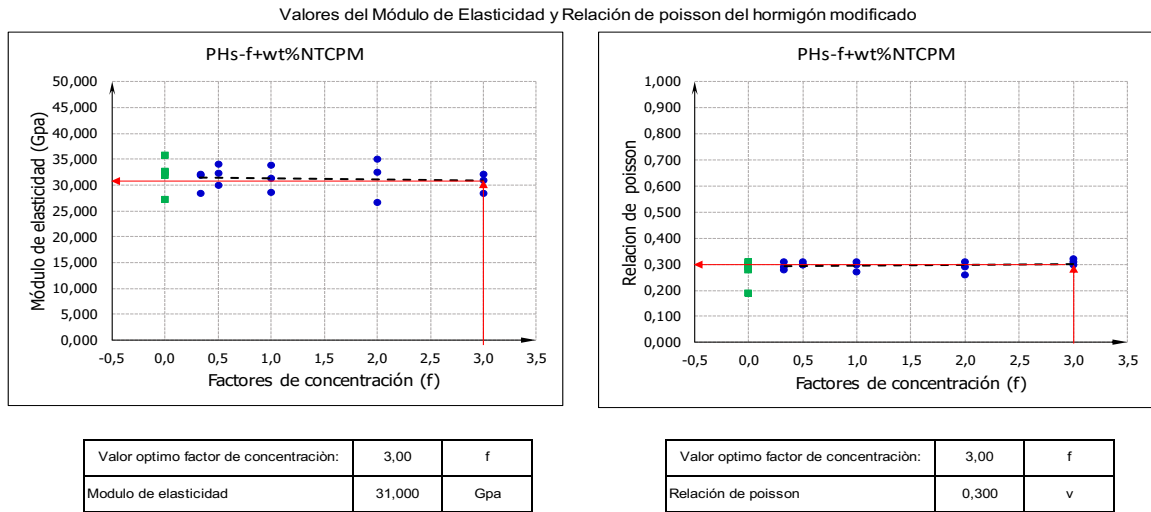


Figura 67. Valores del Módulo de Elasticidad y Relación de poisson del hormigón modificado con PHS-f-wt%NTCPM

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

- Los valores del voltaje retenido en la estructura del hormigón en estado seco y húmedo están representados en la figura Nro. 68, con un valor de 1.62 V c.c. en estado seco y 1.40 V c.c. en estado húmedo.

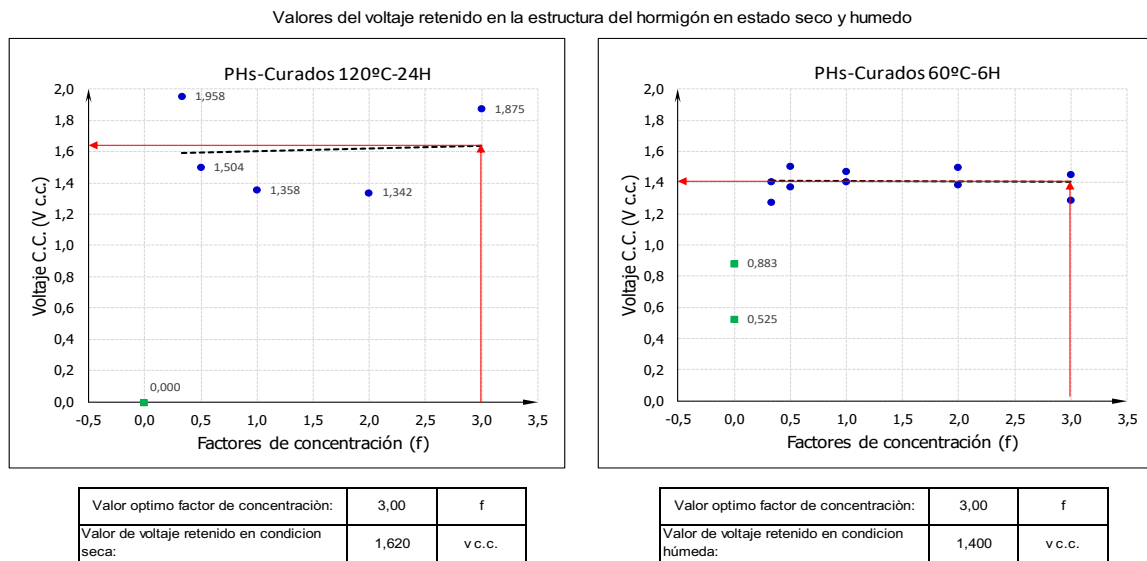


Figura 68. Valores del voltaje retenido en la estructura del hormigón modificado con PHS-f-wt%NTCPM en estado seco y húmedo.

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor



**Determinación del factor óptimo de concentración y los parámetros en las características mecánica, reológica y eléctrica en el diseño de hormigones modificados con NSS-f-wt%NTCPM.**

- a) Para determinar el factor de concentración más óptimo y obtener el máximo valor de módulo de rotura del hormigón modificado con NSS-f-wt%NTCPM, verificamos en la curva de valoración el máximo valor del módulo de rotura para el factor de concentración donde  $f = 3,00$ ; con este factor óptimo de concentración se determinaran los demás parámetros.
- b) Con el factor de concentración óptimo que es  $f = 3,00$  para hormigón modificado con NSS-f-wt%NTCPM, se procede a determinar en cada una de las curvas o tendencias los siguientes valores:

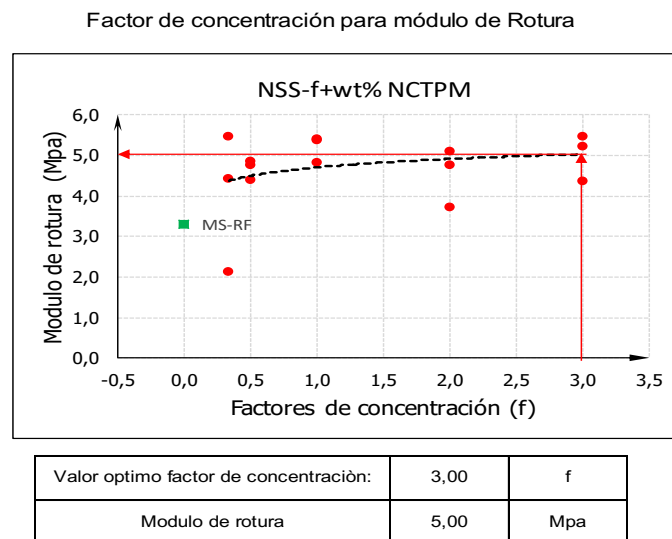


Figura 69. Factor de concentración óptimo para máximo módulo de rotura del hormigón modificado con NSS-f-wt%NTCPM  
 Fuente: El Autor  
 Elaboración: El Autor

- Los valores de conductividad y resistividad eléctrica inicial y final del hormigón en estado dinámico sometido a una acción de carga cuando el factor de concentración es igual a tres se reflejan en la figura Nro. 70, donde la conductividad eléctrica inicial es de 72 mega siemens (ms) y la final 21 ms., el valor de la resistividad inicial es 0.015 mega ohmios por metro ( $m\Omega.m$ ) y la final 0.047  $m\Omega.m$ .

