



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CHETUMAL

“ESTUDIO DE LA PENETRACIÓN DE
CLORUROS EN CONCRETOS ELABORADOS
CON DIFERENTES TIPOS DE CEMENTO Y
ADICIÓN DE NANOTUBOS DE CARBONO”

Tesis que para obtener el Grado de:

Maestro en Construcción

Presenta:

Arq. Carlos Roberto Arteaga Larios

Director:

Dr. Luis Felipe Jiménez Torrez

Chetumal, Quintana Roo, México, Mayo de 2018

SECCION: DIV. EST. POSGRADO
OFICIO No. W-300/2018

Chetumal, Q. Roo., 27 de septiembre 2018.

ASUNTO: Autorización de impresión.

C. CARLOS ROBERTO ARTEAGA LARIOS

De acuerdo a las Disposiciones para la Operación de Estudios de Posgrado del Tecnológico Nacional de México, dependiente de la Secretaría de Educación Pública, y habiendo cumplido con todas las indicaciones que el comité tutorial le hizo con respecto a su tesis titulada:

“ESTUDIO DE LA PENETRACIÓN DE CLORUROS EN CONCRETOS ELABORADOS CON DIFERENTES TIPOS DE CEMENTO Y ADICION DE NANOTUBOS DE CARBONO”

La División a mi cargo le concede la autorización para que proceda a la impresión de la misma.

R

ATENTAMENTE
“Cultura Ciencia y Tecnología para la superación de México”

DRA. ALICIA CARRILLO BASTOS
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

SECRETARIA DE
EDUCACION PUBLICA
INSTITUTO TECNOLÓGICO
DE CHETUMAL
DIVISION DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACION

C.c.p. Departamento de Servicios Escolares.
C.c.p. Minutario.
ACB/Gaby



Av. Insurgentes No. 330, Esq. Andrés Quintana Roo, Colonia David Gustavo Gutiérrez, Apdo.
Postal 267, C.P. 77013 Chetumal Quintana Roo México, Tel. (983) 8322330 y 8321019

Ext. 101

www.itchetumal.edu.mx



AGRADECIMIENTOS

“Veni, vidi, vici”

-Julio Cesar

Agradezco:

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por introducirme en el mundo de la investigación científica y por la beca de manutención del cual fui beneficiado.

Al Instituto Tecnológico de Chetumal especialmente a la División de estudios de posgrado por abrirme las puertas e integrarme como alumno.

Especial agradecimiento al Dr. Felipe Jimenez Torrez mi director de tesis por despertar en mí el interés por el tema, guiarme y apoyarme en mi formación y por el conocimiento compartido que culmino en este trabajo.

A mis asesores de tesis el Dr. Julio Cruz por el apoyo y las facilidades brindadas en el área de trabajo y al Dr. Jose Antonio Lepe por el apoyo brindado durante la experimentación y redacción de la presente tesis.

A mi madre mi principal motor, por todo el apoyo que me brindo para emprender el viaje la Lic. Maria Isabel Larios Rios, que me animaba en los días más difíciles siendo un soporte vital para lograr mis objetivos.

A la Arq. Jarely Moreno, quien fue y sigue siendo un gran soporte durante los últimos años, gracias a la maestría nos encontramos y pudimos conformar un gran equipo que rebasó lo académico, mi compañera inseparable que me apoya y guía.

A los grandes amigos que pude conocer en esta etapa de mi vida, el Ing. Gerardo Mendoza quien siempre mostro una mano cálida y nos hizo sentir en casa y al gran grupo de la maestría que si no los nombro es por falta de espacio.

RESUMEN

Existen factores que inciden directamente en la durabilidad del concreto a nivel microestructura del elemento, una de las principales causas de la degradación es inducida por la corrosión produciendo pérdidas económicas en la industria de la construcción. Los principales fenómenos que causan la corrosión en concreto armado son la penetración del ion cloruro y la carbonatación, siendo la primera de mayor susceptibilidad en ambientes expuestos a zona costera, es por ello que se buscan nuevas alternativas de adiciones en diferentes tipos de cemento para reforzar el concreto ante este fenómeno.

En este trabajo se planteó determinar la resistencia a la penetración de cloruros en concretos fabricados con cemento Portland puzolánico adicionado con nanotubos de carbono, se evaluaron los índices del coeficiente de migración del ion cloruro, debido a que este fenómeno se refleja en un lapso de tiempo prolongado fue necesario acelerar el proceso mediante la implementación de un campo eléctrico el cual forzó el ingreso del ion a través de la estructura del elemento, se hizo la comparativa de esta adición ensayando probetas en base relación agua-cemento de 0.65, 0.50 y 0.45 los cuales se aproximan a las resistencias utilizadas actualmente en estructuras expuestas a zona costera.

Se utilizó cemento Portland puzolánico, cemento Portland compuesto, agregados calizos y Nanotubos de carbono multipared de origen comercial, se fabricaron 12 mezclas de concreto a una edad de 28 días, evaluando sus características en estado fresco, mecánicas y físicas, se determinó su sorptividad mediante el método ASTM y método de Fagerlund y se obtuvo su coeficiente de migración mediante el método noruego NTBuild 492.

La adición de nanotubos de carbono multipared al concreto disminuyó su trabajabilidad en estado fresco y presentaron problemas de dispersión, dicha adición dificultó la adherencia del agregado con la pasta de cemento afectando sus características mecánicas, la mezcla que mostró mejor desempeño de durabilidad con respecto a las demás ensayadas fue la elaborada con cemento portland puzolánico adicionado con nanotubos de carbono multipared en su relación agua-cemento 0.50, pero esta no alcanzó los límites establecidos tanto para sorptividad como el coeficiente de migración del ion cloruro.

ABSTRACT

There are factors that directly affect the durability of concrete at the microstructure level of the element, one of the main causes of degradation is induced by corrosion causing economic losses in the construction industry. The main problem that cause corrosion in reinforced concrete are the penetration of the chloride ion and carbonation, being the first one of greater susceptibility in environments exposed to coastal zone, that is why new alternatives of additions in different types of cement are looked to reinforce the concrete before this phenomenon.

In this work, it was proposed determine the resistance to the penetration of chlorides in concrete made with Portland pozzolanic cement added with carbon nanotubes; Migration coefficient of the chloride ion were evaluated, because this phenomenon is reflected in a lapse of time prolonged was necessary to accelerate the process by implementing an electric field which forced the entry of the ion through the structure of the element, the comparison of this addition was made by testing specimens based on 0.65, 0.50 and 0.45 w/c, which are close to the resistances of concrete that are currently used in structures exposed to the coastal zone.

Pozzolanic Portland cement, Ordinary Portland cement, limestone aggregates and commercial multipared carbon nanotubes were used, 12 concrete mixtures were manufactured at an age of 28 days, evaluating their characteristics in fresh, mechanical and physical state; their support was determined by the ASTM method and the Fagerlund method and its migration coefficient was obtained using the Norwegian method NTBuild 492.

The addition of multiwalled carbon nanotubes to the concrete decreased its workability in the fresh state and presented dispersion problems, said addition hindered the adherence of the aggregate with the cement paste affecting its mechanical characteristics, the mixture that showed better durability performance with respect to the other tests were those made with pozzolanic Portland cement added with multiwalled carbon nanotubes in their 0.50 w/c, but this did not reach the limits established for both the sorptivity and the migration coefficient of the chloride ion.