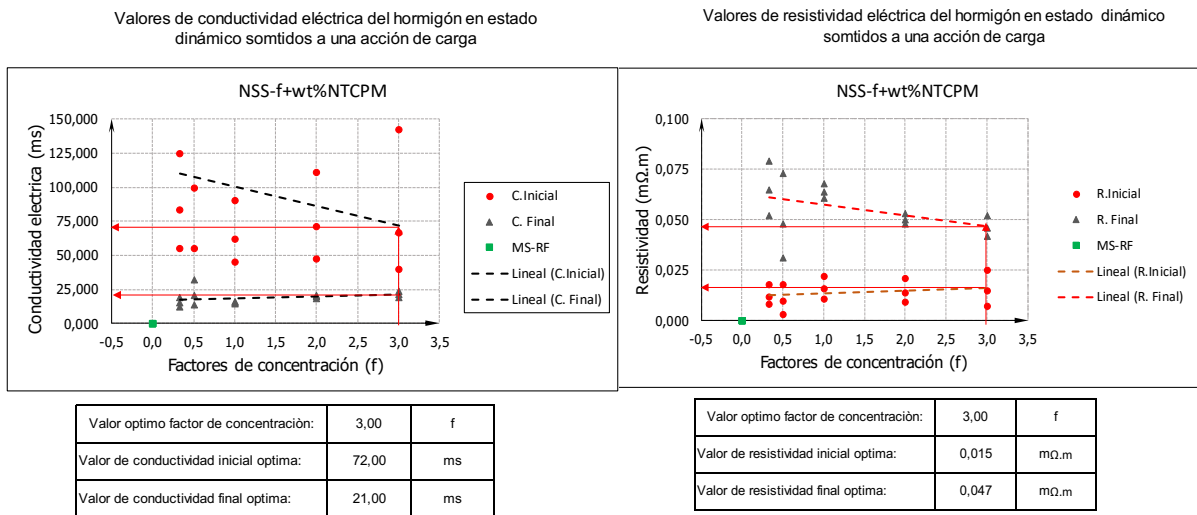


Figura 70. Valores de conductividad y resistividad eléctrica inicial y final del hormigón modificado con NSS-f-wt%NTCPM sometido a una acción de carga, cuando  $f=3$

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

- Los valores de conductividad y resistividad eléctrica del hormigón en estado seco están representados en la figura Nro. 71, sometidos a un secado de  $120^{\circ}\text{C}$  durante 24 horas, cuando el factor de concentración es  $f=3$ , la conductividad eléctrica del hormigón en estado seco es de 39 mega siemens (ms) y el valor de la resistividad en estado seco es 0.090 mega ohmios por metro ( $\text{m}\Omega.\text{m}$ ).

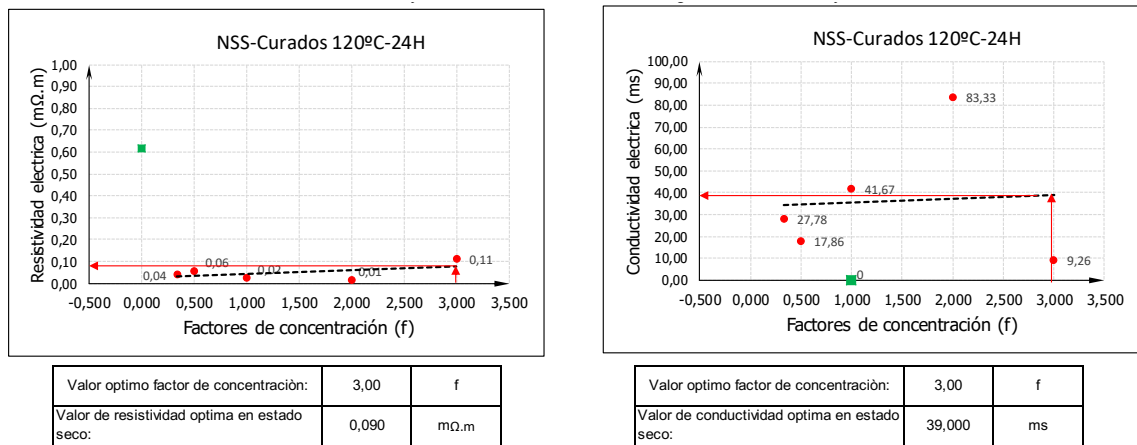


Figura 71. Valores de conductividad y resistividad eléctrica del hormigón modificado con NSS-f-wt%NTCPM en estado seco, cuando  $f=3$

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

- Los valores de conductividad y resistividad eléctrica del hormigón en estado húmedo están representados en la figura Nro. 72, sometidos a un secado de 60° C durante 6 horas, cuando el factor de concentración es  $f=3$ , la conductividad eléctrica del hormigón en estado húmedo es de 25 mega siemens (ms) y el valor de la resistividad en estado húmedo es 0.090 mega ohmios por metro ( $m\Omega.m$ ).

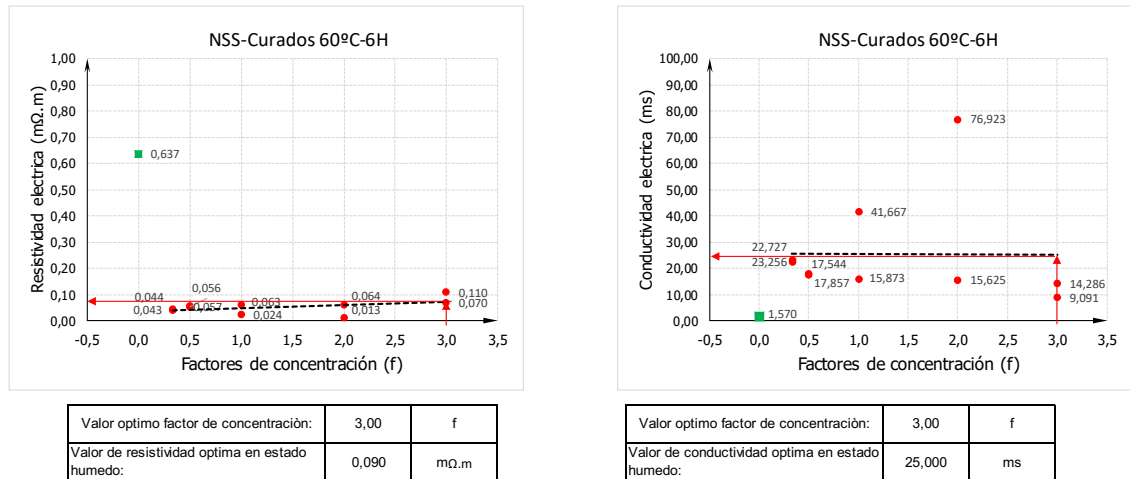


Figura 72. Valores de conductividad y resistividad eléctrica del hormigón modificado con NSS-f-wt%NTCPM en estado húmedo, cuando  $f=3$

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

- Los valores del Módulo de Elasticidad y Relación de poisson del hormigón modificado con PHs-f-wt%NTCPM se presentan en la figura Nro. 73, cuando el factor de concentración  $f=3$  el módulo de elasticidad es de 34 GPa. y la relación de poisson es de 0.20.

Valores del Módulo de Elasticidad y Relación de poisson del hormigón modificado

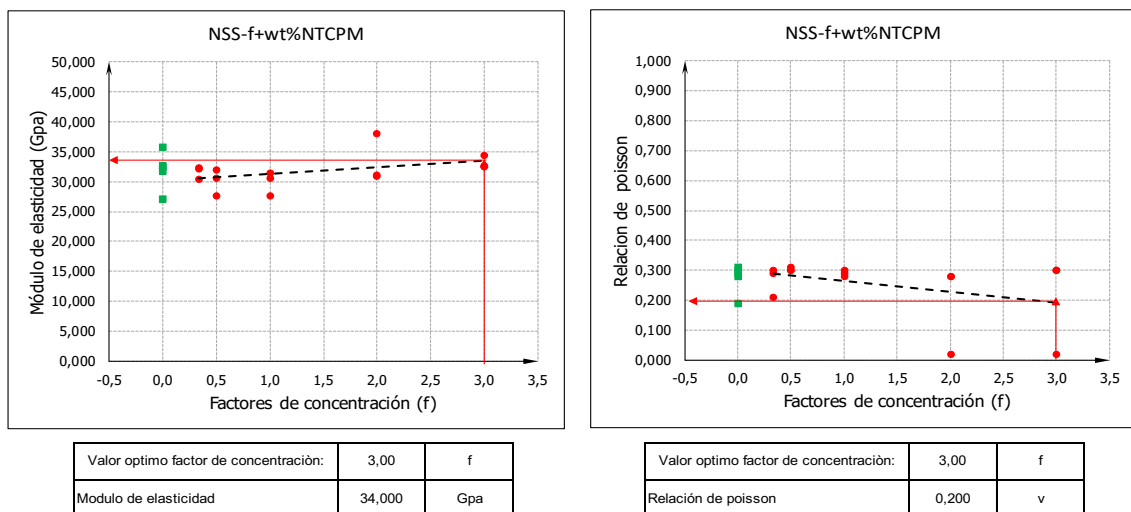


Figura 73. Valores del Módulo de Elasticidad y Relación de poisson del hormigón modificado con NSS-f-wt%NTCPM

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

- Los valores del voltaje retenido en la estructura del hormigón en estado seco y húmedo están representados en la figura Nro. 74, con un valor de 1.80 V c.c. en estado seco y 1.64 V c.c. en estado húmedo.

Valores del voltaje retenido en la estructura del hormigón en estado seco y húmedo

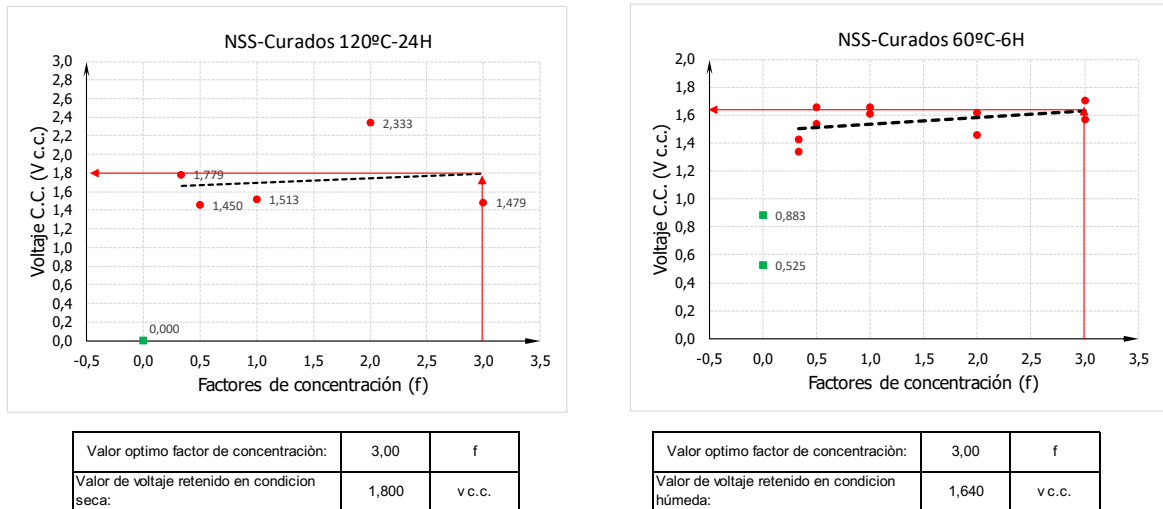


Figura 74. Valores del voltaje retenido en la estructura del hormigón modificado con NSS-f-wt%NTCPM en estado seco y húmedo.

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

## Dosificación de una mezcla de hormigón modificado con nanotubos de carbono para pavimentos rígidos.

Establecido el factor de concentración más apropiado para obtener el módulo de rotura máximo para hormigones modificados con NTCPM con agentes dispersantes a base de PHs y NSS, se procede a definir la dosificación apropiada para el diseño de hormigón definido en la sección 2.2.2 para un factor de concentración igual a tres y con las características mecánicas, reológicas y eléctricas de la tabla 45.