ÍNDICE

| | |
|--|----|
| RESUMEN | 4 |
| ABSTRACT | 5 |
| INTRODUCCIÓN | 10 |
| Capítulo 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 10 |
| 1.1 Antecedentes | 10 |
| 1.2 Identificación del Problema | 13 |
| 1.3 Hipótesis | 14 |
| 1.4 Preguntas de investigación | 14 |
| 1.5 Objetivos | 15 |
| 1.5.1 Objetivo general | 15 |
| 1.5.2 Objetivos particulares | 15 |
| 1.7 Justificación | 15 |
| 1.8 Marco teórico. | 16 |
| 1.10 Marco Conceptual. | 21 |
| Capítulo 2. ESTADO DEL ARTE | 24 |
| Capítulo 3. METODOLOGÍA | 39 |
| 3.1 Métodos de trabajo. | 39 |
| 2.2 Especímenes a utilizar | 42 |
| 3.1 Procedimiento experimental | 46 |
| 3.2 Fabricación del concreto | 48 |
| 3.3 Materiales empleados | 48 |
| 3.4 Obtención de agregados | 50 |
| 3.5 Caracterización de agregados | 53 |
| 3.6 Caracterización de Nanotubos de Carbono Multipared | 64 |
| 3.7 Criterio para el diseño de mezclas | 64 |
| 3.8 Elaboración de concreto | 65 |
| 3.9 Ensayos de concreto en estado fresco | 68 |
| 3.10 Ensayos de concreto en estado endurecido | 70 |
| Capítulo 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 88 |
| 4.1 Caracterización de agregados. | 88 |
| 4.2 Caracterización de nanotubos de carbono multipared. | 91 |

| | |
|--|-----|
| 4.3 Diseño de mezclas método ACI..... | 93 |
| 4.4 Concretos en estado fresco..... | 94 |
| 4.4 Concretos en estado endurecido | 99 |
| 4.5 Índices de durabilidad en los concretos | 112 |
| Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones..... | 124 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS..... | 128 |
| APENDICE..... | 133 |
| Apéndice 1.- Propiedades índices del agregado grueso y agregado fino. | 133 |
| Apéndice 2.- Dosificación de mezclas de concreto. | 136 |
| Apéndice 3.- porosidad densidad y absorción de los concretos. | 142 |
| Apéndice 4.- Resistencia a la compresión..... | 144 |
| Apéndice 5.- Módulo de elasticidad. –..... | 146 |
| Apéndice 6.- Absorción capilar. – | 147 |
| Apéndice 7.- Electromigración de cloruros. - | 159 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|-----|
| Tabla 1. Variables dependientes, independientes y a controlar. | 40 |
| Tabla 2. Conformación de familias. | 41 |
| Tabla 3. Familias de concreto..... | 42 |
| Tabla 4. Especímenes para 0.60 a/c..... | 43 |
| Tabla 5. Especímenes para 0.50 a/c..... | 44 |
| Tabla 6. Especímenes para 0.45 a/c..... | 45 |
| Tabla 7. Composición de los cementos Portland (SCT, 2002). | 49 |
| Tabla 8. Horario y tolerancias de mediciones..... | 80 |
| Tabla 9. Característica física de los agregados. | 90 |
| Tabla 10. Características del agregado fino (Moreno y Solís-Carcaño, 2008)..... | 90 |
| Tabla 11. Características del agregado grueso (Moreno y Solís-Carcaño, 2008)..... | 90 |
| Tabla 12. Composición química nanotubos de carbono multicapa..... | 92 |
| Tabla 13. Dosificación familias de concreto kg/m ³ | 94 |
| Tabla 14. Resultados en concreto fresco. | 95 |
| Tabla 15. Porcentajes de absorción densidad y porosidad de los concretos..... | 99 |
| Tabla 16. Resistencia a compresión de los concretos CPP, CPC c/n y sin nanotubos | 102 |
| Tabla 17. Módulo de elasticidad de concretos. | 108 |
| Tabla 18. Evaluación de durabilidad porosidad efectiva..... | 114 |
| Tabla 19. Sopórtividad obtenidos por ASTM C1585, completando por el método Fagerlund | 115 |
| Tabla 20. Correlación de resultados entre ASTM y NORDTEST NTBuild 492 | 120 |
| Tabla 21. Desempeño de los concretos ensayados..... | 120 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Bosquejo metodológico. | 39 |
| Figura 2. Diseño experimental. | 40 |
| Figura 3. Diseño de experimentos de Box-Behnken para 3 variables (Huerta-García et al., 2014). | 41 |
| Figura 4. Diagrama metodológico. | 46 |
| Figura 5. Presentación cemento Portland puzolanico en saco de 50kg. | 48 |
| Figura 6. Banco 1 Ejido Juan Sarabia y Banco 2 Mercader, ubicados en Localidad Juan Sarabia carretera Chetumal-Escárcega (Google Earth). | 51 |
| Figura 7. Banco 3 El tigre, ubicado a la salida de Chetumal (Google Earth). | 51 |
| Figura 8. Obtención de agregados. | 51 |
| Figura 9. Obtención de material en el banco. | 52 |
| Figura 10. Cuarteo general de agregados. | 52 |
| Figura 11. Cuarteo general de agregado fino. | 53 |
| Figura 13. Proceso de lavado y tamizado de la arena. | 54 |
| Figura 14. Reducción de la muestra por cuarteo. | 54 |
| Figura 15. Saturación de agregado grueso 24 horas. | 55 |
| Figura 16. Proceso para determinar la absorción y gravedad específica. | 55 |
| Figura 17. Determinación del peso del agregado en estado sumergido. | 55 |
| Figura 18. Determinación del peso del agregado después de seco en horno a 110°C durante 24h. | 56 |
| Figura 19. Preparación de la muestra de ensaye. | 57 |
| Figura 20. Prueba provisional de molde de cono, 25 golpes con pinzón. | 57 |
| Figura 21. Agregado fino en estado saturado superficialmente seco SSS. | 57 |
| Figura 22. Muestra para determinar la absorción. | 58 |
| Figura 23. Procedimiento en el ensaye de absorción del agregado fino. | 58 |
| Figura 24. Peso seco de la muestra después de horno 110°C por 24h. | 59 |
| Figura 25. Calibración de recipiente. | 60 |
| Figura 26. Peso volumétrico suelto grava. | 62 |
| Figura 27. Peso volumétrico compacto grava. | 62 |
| Figura 28. Peso volumétrico compacto arena. | 62 |
| Figura 29. Procedimiento de desgaste a la abrasión. | 63 |
| Figura 30. Colado muestras de concreto. | 66 |
| Figura 31. Pesaje NTCM. | 67 |
| Figura 32. Dispersión por medios mecánicos de NTC con agua de mezclado. | 67 |
| Figura 33. Concreto en estado fresco adicionado con NTCM, CPC0.45NTC. | 67 |
| Figura 32. Desmolde y curado de probetas. | 68 |
| Figura 33. Ensayo de revenimiento. | 69 |
| Figura 34. Ensayo peso volumétrico del concreto. | 69 |
| Figura 35. Prueba de contenido de aire. | 70 |
| Figura 36. Pesaje, medición y compresión de especímenes. | 72 |
| Figura 37. Diagrama de obtención de muestras. | 72 |

| | |
|---|-----|
| Figura 38. Toma de muestra para barrido..... | 73 |
| Figura 39. Módulo de elasticidad..... | 75 |
| Figura 40. Procedimiento de muestras sumergidas..... | 76 |
| Figura 41. Ensayos NTBuild 492 y absorción capilar realizados simultáneamente..... | 77 |
| Figura 42. Obtención de rodajas. | 78 |
| Figura 43. Distribución de rodajas para ensayo..... | 78 |
| Figura 44. Determinación de masa. | 81 |
| Figura 45. Ensayos de la norma NT BUILD 492..... | 81 |
| Figura 46. Especificaciones pecera y base..... | 82 |
| Figura 47. Construcción de celda NTBuild 492..... | 82 |
| Figura 48. Despiece de celda..... | 83 |
| Figura 49. Proceso NT BUILD 492..... | 84 |
| Figura 50. Proceso del ajuste en voltaje en la prueba..... | 85 |
| Figura 51. Separación 15mm entre cara expuesta de la muestra y cátodo..... | 85 |
| Figura 52. Ensayo permeabilidad rápida de cloruros NTBuild 492..... | 86 |
| Figura 53. Profundidad de penetración muestra CPC 0.65..... | 87 |
| Figura 54. Granulometría agregado grueso..... | 88 |
| Figura 55. Granulometría agregado fino..... | 89 |
| Figura 56. SEM 10000x, 20000x, 50000x..... | 92 |
| Figura 58. Diferencias visibles..... | 95 |
| Figura 59. Dispersión NTCM..... | 96 |
| Figura 60. Aglomeración NTCM en concreto estado fresco..... | 96 |
| Figura 61. Revenimiento de concreto..... | 97 |
| Figura 62. Peso volumétrico..... | 98 |
| Figura 63. Contenido de aire..... | 98 |
| Figura 64. Grafica de absorción 0.65, 0.5, 0.45..... | 100 |
| Figura 65. Densidad en relaciones agua/cemento 0.65, 0.50, 0.45..... | 101 |
| Figura 66. Porosidad en relaciones agua/cemento 0.65, 0.50, 0.45..... | 101 |
| Figura 67. Resistencia a compresión..... | 103 |
| Figura 68. Ensayo de resistencia a la compresión en concretos con adición NTCM..... | 104 |
| Figura 69. Zona de interfaz pasta de cemento/agregado relación 0.65..... | 105 |
| Figura 70. Zona de interfaz pasta de cemento/agregado relación 0.50..... | 106 |
| Figura 71. Zona de interfaz pasta de cemento/agregado relación 0.45..... | 107 |
| Figura 72. Comportamiento de módulo de elasticidad con diferentes tipos de concreto..... | 108 |
| Figura 73. Esfuerzo deformación 0.65..... | 110 |
| Figura 74. Esfuerzo deformación 0.50..... | 110 |
| Figura 75. Esfuerzo deformación 0.45..... | 111 |
| Figura 76. Grafica modulo elasticidad vs resistencia a compresión..... | 112 |
| Figura 77. Absorción Capilar CPP 0.65..... | 114 |
| Figura 78. Absorción capilar en función de tiempo relación a/c 0.65..... | 116 |
| Figura 79. Absorción capilar en función de tiempo relación a/c 0.50..... | 117 |
| Figura 81. Coeficientes de migración..... | 119 |
| Figura 83. Comparativa concretos con adiciones puzolánicas..... | 122 |
| Figura 84. Comparativas concretos base CPO..... | 123 |

Capítulo 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Antecedentes

El clima severo en la península de Yucatán tiene afectaciones en la microestructura del concreto por la penetración del ion cloruro, que al llegar al acero de refuerzo este pierde su pasividad y se inicia el proceso de corrosión (Real et al., 2014).

En el estado de Quintana Roo la zona costera del Caribe está expuesta ante agentes agresivos que afectan las estructuras de concreto, comprometiendo la duración de las mismas. Los concretos en la región no están alcanzado su vida útil ante las principales dos fuentes de corrosión, la carbonatación y la penetración del ion cloruro, debido a la porosidad de los elementos estructurales, los agregados de alta absorción y a la composición de la pasta de cemento forman parte de la degradación. Estudios previos han señalado al cemento Portland puzolánico como la mejor opción ante ataque de cloruros contra un cemento Portland compuesto (Moreno et al., 2015).

Es por ello la necesidad de investigar diferentes tipos de cementantes con el fin de estudiar cual se desempeña mejor para alargar la vida de un elemento de concreto armado capaz de retardar el ingreso de ion cloruro y de esta manera proteger el acero de refuerzo.

-Problemas de durabilidad en el concreto

La durabilidad en el concreto se ve reflejada en las propiedades de transporte las cuales han sido estudiadas tales como **absorción de agua, permeabilidad al agua, permeabilidad al aire, porosidad y resistividad eléctrica** por las cuales agentes agresivos que ingresan al concreto contribuyen a fenómenos de deterioro como **la carbonatación y el ingreso de cloruros** (Andrade, 2013).

Estos agentes (dióxido de carbono y los iones cloruro) tienen un efecto sinérgico que acelera procesos de degradación del concreto. La predicción de la vida útil de un concreto es difícil de determinar (Correa et al., 2010) ya que depende de las condiciones a la que esté expuesta,

puede haber ciertos agentes que alteren el desempeño del concreto si no se toman en cuenta (Gómez et al., 2015).

La alternativa para reducir al transporte de agentes dañinos a través de la estructura del concreto es el uso del cemento Puzolánico ya que es más compacto e impermeable que el cemento común, impide y reduce el efecto dañino de agentes agresivos (Moreno et al., 2015).

-El ion cloruro como principal agente agresivo para el concreto.

El ion cloruro es transportado a través del concreto mediante; difusión, absorción capilar, transporte por evaporación y presión hidrostática, la difusión es el movimiento de los iones cloruros bajo un gradiente de concentración, modelado matemáticamente por la segunda ley de Fick y es el principal mecanismo por el cual se introducen los iones a través de la estructura del concreto (Stanish y Thomas, 2003).

Se han establecido pruebas aceleradas para predecir la penetración del ion cloruro, estos métodos permiten establecer rangos de difusión en mezclas en cortos periodos de tiempo. **La migración de cloruros a través de muestras es acelerada por la aplicación de voltaje eléctrico forzando los iones a su ingreso.**

Los resultados que se obtienen con la prueba de migración rápida y las pruebas a largo plazo son ligeramente superiores a las obtenidas con la prueba de permeabilidad mediante sistema natural demostrando que la prueba de migración rápida puede aplicar a una gama más amplia de mezclas de concreto (Hamilton, 2007).

-Sustitución parcial del Clinker de cemento Portland.

Las adiciones minerales son compuestos naturales o artificiales que se incorporan al cemento o al concreto con el objeto de mejorar el comportamiento de la pasta de cemento: **escoria granular de alto horno, puzolanas naturales, cenizas volantes, micro sílice y arcillas activas** (Mindiola, 2010).

Ayudan a la disminución del Clinker en una mezcla de cemento, disminuyendo su proceso de producción el cual es de los más contaminantes a nivel mundial durante el proceso de fabricación (O'Reilly et al., 2010).

Las mezclas de concreto con adiciones puzolánicas han demostrado que incrementan su resistencia, siempre y cuando estas adiciones reaccionen con la mezcla (Jain, 2012) complementando el proceso de cristalización, formando productos de calcio hidratados mejor conocido como gel S-C-H, el cual puede seguir desarrollándose por tiempo prolongado (Castellano et al., 2013).

-Nanotecnología en el concreto.

La influencia de los nanotubos de carbono en estructuras de concreto ha llevado a su evaluación del comportamiento mecánico donde diferentes cementantes se han estudiado en las últimas dos décadas y uno de los tipos han sido los nanotubos de carbono con multipared donde se plantean como adiciones las cuales se distribuyen a una escala mucho más fina que las fibras comunes (Musso et al., 2009).

La aplicación de los nanotubos de carbono en estructuras de concreto ha sido muy variada para cuestiones de resistencia, la línea de investigación de la durabilidad aún sigue en desarrollo principalmente se emplean mediante un sistema de monitoreo de la penetración de cloruro en estructuras de concreto reforzado utilizado para la evaluación de puentes a diferentes niveles de exposición (H.-K. Kim, 2015).

En concretos a base de cemento Portland ordinario se presentan dos problemáticas:

1. La dispersión de los nanotubos
2. Interacción interfacial entre los nanotubos de carbono y productos de hidratación del cemento: Los productos de hidratación (C-S-H), tienen tamaño similar o mayor a los nanotubos por lo que pocos nanotubos pueden anclarse por estos productos de hidratación (H. K. Kim et al., 2014).

Diversas adiciones como el humo de sílice y los nanotubos de carbono se han estudiado como parcial sustitución del cemento, donde se pudo observar que la dispersión de los nanotubos de carbono se mejora con el humo de sílice evitando la aglomeración y promoviendo la homogeneidad de la mezcla en el elemento (Nam et al., 2012) debido a su tamaño de partícula la cual se puede mezclar con NTC aglomeradas y NTC separadas en fibras dispersas (H. K. Kim et al., 2014).

Las investigaciones con nanotubos de carbono han ido avanzando en el ámbito de tecnología de concreto, actúan como puentes a través de grietas y huecos, mejorando la deformación de cemento, disminuyendo la porosidad (Li et al., 2005). El principal objetivo de estudio ha sido la reducción de porosidad y la microestructura en diferentes tipos de cementantes como el Cemento Portland, cemento Portland Blanco y Compuestos Portland con ceniza volante han aumentado sus resistencias y se ha visto una buena dispersión durante la mezcla (Nochaiya y Chaipanich, 2011) por lo que su estructura molecular podría tener un buen comportamiento con los elementos que cemento Portland puzolánico (puzolana natural).

1.2 Identificación del Problema

En la Península de Yucatán, México, su geografía rodeada por el océano Atlántico colindando por el Golfo de México en su parte poniente y por el Mar Caribe en el lado oriente, posee como consecuencia la severidad de un clima tropical que afecta mediante un proceso electroquímico natural a las estructuras de concreto armado provocando la corrosión de la armadura de refuerzo, incrementando su área, creando esfuerzos de tensión en el concreto circundante y provocando su desprendimiento afectando seriamente su función estructural.

La principal característica y puntos de estudio del concreto en la península de Yucatán ha sido su composición en mayor grado por su agregado de origen calizo triturado y altamente absorbente en conjunto con el cemento Portland compuesto, puede resultar más susceptibles ante agentes agresivos de la costa (Moreno et al., 2015).