Tabla 45. Características mecánicas, reológicas y eléctricas del hormigón convencional y el modificado con NTCPM.

Parámetro	Unidad	Hormigón Convencional	Hormigón modificado PHs-f+wt%NTCPM	Hormigón modificado NSS-f+wt%NTCPM
Factor de concentración óptimo	f	0	3.000	3.000
Módulo de rotura	MPa	3.5	5.000	5.000
% Incremento en Mr	Mr	0%	42.9%	42.9%
Módulo de elasticidad	GPa	32.41	31.000	34.000
Relación de poisson	v	0.3	0.300	0.200
Conductividad eléctrica inicial del hormigón en estado dinámico bajo una aplicación de carga	ms	0	87.500	72.000
Conductividad eléctrica final del hormigón en estado dinámico bajo una aplicación de carga	ms	0	25.000	21.000
Resistividad eléctrica inicial del hormigón en estado dinámico bajo una aplicación de carga	mΩ.m	0	0.012	0.015

Resistividad eléctrica final del hormigón en estado dinámico bajo una aplicación de carga	mΩ.m	0	0.041	0.047
conductividad eléctrica del hormigón en estado seco	ms	0	350.000	39.000
resistividad eléctrica del hormigón en estado seco	mΩ.m	0	0.004	0.090
conductividad eléctrica del hormigón en estado humedo	ms	0	19.850	25.000
resistividad eléctrica del hormigón en estado humedo	mΩ.m	0	0.051	0.090
voltaje retenido en condicion seca:	V c.c.	0	1.620	1.800
voltaje retenido en condicion húmeda:	V c.c.	0	1.400	1.640

Nota: las unidades establecidas son: f (Factor de concentración); MPa (Megas pascales); GPa (Giga pascales);  $\nu$  (relación de poisson); ms (Mega siemens); mΩ.m (Mega ohmios por metro); V c.c. (Voltaje de corriente continua).

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

La tabla 46 representa la dosificación del hormigón convencional que fue desarrollada en este trabajo de investigación en la sección 2.2.2, se ha relacionado los valores de dosificación para 1m<sup>3</sup> de hormigón al cual posteriormente se aplicara el factor de concentración óptimo esto es f=3 desarrollado en la sección 2.2.6., y se determina el valor en peso de los NTCPM e relación al peso del cemento descritos en la tabla 47 para hormigones modificados con NSS-f+wt%NTCPM y tabla 48 para hormigones modificados con PHs-f+wt%NTCPM.

Tabla 46. Dosificación para un metro cubico de hormigón convencional.

DOSIFICACIÓN DEL HORMIGON CONVENCIONAL						
<b>PROBETA: 1 m3</b>						
<b>Nro. De probetas</b>		<b>1</b>				
volumen	cm3	m3	dm3			
	1000000	1	10000		Factor desperdicio =	1,15
Descripción	vol. Real (m3)	Vol. Espec. (Dm3)	Proporción (Tabla 27)	Peso neto Kg.	Absorción (%)	Peso (Kg)
CEMENTO	194	1935,37	1,00	500,000		575,000
AIRE	0	0,00	0,00	0,000		0,000
AGUA	199	1990,00	0,35	175,000	1,000	201,250
ARENA	250	2502,07	1,17	585,000		672,750
GRAVA	357	3572,56	1,64	820,000		943,000
SUMAN	1000	10000,00		2080,000		2392,000

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

Tabla 47. Dosificación de 1 m3 Hormigón modificado con NSS-f+wt%NTCPM

Descripción	Hormigón convencional Dosificación peso (Kg)	Dosificación f=3 peso (kg)
% NCTPM		0,525%
Wt NTCPM (g)		3,02
% NSS		0,578%
Wt NSS (g)		3,32
CEMENTO	575,00	575,00

AIRE	0,00	0,00
AGUA	201,25	201,25
ARENA	672,75	672,75
GRAVA	943,00	943,00
SUMAN	2392,00	2398,34

Nota: el porcentaje de los NTCPM y NSS se representa en relación del peso del cemento  
Fuente: El Autor  
Elaboración: El Autor

Tabla 48. Dosificación para 1 m3 de hormigón modificado con PHs-f+wt%NTCPM

Descripción	Hormigón convencional Dosificación peso (Kg)	Dosificación f=3 peso (kg)
% NTCPM		0,525%
Wt NTCPM (g)		3,02
% PHs		0,315%
Wt NSS (g)		1,81
CEMENTO	575,00	575,00
AIRE	0,00	0,00
AGUA	201,25	201,25
ARENA	672,75	672,75
GRAVA	943,00	943,00
SUMAN	2392,00	2396,83

Nota: el porcentaje de los NTCPM y PHs se representa en relación del peso del cemento  
Fuente: El Autor  
Elaboración: El Autor

### **Análisis de espesores para pavimentos rígidos método empírico mecanicista de la PCA para hormigones modificados con NTCPM dispersos a base de PHs y NSS.**

Para establecer cómo se ve afectado en el diseño de espesores de un pavimento rígido el incremento en el módulo de rotura producido por la presencia de los NTCPM en el diseño de hormigones modificados a base de PHs-f+wt%NTCPM y NSS-f+wt%NTCPM se procede a calcular en base a un espectro de carga y tránsito equivalente considerado para una vía de segundo orden como muestra patrón y sobre este espectro de carga comparar el diseño de espesores para un diseño de hormigón convencional y diseño de hormigón modificado con PHs-f+wt%NTCPM y NSS-f+wt%NTCPM, el espectro de carga patrón se ve representado en la tabla 49.

Tabla 49. Espectro de carga patrón (variable Tránsito) para una vía de segundo orden

TIPO DE EJE	CARGA TON	CARGA POR EJE (KIPS)	Carga x Fsc	Repeticiones esperadas
Simple R. Simple	4	8.8	11	699285
Simple R. Simple	6.00	13.20	16.500	2797140
Simple R. Doble	12.00	26.40	33.000	978999
Simple R. Doble	6.00	13.20	16.500	699285
Tándem	20.00	44.00	55.000	1258713
Tándem	19.00	41.80	52.250	1118856

Tridem	26.00	57.20	71.500	419571
Fuente: El Autor				
Elaboración: El Autor				

Con el espectro de carga patrón para una vía de segundo orden se procede al cálculo de los espesores para pavimento rígido con la aplicación de una hoja electrónica elaborada para este trabajo de investigación en el programa Excel siguiendo la metodología de diseño de pavimentos rígidos método empírico mecanicista de la PCA revisado en la sección 1.7.