En 2010 un estudio en la Universidad Autónoma de Yucatán, comparó concreto elaborados con Cemento Portland Compuesto y el Cemento Portland Puzolánico con la finalidad de verificar cual presentaba mejores características contra agentes agresivos en zona costera, donde se observó que el cemento Portland Puzolánico proporciona una mayor resistencia a compresión axial y penetración de cloruros que el cemento Portland compuesto (Moreno et al., 2015).

La difusión del ion cloruro incide directamente en la corrosión del acero de refuerzo, en 1993 se monitoreo que los gastos de corrosión se estimaron entre 2% y 4% en términos del PIB, reportando bajas económicas por corrosión en restauración y reconstrucción del 4.9% en México (Rivera, 1993).

En 2006 Estados Unidos de Norteamérica contaba con aproximadamente 575,000 puentes de los cuales 280,000 sufrían de corrosión. Los costos por mantenimiento para estructuras de concreto reforzado en puentes fue en 2006 de aproximadamente de 1,4% a 1,6% del costo del PIB. En el Reino Unido se registraron pérdidas por más de 620 millones de libras esterlinas por problemas de corrosión en los puentes de las grandes autopistas. En México no hay datos precisos que reflejen la enorme cantidad de dinero que se invierte para reparar estructuras dañadas por corrosión (IMT, 2006).

Se estima que un 25% de elementos afectados por corrosión pueden ser evitados mediante el uso de métodos de control existentes. Los iones de cloruro libres al llegar al acero de refuerzo provoca la pérdida de su pasividad y propician la formación de micro celdas de corrosión (Rivera, 1993).

En climas húmedos como en la península de Yucatán las perdidas por corrosión son mayores que en climas secos, la zona más crítica es la región costera de la península, existe una mayor concentración de sales capaces de penetrar y difundirse en las estructuras de concreto (González, 1999).

Los estudios de corrosión en el estado de Quintana Roo se han enfocado al comportamiento y método para la mejora de las propiedades del concreto y acero de refuerzo: protección al acero, productos inhibidores de corrosión, adherencia acero-concreto, simulación de difusión del cloruro en el concreto reforzado, conductividad eléctrica en el mortero, etc. (González, 1999).

1.3 Hipótesis

El concreto fabricado con cemento portland puzolánico y nanotubos de carbono multicapa ofrece mayor resistencia a la penetración de cloruros en comparación a un concreto convencional de cemento portland compuesto.

1.4 Preguntas de investigación

1. ¿Cuáles son los concretos que elaborados con diferentes tipos de cementantes con y sin adición de nanotubos de carbono multipared cumplen con los límites de durabilidad establecidos ante la penetración de cloruros?

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Determinar la resistencia a la penetración de cloruros en concretos fabricados con cemento Portland puzolánico adicionado con nanotubos de carbono.

1.5.2 Objetivos particulares

- Determinar el coeficiente de migración del ion cloruro (velocidad de penetración) para las diferentes mezclas de concreto ensayadas.
- Determinar el perfil de migración para el concreto ante la penetración del ion cloruro para las diferentes mezclas de concreto ensayadas.
- Diferenciar el efecto de la penetración de cloruros entre los concretos elaborados con los diferentes tipos de cementos y adiciones.

1.7 Justificación

El estudio del ion cloruro es fundamental para la durabilidad del concreto ya que es la principal causa de corrosión en zona costera, por lo que es necesario la búsqueda de elementos que sean capaces de reforzar el concreto de tal manera que mejoren su microestructura y prolonguen la vida útil del elemento; dicha mejora puede encontrarse en la interacción de los nanotubos de carbono con los componentes de un cemento Portland puzolánico.

Mediante la implementación de un método acelerado de penetración de cloruros se podrá determinar un perfil de difusión el cual servirá de apoyo en el diseño de mezclas con el fin de soportar el ambiente agresivo marino, alargando el proceso de corrosión de la varilla y sus consecuencias que tiene como el debilitamiento de la estructura, agrietamiento o el desprendimiento del concreto circundante, disminuyendo gastos de mantenimiento y eliminando gastos de reconstrucción a los que están sometidos los elementos estructurales actuales elaborados con cemento convencional (CPC).

Existe debate entre autores sobre la aplicación de métodos acelerados de penetración de cloruros ya que se argumenta que los modelos de ingreso no tienen solución analítica exacta ya que las condiciones de contorno y limite no se dan en la realidad, tanto la concentración superficial como el coeficiente de difusión no son constantes, se consideran difusión cuando

la absorción es frecuente en medios marinos, su falta de calibración e incertidumbre hacen complicado establecer propiedades de mezclas que aseguren durabilidades a largo plazo.

Sin embargo es necesario avanzar en la introducción de estos modelos e indicadores de durabilidad, aún falta conocimiento de cómo los ensayos a corto plazo reflejan la realidad a lo de a largo plazo, los requisitos de durabilidad en grandes infraestructuras se deben definir con precisión y tolerancias delimitadas, por lo que se debe de calibrar validar y complementar la información con el método de exposición directa que al colocarse a la intemperie podrán arrojar datos que serán comparados con los obtenidos mediante el método de permeabilidad rápida de cloruros, observando la proximidad de los resultados.

La implementación de un método de ensayo de permeabilidad rápida de cloruro mediante el mecanismo de migración reduce tiempo y costos de implementación, para determinar el coeficiente de difusión y la concentración de cloruros en concreto Portland puzolánico.

1.8 Marco teórico.

Estructura del concreto

Constituida por la pasta de cemento, el agregado y la zona de transición entre la pasta y el agregado, debido a estos tres elementos resulta difícil predecir su comportamiento futuro, ya que pueden llegar a evolucionar con el tiempo, la humedad y la temperatura.

-Macroestructura: Se relaciona con porosidad de la pasta de cemento endurecida, conexión entre poros, distribución de tamaños, capacidad para el transporte de fluidos, relaciones y equilibrios en productos de hidratación.

-Microestructura: Define el comportamiento mecánico del concreto, dimensiona transportes de fluidos, funcionalidad, Impermeabilidad, estanquidad del concreto (O'Reilly, 2008).

Porosidad de la pasta de cemento.

El cemento en contacto con el agua reacciona químicamente produciendo componentes hidratados estableciendo determinada microestructura manifestándose por el crecimiento, ubicación y relación de los cristales que se forman, los poros de esta microestructura se denominan poros de gel.

Los silicatos tricálcicos hidratados S-C-H es formado por una masa sin estructura cristalina desarrollada y constituyen del 50 al 60% del volumen de solidos de la pasta de cemento. El hidróxido de calcio CH (Portlandita) se cristaliza en cristales hexagonales constituyendo 20 a 25% del volumen de la pasta de cemento (O'Reilly, 2008).

Los huecos y espacios originados como consecuencia son:

-Porosidad de gel: Espacio entre las láminas que constituyen los silicatos tricálcicos hidratados.

-Porosidad capilar: Espacios no llenados por los componentes solidos de la pasta de cemento.

-Huecos de aire: Volúmenes de aire con forma regular y próxima a la esfera (por consecuencia de aditivos que incrementan el porcentaje de aire).

-Poros generados por el aire atrapado: Huecos de aire producidos por deficiencia de colocación y compactación de la masa de concreto (O'Reilly, 2008).

Microporos: menores a 10nm

Mesoporos: Entre 10 y 50nm

Macroporos: 50nm

Mecanismos de transporte a través de la microestructura del concreto

La penetración de sustancias en el concreto se produce a través de la microestructura porosa de la pasta de cemento hidratada sumada a micro fisuras que aparecen en la misma, las sustancias de transporte pueden ser iones en disolución acuosa, agua o gases (O'Reilly, 2008).

Mecanismos de transporte según factores:

-Tipo de sustancia (ion cloruro, anhídrido carbónico etc.)

-Concentración de la sustancia

-Condiciones ambientales que rodean el elemento de concreto (humedad relativa, temperatura etc.)

-La estructura porosa del concreto (distribución de tamaño, porosidad total, radio de los poros medios, interconexión).

Tipos de mecanismo de transporte

El transporte de sustancias al interior del concreto es consecuencia de la suma o coexistencia de procesos individuales:

-Permeabilidad: Flujo de líquidos o gases a través de la masa de un material, el flujo dependerá de la viscosidad del fluido y características de su microestructura dicho flujo será lamina o turbulento.

-Succión capilar: en la red porosa del concreto es una fuerza dada por la ley de Darcy modificada para el flujo de agua en un medio semisaturado (O'Reilly, 2008).