Se procede al diseño de los espesores método de la PCA y posterior comparación de los parámetros obtenidos con los tres diseños disponibles; el hormigón convencional y el diseño de los hormigones modificados con PHs-f+wt%NTCPM y NSS-f+wt%NTCPM, los resultados obtenidos se presentan en la tabla 50.

Tabla 50. Cuadro comparativo del diseño de espesores método empírico mecanicista de la PCA consumo por fatiga

Descripción	Unidad	Hormigón		Hormigón modificado		Hormigón modificado	
		Convencional		PHs-f+wt%NTCPM		NSS-f+wt%NTCPM	
Espesor De La Losa (Tentativo)	mm	260		200		200	
Módulo K Del Apoyo	kg/cm3	4		4		4	
Módulo de Rotura del Concreto	kg/cm2	35.69		50.98		50.98	
Módulo de Elasticidad del Concreto	kg/cm2	330490		316112		346703.5	
Relación de Poisson del Concreto		0.3		0.3		0.2	
Coefficiente de Variación del Concreto (Cv)	%	15		15		15	
Factor de Seguridad de Carga (Fsc)		1.25		1.25		1.25	
Pasan por el borde %	%	0.1		0.1		0.1	
Bermas		NO		SI		SI	
Pasadores		SI		SI		SI	
Variable Transito	CARGA POR EJE (KIPS)	Repetic. admisibles	Consumo de Fatiga (%)	Repetic. admisibles	Consumo de Fatiga (%)	Repetic. admisibles	Consumo de Fatiga (%)
Simple R. Simple	8.8	INFINITAS	0.00%	INFINITAS	0.00%	INFINITAS	0.00%
Simple R. Simple	13.2	INFINITAS	0.00%	INFINITAS	0.00%	INFINITAS	0.00%
Simple R. Doble	26.4	INFINITAS	0.00%	INFINITAS	0.00%	INFINITAS	0.00%
Simple R. Doble	13.2	INFINITAS	0.00%	INFINITAS	0.00%	INFINITAS	0.00%
Tándem	44	INFINITAS	0.00%	INFINITAS	0.00%	INFINITAS	0.00%
Tándem	41.8	INFINITAS	0.00%	INFINITAS	0.00%	INFINITAS	0.00%
Tridem	57.2	INFINITAS	0.00%	INFINITAS	0.00%	INFINITAS	0.00%
Variable Transito	CARGA POR EJE (KIPS)	Repetic. admisibles	Consumo de erosión (%)	Repetic. admisibles	Consumo de erosión (%)	Repetic. admisibles	Consumo de erosión (%)
Simple R. Simple	8.8	INFINITAS	0.00%	INFINITAS	0.00%	INFINITAS	0.00%
Simple R. Simple	13.2	INFINITAS	0.00%	INFINITAS	0.00%	INFINITAS	0.00%
Simple R. Doble	26.4	INFINITAS	1.71%	INFINITAS	9.03%	INFINITAS	7.59%

Simple R. Doble	13.2	INFINITA S	0.00%	INFINITA S	0.00%	INFINITA S	0.00%
Tándem	44	INFINITA S	4.41%	INFINITA S	6.89%	INFINITA S	6.05%
Tándem	41.8	INFINITA S	2.41%	INFINITA S	1.75%	INFINITA S	1.38%
Tridem	57.2	INFINITA S	0.31%	INFINITA S	0.00%	INFINITA S	0.00%

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

La tabla 50 demuestra como se ve reducido el espesor del pavimento del hormigón en 60mm a causa del incremento en el módulo de rotura por la presencia de los NTCPM en la estructura molecular de la mezcla de hormigón sin causar daños de consumo por fatiga, sin embargo para logra reducir en hasta 60 mm el espesor del hormigón al consumo por erosión y reducir este fenómeno deben tenerse en cuenta otras consideraciones como la construcción de bermas, para todos los casos será necesario la colocación de pasadores y barras de transferencia de carga.

### Resultado tercera etapa

#### **Análisis comparativo del módulo de rotura en hormigones modificados con nanotubos carbono de pared múltiple, con fibras de polipropileno, con fibras metálicas y el hormigón convencional no modificado.**

Para tener una idea generalizada de la causa que producen los NTCPM en el módulo de rotura frente a otros materiales considerados como componentes de la estructura del hormigón en la pasta cementante y que han sido utilizados en los diseños de hormigones para pavimento rígidos donde se han pretendido incrementar el módulo de rotura, en esta sección realizaremos un análisis comparativo de las características que producen la incorporación de los nanotubos carbono de pared múltiple, las fibras de polipropileno y las fibras metálicas con el hormigón convencional no modificado.

Tabla 51. Comparativo de hormigones modificados con NTCPM, fibras de polipropileno y fibras metálicas.

Parámetro	Unidad	Hormigón Convencional	Hormigón modificado PHs- f+wt%NTCP M	Hormigón modificado NSS- f+wt%NTCP M	Hormigón Convencional Caraguay (2015)	Hormigón modificado fibras de polipropileno	Hormigón modificado fibras metálicas
Factor de concentración	f	0	3.000	3.000	-	-	-
Módulo de rotura	MPa	3.5	5.000	5.000	4.400	4.700	5.600
% Incremento en Mr	Mr	0%	42.9%	42.9%	0.0%	6.8%	27.3%
Propiedades Eléctricas:		NO	SI	SI	NO	NO	NO

Fuente: El Autor, (Caraguay, 2015)

Elaboración: El Autor

En la tabla 51 se observa el incremento que producen los diferentes materiales en la pasta cementante, los NTCPM incrementan en hasta un 42.9% el módulo de rotura respecto al



hormigón convencional a diferencia del incremento de las fibras de polipropileno que incrementan un 6.8% y las fibras metálicas en 27.3%, además que la incorporación de los NTCPM en el hormigón le dan la capacidad de convertirse en un material semiconductor por las propiedades eléctricas que poseen los NTCs, que pueden ser utilizada y potenciadas para obtener datos de la micro estructura del hormigón mediante ensayos de resistividad y conductividad eléctrica, algo que no puede darse con las fibras de polipropileno y las fibras metálicas ya que estos materiales no modifican la estructura molecular de la pasta cementante.