La succión capilar provoca la entrada del agua en estado líquido desde el exterior, contacto entre la superficie del concreto y cualquier cause de agua si dicha agua lleva disuelta sales indeseables, provocan reacciones destructivas en su estructura.

-Difusión: Transferencia de moléculas libres o iones en solución acuosa de los poros generada por gradiente de concentración, su velocidad de transferencia de masa a través de la unidad de área cuando el proceso se ha estabilizado es definido por la primera ley de Fick (O'Reilly, 2008).

$$F = -D \cdot \frac{d_c}{d_x}$$

F=flujo de masa g/m² x S

D= coeficiente de difusión m²/s

C= concentración g/m³

X= distancia m

Ley de Fick: Describe los diversos casos de difusión de materia o energía en un medio en el que inicialmente no existe equilibrio químico o térmico, al existir gradientes de concentración de una sustancia o temperatura se produce un flujo de partículas o de calor que tiende a homogeneizar la disolución y uniformizar la concentración o la temperatura, el flujo homogeneizador es una consecuencia estadística del movimiento de partículas que da lugar al segundo principio de termodinámica, los procesos físicos de difusión pueden ser vistos como procesos físicos o termodinámicos.

-Magnitud de gradiente (mayor gradiente mayor difusión)

-Superficie de difusión

El paso aleatorio de moléculas se lleva a cabo desde regiones con mayor concentración hacia las regiones de menor concentración (O'Reilly, 2008).

Migración

Transporte de iones mediante un electrolito como consecuencia de la acción de su campo eléctrico, genera la aparición de diferencias entre las concentraciones de iones existentes en una solución homogénea, apareciendo difusiones en el sentido de los gradientes de concentración (O'Reilly, 2008).

Transporte de fluidos en el concreto

El transporte de agua que puede llevar iones agresivos se da principalmente por la pasta de cemento hidratado, la permeabilidad es el flujo a través de un medio poroso movimiento total de fluidos hacia adentro a través del concreto (Neville, 1999).

Flujo, difusión y absorción

Lo que corresponde a la facilidad de movimiento de los fluidos a través del concreto se llama permeabilidad, ya que es el flujo sujeto a un diferencial de presión. La difusión es el proceso en el cual el fluido se mueve sujeto a un diferencial en concentración, la absorción es el resultado del movimiento capilar en los poros del concreto que están abiertos al medio ambiente ocurre por acción capilar en concreto parcialmente seco.

Cuando el transporte de un agente a través del concreto es el resultado de un gradiente de concentración y no de un diferencial de presión, ocurre una difusión la cual ocurre solo a través de los poros. **La difusión a través del agua es cuatro veces más lenta que a través del aire**, el coeficiente de difusión cambia por la edad y tiempo de hidratación del cemento continúa.

La difusión iónica es más efectiva cuando los poros de la pasta de cemento endurecido están saturados. La difusión es menor a relaciones agua cemento pequeños, pero la influencia de la relación agua cemento sobre la difusión es mucho menor que sobre la permeabilidad (O'Reilly, 2008).

-Ataque de cloruros: La acción principal es la corrosión del acero de refuerzo y es solo como consecuencia de esta corrosión que se daña el concreto circundante, los cloruros pueden estar presentes en la mezcla desde la incorporación de agregados contaminados, de agua de mar, agua salobre, o aditivos que contengan cloruros, surge principalmente cuando los iones ingresan desde el exterior.

Los cloruros tienden a ingresar a una profundidad considerable, a menos que este expuesto a oxígeno no habrá ninguna corrosión, la condición menos favorable es la exposición a humedad con agua salina y a su secado en un ciclo constante, donde el agua es depositada en los poros capilares del concreto y por el ambiente al agua pura se evapora dejando residuos salinos, que continuando el ciclo van penetrando más en la estructura del concreto, depende mucho de la influencia del sol, el viento y el uso de la estructura (Neville, 1999).

Procesos de agresión químicas:

- Disolución de compuestos hidratados de cemento (cal).
- Formación de sales solubles (agua de mar).
- Formación de cristales u otro compuesto poco solubles, con aumento de volumen y creación de tensión interna.
- Formación de carbonatos que disminuye su PH a su vez disminuyendo la protección a las armaduras de acero haciéndolos más vulnerables generando óxido de hierro por la corrosión y un aumento de volumen.

-Aparición de manchas, agrietamientos y fisuración del recubrimiento de acero de refuerzo.

-Como consecuencia ocurre un agotamiento estructural.

Estos casos conducen a la pérdida de su durabilidad utilidad o desplome en caso extremo, el deterioro de estructuras de concreto armado debido a la corrosión del acero de refuerzo ocurre en ciertos tipos de estructuras expuestas en la costa, a un ambiente atmosférico marino o de agua de mar.

El ion cloruro se considera como el factor importante en la influencia de la corrosión de concreto armado.

1.10 Marco Conceptual.

Componentes de concreto.

Cemento Portland: material con propiedades tanto adhesivas como cohesivas, las cuales dan la capacidad de aglutinar fragmentos minerales para formar un todo compacto, que al mezclarse con el agua tiene la propiedad de fraguar o endurecer por esta reacción se denominan concretos hidráulicos, es la mezcla de varios compuestos que forman reacciones químicas dentro del horno, su composición química es a base de C3S (Silicato tricálcico), C2S (Silicato dicálcico), C3A (Aluminato tricálcico), C4AF (Ferro aluminato tetracálcico) (Neville, 1999).

Estructura del cemento hidratado: La pasta de cemento fresco es una red de partículas de cemento en agua, una vez fraguada su volumen permanece constante, la pasta endurecida consta de hidratos no cristalizados denominados como gel de óxido de calcio estos vacíos se denominan poros capilares y dentro existen vacíos más pequeños denominados poros de gel (Neville, 1999).

Resistencia del cemento: La resistencia mecánica del cemento endurecido es la propiedad del material que resulta más obvia en cuanto a los requisitos para usos estructurales, la resistencia de un mortero o concreto depende de la cohesión entre partículas (Neville, 1999).

Materiales cementantes: Los tipos de concreto son CPO (Cemento Portland Ordinario), CPC (Cemento Portland Compuesto), CPP (Cemento Portland Puzolánico) CPEG (Cemento

Portland con Escoria Granulada de Alto Horno), CPS (Cemento Portland con Humo de Sílice), CEG (Cemento con Escoria Granulada de Alto Horno) (SCT, 2012).

Agregado: material granular como la arena, grava, roca triturada, escoria de alto horno o concreto hidráulico triturado que se utiliza en un medio cementante hidráulico para producir mortero y concreto, se dividen en finos y en gruesos, se constituyen de partículas limpias, duras, resistentes y durables, que desarrollan buena adherencia con la pasta de cemento. Naturales, semitriturados o triturados (Neville, 1999).

Puzolana: Material natural o artificial que contiene sílice en forma reactiva, material silíceo aluminoso el cual por sí mismo posee poco o ningún valor cementante pero en forma finamente dividida y en presencia de humedad reacciona químicamente con hidróxido de calcio formando compuestos de propiedades cementantes, los materiales puzolánicos más comunes son: ceniza volcánica, puzolana original, pumicita, pizarras, y pedernales opalinos, tierra calcinada y arcilla quemada (Neville, 1999).

Cementos puzolánicos: Las puzolanas al ser un material hidráulico latente se usan siempre en conjunción con cemento Portland ya que se pueden entre moler o mezclar, el cemento puzolánico es un cemento de bajo calor y tiene cierta resistencia al ataque de sulfatos y al ataque por ácidos débiles (Neville, 1999).

Propiedades del concreto en estado fresco y endurecido

Permeabilidad: La velocidad con la que el fluido atraviesa el material depende de tres factores básicos:

- La **porosidad** del material.
- La **densidad** del fluido considerado.
- La **presión** a que está sometido el fluido.

Para ser permeable, un material debe ser poroso, es decir, debe contener espacios vacíos o poros que le permitan absorber fluido. A su vez, tales espacios deben estar interconectados para que el fluido disponga de caminos para pasar a través del material.

Sangrado: Forma de segregación en la cual parte del agua de la mezcla tiende a subir a la parte superior de la mezcla acabada de colar, el sangrado disminuye al aumentar la finura del cemento puesto que las partículas más finas se hidratan más temprano y su rapidez de sedimentación es inferior (Neville, 1999).

Curado del concreto: Son procedimientos utilizados para promover la hidratación del cemento, el curado se detiene antes de la hidratación máxima posible, para que continúe la hidratación tiene que contenerse la humedad relativa dentro del concreto a un mínimo del 80% (Neville, 1999).