Las propiedades eléctricas de los NTCPM modificaron la estructura del hormigón convirtiéndolo en un material conductor, cuando se presentan en condiciones de alta temperatura (estado seco) el hormigón modificado a base de PHs-n-f+%NCPM presentan mayor conductividad eléctrica y menor resistividad que los modificados con NSS-n-f+%NCPM, en comparación con el hormigón tradicional que es un material no conductor altamente resistente. Los hormigones modificados a base de PHs-n-f+%NCPM y NSS-n-f+%NCPM en estado húmedo presentan similares comportamientos por la presencia del H<sub>2</sub>O en la estructura sin embargo a pesar de ello siguen siendo materiales conductivos ya que existe una brecha muy extensa en comparación con el hormigón convencional que es un material no conductor. Los NTCPM no solo ayudan a la estructura del hormigón a ser más conductivos sino también a almacenar energía en pequeñas cantidades capaces de encender un diodo led de 3 voltios aunque su capacidad de almacenamiento no es tan duradera esto demuestra la capacidad que tiene los NTCPM de modificar en cierta manera la estructura del hormigón a escala manométrica. Los efectos de los NTCPM en la estructura del hormigón ocasionan variaciones muy extensas en sus propiedades eléctricas, siendo capaces de modificar su estructura a escala manométrica y convertir al hormigón en un material conductor, al lograr esta modificación se podría entonces, con mediciones de resistividad y conductividad eléctrica en el hormigón determinar el grado de deterioro de su estructura, establecer su edad, medir la humedad relativa de la estructura y la cantidad de energía que pudiera almacenar en su estructura. La presencia del H<sub>2</sub>O, humedad en la estructura del hormigón actúa como un agente equilibrante en las propiedades eléctricas de los hormigones modificados con NTCPM, sin importar el agente dispersante utilizado en la elaboración del hormigón con esto se concluye que el agente dispersante no aporta ninguna modificación en la estructura del hormigón solo actúa como solvente para lograr la dispersión más homogénea en la pasta cementante. Las propiedades mecánicas de los NTCPM modificaron la estructura del hormigón convirtiéndolo en un material más resistente a la flexión por tracción incrementando su módulo de rotura en hasta 46,70% para hormigones modificados con PHs-f+%NCPM y 62,61% para hormigones modificados con NSS-f+%NCPM. Los valores del módulo de rotura obtenidos de las probetas de hormigón modificada con PHs-n-f+%NCPM presentan mayor variación respecto a los valores de referencia MS-RF, se presume que dicha variación está asociada a su estructura interna pueden atribuírsele a la distribución granulométrica o a la calidad de los agregados. Los valores del módulo de rotura obtenidos de las probetas de hormigón modificada con NSS-n-f+%NCPM también presentan variación respecto a los valores de referencia MS-RF, se presume que dicha dispersión está asociada a su estructura interna pueden atribuírsele a la distribución granulométrica o a la calidad de los agregados. El hormigón modificado con PHs-n-f+%NCPM presenta alteraciones en la medición del voltaje cuando se es sometido a una acción de carga siendo capaz de aumentar su resistividad y disminuir su conductividad esto se pudo verificar realizando la medición del voltaje mientras se aplicaba la carga para el ensayo de flexión en la viga de tres puntos, demostrándose así que la presencia de los NTCPM en la estructura del hormigón pueden generar datos de la estructura

en estado dinámico al alterar la resistividad y conductividad del hormigón. El hormigón modificado con NSS-n-f+%NCPM también presenta alteraciones en la medición del voltaje cuando se es sometido a una acción de carga siendo capaz de aumentar su resistividad y disminuir su conductividad logrando también generar datos de la estructura en estado dinámico al alterar la resistividad y conductividad del hormigón. El módulo de elasticidad y la relación de poisson no se ven alterados por la presencia de los NTCPM en la estructura del hormigón, los ensayos para obtener los valores del módulo de elasticidad y la relación de poisson fueron efectuados mediante el empleo del equipo Pundit pl200 que utiliza la medición de una onda ultrasónica que atraviesa la estructura en función de la velocidad se presume que las velocidades de onda no son capaces de medir la capacidad de los NTCPM en la estructura ya que se trata de un ensayo físico estático y no dinámico. El factor de concentración óptimo para un diseño de hormigones modificado con PHs-n-f+%NCPM y NSS-n-f+%NCPM es  $f=3$  (tres) logrando incrementar el módulo de rotura en 42.9% para ambos casos. Los NTCPM en la pasta cementante otorgaron al hormigón propiedades eléctricas capaces de medir la conductividad eléctrica inicial del hormigón en estado dinámico bajo una aplicación de carga, conductividad eléctrica final del hormigón en estado dinámico bajo una aplicación de carga, resistividad eléctrica inicial del hormigón en estado dinámico bajo una aplicación de carga, resistividad eléctrica final del hormigón en estado dinámico bajo una aplicación de carga, conductividad eléctrica del hormigón en estado seco, resistividad eléctrica del hormigón en estado seco, conductividad eléctrica del hormigón en estado húmedo, resistividad eléctrica del hormigón en estado húmedo, voltaje retenido en condición seca y voltaje retenido en condición húmeda. Los NTCPM en la estructura del hormigón son capaces de incrementar el módulo de rotura llegando a disminuir los espesores de las losas de hormigón para pavimentos rígidos, con un ensayo de muestra patrón se pudo verificar que se puede disminuir en 60mm el espesor de la losa de hormigón.