Durabilidad del concreto: Es la capacidad del concreto de soportar el proceso de deterioro al cual se puede esperar que vaya a estar expuesto, no significa por tiempo indefinido y se debe de tomar en cuenta junto con la resistencia para el diseño de la mezcla (Neville, 1999).

Efectos del agua de mar sobre el concreto: El concreto puede estar expuesto a varias acciones físicas y químicas, incluyendo ataque químico, corrosión del acero de refuerzo inducida por cloruro, ataque de congelación y deshielo, exposición a la sal y abrasión por arena en suspensión por hielo, estas formas de ataque dependen de la localización del concreto con respecto al nivel del mar, y es debido a la cantidad de sal disuelta y CO₂ presente en su composición, las áreas costeras de poca profundidad en clima cálido donde la evaporación es alta pueden ser muy saladas.

La alternancia de mojado y secado representa condiciones más severas ya que puede ocurrir una acumulación de sales dentro del concreto, como consecuencia del ingreso de agua de mar seguido por evaporación de agua y sales residuales (Neville, 1999).

Exposición a la intemperie con sal: Cuando el concreto se somete a mojado y curado de agua de mar, las sales se dejan en el concreto como residuos en forma de cristales principalmente sulfatos, estos cristales se rehidratan y ejercen una fuerza expansiva en la pasta de cemento endurecido, dicha exposición ocurre cuando la temperatura es alta y la insolación es fuerte, las superficies horizontales o inclinadas están propensas a la exposición a la intemperie con sal (Neville, 1999).

Capítulo 2. ESTADO DEL ARTE.

Durabilidad de concreto

La tecnología del concreto debe asegurar la durabilidad del mismo, aspectos como resistencia, módulo elasticidad, estabilidad dimensional, compacidad, porosidad y permeabilidad debe de asegurar su vida útil. Su estructura heterogénea y compleja es difícil determinar su comportamiento futuro, ya que no se puede mantener estable, factores como su exposición afectan su composición, la principal patología que puede afectar su comportamiento es la implementación, en comparación con la planeación, materiales, ejecución y el proyecto (O'Reilly et al., 2010).

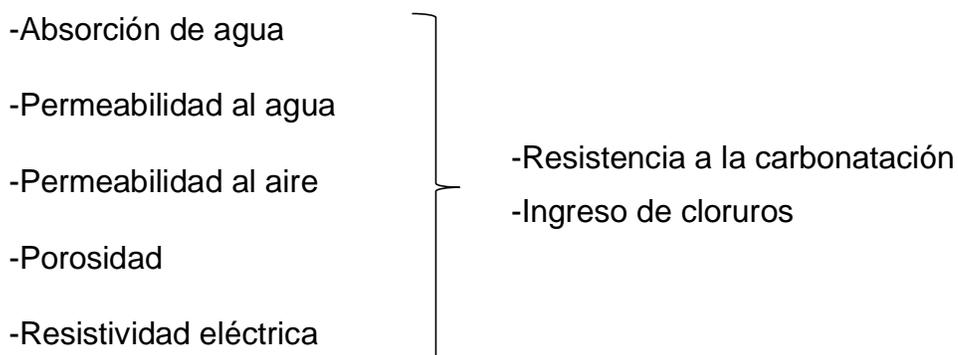
En las zonas costeras los principales agentes agresores son cloruros, sulfatos y humedad que penetran a través de los poros del concreto provocando daños directamente al concreto por corrosión del acero de refuerzo y como consecuencia la disminución de la resistencia de los elementos por pérdida de área de acero y posteriormente el agrietamiento y desprendimiento del concreto. La durabilidad del concreto es su capacidad para resistir a la acción del tiempo, los ataques químicos, la abrasión o cualquier otro proceso de deterioro, el concreto durable debe retener su forma original, su calidad y sus condiciones de servicio, cuando se exponga a su medio ambiente. Como resultado de las interacciones ambientales, la microestructura y consecuentemente las propiedades de los materiales, cambian con el tiempo su calidad y condiciones de servicio (Solís et al., 2005).

El ambiente influye directamente en la mayoría de las fases del concreto desde su estado fresco hasta su estado endurecido, en la península de Yucatán estos están sometidos a curados húmedos y a un ambiente cálido sub húmedo, estudios han comprobado que el hecho de mantener húmedo el concreto durante las primeras semanas de edad permite que la mayor parte del cemento se transforme en productos hidratados, el estudio contempla el proceso de curado húmedo en ambiente cálido - subhúmedo, observando una variabilidad pequeña en la resistencia del concreto cuando es curado al ambiente durante los doce meses de un año, las principales diferencias se tuvieron entre los concretos curados en invierno y primavera con mayores resistencias de aquellos que se curaron en invierno, se utilizó cemento Portland compuesto de fabricación mexicana, agregado triturado de piedra caliza y

dos tipos de curado, exposición al medio ambiente-intemperie bajo sombra y exposición a curado húmedo por inmersión (Solís et al., 2011).

Para determinar los diferentes agentes agresivos en diferentes tipos de atmosferas urbanas en Colombia se expusieron probetas a dos tipos de intemperie, una en ambiente costero y otro en el centro del país produciéndose corrosión en el acero de refuerzo, la velocidad de corrosión más alta se dio en Barranquilla conteniendo altas concentraciones de iones de cloruro en el aire, en Bogotá, la principal fuente de deterioro en la barra de refuerzo fue la carbonatación, se vio un aumento de impedancia debido a la hidratación del mortero, las muestras eran a base de Cemento tipo I Portland, arena estándar y acero estructural, después de curado se evaluaron en diferentes entornos urbanos cada 4 meses durante un año (Correa et al., 2010).

Para el diseño de un concreto durable **actualmente** se omite en bastantes casos el valor del límite de los cloruros para los cálculos, a pesar de que los requisitos actuales de las grandes obras de ingeniería es la durabilidad del concreto. La estimación de una vida útil de la armadura se determina por requisitos de normas y códigos y se utilizan métodos avanzados basados en modelos de predicción (calculan el tiempo que tarda el agente agresivo a la armadura), los modelos de ingreso de cloruros son basados en la Ley de Fick en estado no estacionario, los modelos que más se ajustan son los que logran una concentración superficial más correcta. En el concreto se tienen ciertas propiedades de transporte las cuales promueven el ingreso de agentes agresivos a su estructura:



Para estudios de permeabilidad de iones cloruros es necesario la simulación del proceso electroquímico natural que se da entre la estructura y la zona costera es por ello que se emplean los métodos de campos eléctricos para acelerar la entrada de cloruros, el método

acelerado determina el coeficiente de difusión, contenido crítico de cloruros y velocidad de corrosión (Andrade, 2013).

Existen diferentes métodos de permeabilidad rápida de cloruros que utilizan el mecanismo de migración forzando el ingreso del ion cloruro mediante la aplicación de corriente eléctrica (NT BUILD 492), determina el coeficiente de migración de cloruros en estado no estacionario, el cual es una unidad de medida de la resistencia del material a la penetración de cloruro.

Cabe aclarar que el proceso de migración y difusión son diferentes, la migración se da cuando el movimiento de iones es bajo la acción de un campo eléctrico externo, caso similar en la difusión solo que el movimiento de moléculas o iones se da mediante el cambio de un gradiente de concentración de una zona alta de concentración a una zona baja.

Penetración del Ion cloruro en el concreto.

En Turquía se estudió los diferentes tipos de cemento escoria granular de alto horno, alta resistencia a sulfatos, cemento Portland mezclado con cenizas volantes y cemento portland ordinario mediante ensayos de rápida penetración de ion cloruro de acuerdo a la norma ASTM C1202.

Los cementos a base de escoria granular de alto horno mostraron mayor resistencia contra la penetración de cloruros, caso contrario que el cemento Portland ordinario y los resistentes a sulfatos. La difusión del ion cloruro en el concreto expuesto se redujo al sustituir el cemento Portland ordinario por otros aditivos minerales (materiales puzolánicos) sin embargo los concretos con cemento resistente a sulfatos tuvieron permeabilidad al cloruro similar a la de un cemento Portland Ordinario, la permeabilidad rápida de cloruro de los concretos disminuyó con el aumento de la clase resistente del concreto, el concreto a base de escoria granular al poseer una microestructura más densa, la reacción puzolánica disminuye los poros capilares reduciendo el transporte de cloruros.