## BIBLIOGRAFIA.

- ADITEC, E. (2015). *Superplastificante de Hormigón-Aditec SF-106*.
- American Concrete Institute, A. (2015). *Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural*.
- American Society for Testing and Materials, A. (2000). Standard Test Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock 1.
- Andrade, C., & Andrea, R. D. (2011). La resistividad eléctrica como parámetro de control del hormigón y de su durabilidad. *ALCONPAT*, 1, 93–101.
- Andrade Guel, M. L., López López, L. I., & Sáenz Galindo, A. (2012). Nanotubos de carbono: funcionalización y aplicaciones biológicas. *Revista Mexicana de Ciencias Farmaceuticas*, 43.
- Ariza, A., & Casas, J. (2013). *ESTADO DEL ARTE USO DE NANOTUBOS DE CARBONO PARA LA MEJORA DE LAS PROPIEDADES EN LOS CONCRETOS*.
- Caraguay, J. C. (2015). "Diseño de mezclas de concreto elaboradas con fibras metálicas, fibras de polipropileno y agregados procedentes de dos canteras; con uso potencial en el pavimento de la vía de enlace a la Subestación Villonaco."
- Chen, S. J., Collins, F. G., Macleod, A. J. N., Pan, Z., Duan, W. H., & Wang, C. M. (2011). Carbon nanotube – cement composites : A retrospect. *Taylor & Francis*, 4(July 2013), 37–41. <http://doi.org/10.1080/19373260.2011.615474>
- Eftekhari, M., & Mohammadi, S. (2016). Multiscale dynamic fracture behavior of the carbon nanotube reinforced concrete under impact loading. *International Journal of Impact Engineering*, 87, 55–64. <http://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2015.06.023>
- Enyashin, A. N., & Ivanovskii, A. L. (2007). Functionalization of carbon nanotubes by covalently bonded graphite nanoplatelets : a theoretical study. *ELSEVIER*, 17, 199–201. <http://doi.org/10.1016/j.mencom.2007.06.003>
- Health & Safety, U. of C. (2007). *Nanotechnology: Guidelines Guidelines for Safe Research Practices*.
- Hilding, J., Grulke, E. A., Zhang, Z. G., & Lockwood, F. (2007). Dispersion of Carbon Nanotubes in Liquids, (April 2015), 37–41. <http://doi.org/10.1081/DIS-120017941>
- Holcim Ecuador. (n.d.). *Evolución de las Normas para la fabricación de cemento y características de sus aplicaciones*. Holcim Ecuador S.A.
- Holcim Ecuador. (2011). *Certificado de Producto Cemento Holcim Tipo GU*.
- Holcim Ecuador. (2014). *Cemento Holcim Rocafuerte Tipo GU*.
- Holcim Ecuador. (2015). *Holcim Fuerte*.
- Huang, Y. H. (2004). *Pavement Analysis and Design*. (Pearson, Ed.) (Segunda Ed). Kentucky: Pearson Prentice Hall.
- INEN 0488, N. (2009). *Cemento Hidráulico. Determinación de la resistencia a la compresión de morteros en cubos de 50 mm de arista*. Instituto Ecuatoriano de Normalización.
- INEN 2554, I. E. de N. (2011). *Determinación de la resistencia a la flexión del hormigón. (utilizando una viga simple con carga en los tercios)*. INEN -2011 (Vol. 2554).
- INEN 872, I. E. de N. (2011). *ÁRIDOS PARA HORMIGÓN. REQUISITOS*. INEN -2011 (Vol.

- 2007). Retrieved from <http://www.bvsde.paho.org/cgi-bin/wxis.exe/iah/?IsisScript=iah/iah.xis&base=bvsde.others&lang=e&nextAction=lnk&exprSearch=BVSDE.00013745&indexSearch=ID>
- Instituto Boliviano del Cemento y El Hormigón, I., & Ministerio de Transporte y Obras Publicas, M. (2012). *CONSTRUCCIÓN DE PAVIMENTOS RIGIDOS*.
- Jiménez, P., Garcia, Á., & Morán, F. (2000). *Hormigón Armado EHE*. (G. Gili, Ed.) (14th ed.). Barcelona.
- Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., Panarese, W. C., & Tanesi, J. (2004). *Diseño y Control de Mezclas de Concreto*.
- Lee, Y., & Carpenter, S. H. (2002). PCAWIN Program for Jointed Concrete Pavement Design, *4*(4), 293–300.
- López, H., & Montejó, L. (2001). *Determinación de las propiedades mecánicas del concreto endurecido usadas en el diseño estructural para los concretos elaborados en la ciudad de cali con materiales de la región*.
- MA, P.-C., Siddiqui, N. A., Marom, G., & Kim, J.-K. (2010). Dispersion and Functionalization of Carbon Nanotubes for Polymer-Based Nanocomposites : A Review. *ELSEVIER*, (February 2015), 1345–1367. <http://doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.07.003>
- Marcondes, C. (2012). *Adición de Nanotubos de Carbono en Concreto de Cemento Portland-Absorción, Permeabilidad, Penetración de Cloruros y Propiedades Mecánicas*. Universidad Federal de Paraná.
- Marcondes, C., Medeiros, M. H. F., Filho, J. M., & Helene, P. (2015). Nanotubos de carbono en concreto de cemento Portland. Influencia de la dispersión en las propiedades mecánicas y en la absorción de agua. *ALCONPAT*, *5*, 97–114.
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2001). Microstructure , Properties and Materials. In *CONCRETE* (p. 231).
- Ministerio de Industrias y Productividad. (2013). *Estudio Basico de la Industria Cementera en Ecuador*.
- Ministerio de Transporte y Obras Publicas, M. (2011). Construyendo obras viales en el Ecuador. *Boletín de Prensa*, p. 82.
- MTOP. (2002). *Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes - Mop - 001-F 2002*. Retrieved from [http://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/07/01-07-2013\\_ConcursoPublico\\_StoDomingo-Esmeraldas-Especificaciones-Tecnicas.pdf](http://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/07/01-07-2013_ConcursoPublico_StoDomingo-Esmeraldas-Especificaciones-Tecnicas.pdf)
- Muñoz, C., & Quiroz, F. (2014). Análisis de Ciclo de Vida en la determinación de la energía contenida y la huella de carbono en el proceso de fabricación del hormigón premezclado . Caso estudio planta productora Región del Bio Bio, Chile, *4*(Lci), 16–25.
- Orbe, L., & Zuñiga, P. (2013). *Optimización de la relación agua/cemento en el Diseño de Hormigones Estandar establecidos en los codigos ACI - ASTM*.
- PCA. (1984). Capitulo 10, Metodo de la PCA. In *Diseño de Pavimentos Rigidos metodo de la PCA*. (p. 26).
- Picos, C. (2014). *Durabilidad en el hormigón armado*.
- Puertas Maroto, F., Palomo Sánchez, Á., & Blanco Varela, M. T. (1991). Microestructuras interfaciales en el hormigón Interface Microstructures in Concrete. *Materiales de Construcción*, *41*(221), 91–106. Retrieved from <http://hdl.handle.net/10261/55799>
- Qissab, M. A., & Abbas, S. T. (2016). Behaviour of reinforced concrete beams with multiwall carbon nanotubes under monotonic loading. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, *8189*(September), 1–20. <http://doi.org/10.1080/19648189.2016.1232661>

- Ríos, P. (2016). *Dispersión de nanotubos de carbono en probetas de concreto*. Universidad Tecnica Particular de Loja.
- Romo, M. (2008). *TEMAS DE CONCRETO ARMADO*.
- Safiunddin, M., Gonzalez, M., Cao, J., & Tighe, S. L. (2014). State-of-the-art report on use of nano-materials in concrete. *Taylor & Francis*, (August 2014), 37–41.  
<http://doi.org/10.1080/10298436.2014.893327>
- Santiago de Cali, U. (n.d.). *GUIAS UNICAS DE LABORATORIO DE ELECTRONICA I*.
- Urtubey, E., & Loreface, R. (2005). Reología del Hormigón-Fluencia Básica, Estado del Arte de Simulación Numérica. *Mecanica Computacional*, XXIV(1966), 423–439.