El cemento de escoria es bueno ante la permeabilidad de cloruros, no refleja lo mismo en la absorción de agua y capilaridad por lo que la permeabilidad de cloruros se relaciona más con el tamaño del poro y no con la porosidad total (Yildirim et al., 2011).

El principio de la migración es cuantificar la difusividad de cloruro en el concreto en solución líquida saturada mediante la correlación del coeficiente de difusión con parámetros electroquímicos. Las ventajas importantes de las pruebas son su sencillo procedimiento, corta duración y buena repetitividad de resultados (Spiesz et al., 2012).

Los ensayos de penetración rápida de cloruros han servido para predecir el comportamiento de una estructura de concreto ante agentes agresivos, determinando los perfiles de difusión que ayudan a la protección del acero de refuerzo, sin embargo estudios en noruega han comprobado que al someter dichas probetas a estos métodos estas mismas han influenciado los resultados, la tensión aplicada ha modificado el coeficiente de migración de cloruros dichos coeficientes calculadas a partir de dos modelos de transporte son relativamente constantes, sin embargo la aplicación de campo eléctrico cambia propiedades de morteros aumentando resistencia de las muestras, masa (aumenta) y es proporcional a la penetración de cloruro, el pH de la solución catódica aumenta durante la prueba de migración cambiando su proporción química.

El correcto diseño de concreto debe considerar cantidad (espesor) como calidad (permeabilidad del cloruro), métodos de ensayo acelerados han ido en aumento por corto periodo de prueba y sencillez, Stanish demostró que la profundidad de penetración de cloruros depende de una función lineal de la aplicación de voltaje y la duración de la prueba.

Sin embargo las recomendaciones para las condiciones de pruebas dadas en NT Build 492 se basan en la experiencia única con mezclas de CPO dejando la posibilidad de estudiar el comportamiento con otro tipo de cementante (Spiesz y Brouwers, 2012).

El transporte de iones cloruro incluye los mecanismos de la difusión debido a gradiente de concentración, difusión debido a presión y de aspiración bajo el gradiente de humedad. Diversos modelos de predicción alternos han sido analizados simulando el entorno de marea y diferentes niveles de carga de flexión cíclica, el proceso de transporte de iones cloruros en el concreto se ha basado en la segunda ley de Fick, al establecer un modelo de transporte de ion cloruro en el concreto bajo dos cargas y ciclos de secado y humedecido en cemento Portland ordinario y exponerlos completamente sumergidos y a ciclo de humedecido y secado por 1, 2 y 3 meses, al determinar el contenido de ion cloruro en el concreto.

El ciclo de secado-húmedo es la condición más desfavorable para la estructura de concreto armado ya que acelera la penetración de cloruro considerablemente, en investigaciones pasadas se ha encontrado que la capacidad de penetración de cloruros puede verse afectada si el elemento se encuentra en servicio de carga ya que estos funcionan a través de micro o macro-grietas, por lo que en la actualidad los concretos han sido diseñados con significadas cantidades incorporadas de cementantes suplementarios (escoria de alto horno, cenizas volantes y humo de sílice), para estudiar su influencia en el proceso de penetración de cloruro en concretos sometidos a estas condiciones (Wu et al., 2016).

Las estructuras de concreto armado experimentan acciones de deterioro simultaneas, como puede ser el ion cloruro y la carbonatación, donde la carbonatación tiene un efecto menor en la difusión del ion cloruro en un cemento Portland ordinario pero aumenta la difusividad de cloruro con escoria de alto horno, la adición de cenizas volantes puede reducir el contenido de cloruro en carbonatación acelerada.

La humedad influye en la profundidad y se limita a la superficie de exposición, el cloruro concentrado puede ser transportado aceleradamente hacia el interior por succión capilar durante el periodo de humectación posterior, la presencia de las adiciones puede disminuir el contenido de portlandita en cementos puzolánicos por lo que las hacen menor resistente químicamente, la acumulación de cloruro libre en la superficie del concreto se debe a la acción de secado-humedecimiento, el mayor contenido de cloruros se localiza en las regiones entre superficie expuesta y centro. Se muestra una acumulación de cloruro libre en la superficie expuesta de concretos con adiciones debido a su estructura mas densa en poros (Ye et al., 2016).

La fisuración del concreto por lo general es un fenómeno inevitable en estructuras de concreto armado y tiene un efecto significativo en la difusión de cloruro y del deterioro de las estructuras. Sin embargo, las grietas reales tienen características complicadas, y los mecanismos en los que influyen en la penetración de cloruros aún no han sido bien aclarado. La difusión de cloruro en el concreto depende en gran medida de la densidad de grietas y además de la anchura. En particular, la tortuosidad de la grieta es un factor crítico que influye en la penetración de cloruros cuando el ancho de la grieta fluctúa desde los 150 a 370 micras. Teniendo en cuenta la tortuosidad de grietas y orientación, se proponen el

ancho de fisura efectiva como la densidad de fisuras en correlación con la difusividad cloruro de concreto agrietado (Wang et al., 2016).

Cementante puzolánico.

La industria del cemento ha sido considerada de las más contaminantes por lo que se ha optado por la búsqueda de adiciones que contribuyan a reducir su uso y que permitan la elaboración de concretos de altas resistencias, la sustitución parcial del Clinker con adiciones al ser añadidas a morteros y concretos, mejoran su resistencia mecánica como su durabilidad, dentro de las adiciones se encuentran las arcillas, se estudiaron 2 tipos de arcillas calcinadas (suelo arcilloso y suelo sedimentario).

La adición de arcillas calcinadas como sustitución del cemento Portland favorece el proceso de hidratación del cemento, provocando fases hidratadas más estables. El efecto de uso de puzolanas sobre la durabilidad del concreto fue evaluado a partir de comparar los resultados de absorción de agua. Los resultados demostraron gran potencialidad de los suelos arcillosos, incluso de bajo grado de pureza (Castillo, 2011).

En México se ha estudiado la microestructura y propiedades mecánicas de cementos compuestos al igual que la reactividad de las adiciones puzolánicas e hidráulicas analizando diferentes cementantes (Cemento Portland ordinario, escoria granular de alto horno, sílice geométrica y ceniza volante) de los cuales los cementos sustituidos con escoria granular de alto horno lograron mejorar sus propiedades mecánicas con altos niveles de sustitución, el uso de sílice demostró evolución favorable en productos de hidratación, obteniendo una reacción más compacta y mejorando la microestructura de los cementos compuestos, promueve mejores propiedades físicas y químicas de esta manera el uso de materiales puzolánicos e hidráulicos, en los cementos produce un aumento de las propiedades mecánicas de los sistemas así como en reacciones de hidratación mejorando su microestructura mediante la reducción de porosidad (Gómez-Zamorano et al., 2015).

En Argelia la preocupación por la durabilidad del concreto ante agentes agresivos en este caso ataque de sulfatos ha dado pauta a estudios con concretos puzolánicos en donde se comprobó que la adición de puzolana ayuda a la ganancia de resistencia a la compresión, algunas muestras fueron sometidas a solución agresiva donde la resistencia disminuyó sin

embargo el uso de puzolana natural volcánica en sustitución del 5% en peso de cemento en concreto de alto rendimiento resultó positivo para la duración para un curado con entorno sulfatito, la puzolana modifica la microestructura del concreto, se vio un efecto relleno respecto a la porosidad, al paso del tiempo resulta mejor mediante la formación de gel C-S-H, la adición mineral mejoró sus propiedades respecto al control (Merida y Kharchi, 2015).

En Chile se evaluó el efecto de la puzolana natural en la porosidad y la conectividad de poros a través del tiempo, se estudió la permeabilidad de cloruros mediante la prueba rápida de cloruros ASTM 1202 se observó decrecimiento en la interconectividad de poros que ocurre a medida que las puzolanas se hidratan, el cemento Portland con Puzolana al 33% presentó mayor reducción a la permeabilidad de iones cloruros, el efecto de la puzolana natural es mucho más significativo en la reducción de permeabilidad que en el aumento de resistencia (López y Castro, 2010).

Se utilizaron 3 tipos de cemento, cemento Portland tipo I, cemento Portland mezclado con 14% de peso en puzolanas naturales y un cemento Portland mezclado con un 33% de peso en puzolanas. El cemento puro presentó hidratación más rápida que el cemento con puzolana en el primero ensayo a 28 días y en el segundo ensayo a 84 días (López y Castro, 2010).