### **Daniel Alexander Llanos Rodríguez**

Machala · WhatsApp 0980492287, daxllr1783@gmail.com · Daniel Llanos LinkedIn · Ingspractic.com, dax\_llr@hotmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-2008-6115>

Graduado de Master en Ingeniería Vial de la Universidad Técnica Particular de Loja, Especialista en Ingeniería para el Tratamiento de Aguas Especiales por la Universidad Panamericana de Estudios Superiores de México, Especialista en Gerencia Efectiva de Organismos Operadores de Agua por la Universidad de Cuenca y el Tecnológico de Monterrey-México, Diplomado en Hidráulica Urbana por la Universidad Americana de Acapulco, México, Graduado de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Técnica de Machala, inicio su experiencia profesional como técnico-académico y laboratorista de agregados y hormigones en los laboratorios del Centro Técnico del Hormigón CTH hoy Holcim en la ciudad de Guayaquil, adquirió experiencia como técnico topógrafo fortaleciendo habilidades con el dominio y manejo de equipos topográficos, estación total, GPS, y manejo de programas informáticos para el diseño y dibujo de plataformas, movimientos de tierras y vialidad, ha colaborado como residente de obra en varios proyectos, dominando la ejecución y coordinación de cronogramas valorados de trabajos, ruta crítica, manejo del portal de compras públicas y fortalecimiento de la contratación pública de obras civiles, ha realizado actividades de Ingeniería como Ayudante de Fiscalización y Fiscalizador en obras viales con pavimentos de Hormigón Asfáltico y Hormigón Hidráulico, obteniendo sólidos conocimientos en los procesos de Construcción, Fiscalización y Administración de Obras viales que ejecutó el Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador en los años 2009 hasta el 2015, también ha desempeñado actividades de Especialista en Fiscalización de obras hidráulicas y de mantenimiento vial, en los últimos años ha participado en la planificación y desarrollo de proyectos de mantenimiento vial, hidrosanitarios y tratamiento biológico en plantas de tratamiento de aguas residuales en la en la ciudad de Machala, he diseñado e implementado programas de gestión y construcción de planes maestros, como especialista en Administración, Fiscalización, Gestión de Proyectos de Agua Potable y Saneamiento, desempeñando cargos de ingeniería y de la administración pública por cerca de 14 años, obteniendo sólidos conocimientos en Administración pública, fiscalización y consultorías. En los años 2019, 2021, 2022 y 2023 ha colaborado como asesor técnico en consultorías de proyectos viales e hidrosanitarios en urbanizaciones privadas y ha participado como docente invitado en el programa de Maestría en Ingeniería Vial impartido por la universidad técnica de Machala asistiendo como tutor y cotutor de tesis de maestría, así como parte de la conformación de la mesa técnica para la defensa de tesis de posgrado.



### **Paul Eduardo Suarez Ramos**

Machala · WhatsApp 0992366497, psuarezr@ulvr.edu.ec, <https://orcid.org/0009-0005-5746-9568>

Ingsuarezramos@gmail.com Título: Ingeniero civil, Graduado en la Universidad LAICA VICENTE ROCAFUERTE DE GUAYAQUIL en el (2007-2013), Docente universitario , Docente Delegado Principal de proyecto de Vinculación con la sociedad en la carrera de ingeniería civil de la universidad LAICA VICENTE ROCAFUERTE DE GUAYAQUIL, Docente en las asignaturas de Carreteras e ingeniería de tránsito , Director de Tesis de Pregrado – Universidad Laica VICENTE ROCAFUERTE DE GUAYAQUIL.–, Magister en Ingeniería Vial, Universidad Técnica Particular de Loja. Especialista en Diseño Vial. Consultor Vial.



### **Alonso Rodrigo Zúñiga Suárez**

Loja · WhatsApp 0999679789, arzunigax@utpl.edu.ec · Alonso Zúñiga LinkedIn · arzunigax@gmail.com , <https://orcid.org/0000-0001-9867-0069>

Doctor en Construcción y Tecnologías Arquitectónicas por la Universidad Politécnica de Madrid, cuya máxima calificación obtenida ese "Cum Laude", el título tiene el carácter de "Doctor Internacional", Magister en Ingeniería Civil mención en Ingeniería Vial por la Universidad de Piura – Perú, Diploma Superior en Gestión y Evaluación de Proyectos por el Instituto de Altos Estudios Nacionales, Ingeniero Civil por la Universidad Técnica Particular de Loja.

En la actualidad es docente de la Universidad Técnica particular de Loja en grado y posgrado, ha participado en más de 17 proyectos institucionales, posee varias publicaciones de divulgación nacional e internacional



### **Alexis Vladimir Valle Benitez**

Guayaquil · WhatsApp 098 6487016 , avalleb@ulvr.edu.ec , <https://orcid.org/0000-0002-9274-3738>

Ingeniero Civil, Magister en Sistemas Integrados de Gestión, Candidato a Doctor en Administración Gerencial, Administrador de proyectos en las fases preparatoria, pre contractual y contractual para procedimientos de Contratación Pública, Ex Asesor de la Alcaldía de la Troncal, Ex Asesor de la Empresa Pública Municipal de Saneamiento Ambiental de Babahoyo EMSABA EP, Los Ríos - Ecuador, Ex Asesor de la Empresa Pública de Agua Potable y. Alcantarillado La Troncal EMAPAT EP, Ex Asesor de la Secretaria General del Concejo de la Alcaldía El Triunfo, Ex Representante Técnico Legal de ESPOLTEL S.A., empresa pública de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), Docente Universitario, Director de la Carrera de Ingeniería Civil de la ULVR. Universidad Laica Vicente Rocafuerte – Guayaquil Ecuador – Docente – Director de la Carrera de Ingeniería Civil – FIIC-Facultad de Ingeniería, Industria y Construcción.

ISBN: 978-9942-33-702-3



**compAs**  
Grupo de capacitación e investigación pedagógica



@grupocompas.ec

compasacademico@icloud.com