A medida que la industria del concreto aumenta los cambios climáticos también a consecuencia de estos, principalmente por el CO₂, liberado durante la producción del cemento Portland, se mostraron informes sobre propiedades, durabilidad y características así como comportamiento en el alto volumen de cenizas volantes, las puzolanas disponibles finamente molidas pueden ser evaluados como alternativa de materiales puzolánicos para la fabricación de alto volumen de puzolana (Uzal, 2013).

Las adiciones en el concreto se han estudiado con el interés de mejorar su durabilidad en ambientes extremos, en Chile se demostró que la temperatura tiene efecto en el concreto ya que puede variar su cantidad de agua de amasado en el concreto (a mayor temperatura mayor cantidad de agua para trabajabilidad), varía en la resistencia con la temperatura de curado (a mayor temperatura se beneficia a temprana edad pero es perjudicial a los 28 días). En los cementos con adiciones, el efecto de la temperatura de curado muestra que la máxima

resistencia se obtiene a mayores temperaturas de curado, pero para concretos en clima cálido es indispensable colocarlo a menor temperatura posible y mantenerlo durante su primer tiempo de vida, para concretos en tiempo frío hay que elevar la temperatura se determinó su comportamiento a temperaturas máximas y mínimas de Chile (30°C y 5°C), tomando en cuenta 20°C como temperatura de referencia y se evaluaron el efecto de su magnitud y el tiempo de curado se confeccionaron muestras de CPO y CPP se elaboraron probetas, se guardaron 3 días y se sometieron a la cámara de climatización, se curaron y se llevaron a su ensayo (Videla et al., 2012).

El estudio de diferentes tipos de cementantes ha logrado mostrar las diversas características entre los diferentes tipos de cementantes como ejemplo se tiene el fraguado del cemento CPO es más rápido que el CPP debido al contenido mayor de agua en el CPP, sin embargo ambos cumplen de acuerdo a la normativa en su etapa de fraguado, el CPP es más fino que el CPO por lo que los cementos más finos aumentan su reacción con los agregados sin embargo presentan mayor sangrado, es importante la caracterización de los agregados gruesos y finos, ya que pueden afectar en la segregación de la mezcla, la calidad de concreto depende en gran medida de la pasta de cemento el uso de menor cantidad de agua de mezclado resulta en mezclas más rígidas de esta manera entre menor sea la porosidad de la pasta de cemento más resistente será el concreto (Mindiola, 2010).

Como se ha comprobado en estudios previos la puzolana natural y las cenizas volantes disminuyen la temperatura máxima de la mezcla, adiciones como el humo de sílice provocan que la temperatura sea similar a la de un cemento normal Portland ordinario, a medida que la relación agua cemento aumenta la generación de calor se comporta proporcionalmente y aumenta pero con el uso de la sustitución de puzolana natural disminuye el calor de hidratación al igual que las cenizas volantes aunque el humo de sílice no reduce sustancialmente la generación de calor mejora la resistencia inicial, pero con los resultados obtenidos se llega a la conclusión que las cenizas volantes resulta el mejor material puzolánico ya que reduce la temperatura máxima sin reducir la resistencia a la compresión, el estudio se basó con la sustitución del 15 y 30% de puzolana natural y el 15% y 25% de cenizas volantes, el humo de sílice se sustituyó por un 55.8% y 11% (Nili y Salehi, 2010).

Nanotubos de carbono como adición a cementantes.

La nanotecnología ha podido conocer las caracterizaciones de determinados materiales a su nivel más pequeño, esto ayuda a la mejora y sustitución del material tratando de potencializar sus características. La manipulación de moléculas a una escala nano en su forma física y química permiten la mejora del material con características de durabilidad y disponibilidad de masas obteniendo mayores beneficios, el uso de nanotecnología favorece al medio mediante el mejoramiento de tecnologías, el objetivo de la nanotecnología es que por manipulación molecular potencialice la durabilidad y disponibilidad del material (Muciño, 2009).

La influencia de los nanotubos de carbono en estructuras de concreto ha llevado a su evaluación del comportamiento mecánico, diferentes cementantes se han estudiado en las últimas dos décadas y uno de los tipos han sido los nanotubos de carbono con multipared un estudio se encargó de preparar compuestos de cemento de 0.5% de peso en nanotubos de carbón de pared múltiple a la mezcla de concreto a base de cemento Portland ordinario, donde se observó a un nivel nano su comportamiento observando que los nanotubos de carbono se distribuyen a una escala mucho más fina que las fibras comunes, de esta manera dan como resultado un puenteo y gran propagación dentro de los compuestos (Musso et al., 2009).

La aplicación de los nanotubos de carbono en estructuras de concreto ha sido muy variada para cuestiones de resistencia, dentro de durabilidad se ha propuesto un compuesto a base de nanotubos de carbono y cemento con el fin de monitorear la penetración de cloruro en estructuras de concreto reforzado dicho método no es destructivo, identifica la conductividad del agua con la de la mezcla de cementos con nanotubos, empleo de cemento tipo I y humo de sílice aplicación de nanotubos de paredes múltiples nanotubos del 0.3% y 0.6%, tomando en cuenta la conductividad de los nanotubos de carbono en el concreto se puede determinar la cantidad de cloruros que han penetrado en las muestras, este método se ha utilizado para la evaluación de puentes y se observó que en un mayor contenido de nanotubos de carbono el aumento de la conductividad de las muestras era mínimas mientras que en las muestras saturadas (nivel sumergido de la estructura) no lo eran (H.-K. Kim, 2015).

Adiciones como el humo de sílice y los nanotubos de carbono se han estudiado como parcial sustitución del cemento, el humo de sílice se seleccionó en un esfuerzo de dispersar los nanotubos de carbono ya que ha sido un obstáculo para aprovechar sus propiedades, en

este caso probar el blindaje es decir la interferencia electromagnética eficaz de un material cementante con Humo de sílice, para él la experimentación se utilizó cemento tipo I, adición de humo de sílice de 0%, 10%, 20% y 30% en peso, y nanotubos de 0% peso, 0.3%, 0.6% y 1% tras pruebas sometidas a su microestructura se pudo observar que la dispersión de los nanotubos de carbono fue mejorada con la adición del humo de sílice evitando la aglomeración y promoviendo la homogeneidad de la mezcla en el elemento (Nam et al., 2012).

La principal adición puzolánica que ha sido estudiada es la del humo de sílice con proporciones pequeñas en porcentaje de nanotubos de carbono, estudiando sus propiedades mecánicas y eléctricas de los materiales compuestos de cemento mediante la incorporación de humo de sílice, se observó su morfología y su microestructura con diferentes compuestos se cemento humo de sílice y nanotubos de carbono, podría producir la mejora de las propiedades mecánicas y eléctricas de los materiales mientras que en adiciones sin humo de sílice hubo efecto insignificante sobre dichas propiedades.

Se presentan dos problemáticas:

1. La dispersión de los nanotubos, la cual depende de su grupo funcional.
2. Interacción interfacial entre los nanotubos de carbono y productos de hidratación del cemento: Los productos de hidratación (C-S-H), tienen tamaño similar o mayor a los nanotubos por lo que pocos nanotubos pueden anclarse por estos productos de hidratación.

El humo de sílice se introdujo para mejorar estos dos aspectos, debido a su tamaño de partícula la cual se puede mezclar con CNT aglomeradas y CNT separadas en fibras dispersas.

La adición de Nanotubos se basó en 0%, 0.15% y 0.3% en peso de cemento, con humo de sílice en proporción 0%, 10%, 20% y 30%, uso de cemento Portland tipo I y humo de sílice. Se redujo la cantidad de CNT dispersos como fibras individuales y se comprobó que con partículas con dimensiones más grandes que los nanotubos dificultan que estos se dispersen ya que los nanotubos tienen a aglomerarse en el agua libre de la pasta de cemento. La

morfología de los nanotubos de carbono dispersas en la matriz del cemento puede estar influenciado por la cantidad de humo de sílice. Se observó que los concretos sin humo de sílice y con nanotubos de carbono se aglomeran fácilmente en estado fresco actuando como poros y grietas comprometiendo la resistencia, los nanotubos al estar bien dispersos están anclados a la matriz del cemento actuando como fibras de refuerzo (H. K. Kim et al., 2014).

Las investigaciones con nanotubos de carbono multipared han ido avanzando y se ha propuesto la modificación de su superficie con H_2SO_4 y HNO_3 con el fin de permitir la presencia de grupos de ácido carboxílico los cuales producen reacciones químicas entre el ácido carboxílico y el silicato de calcio hidratado (C-S-H) o $Ca(OH)_2$ reforzando la interacción en la interfaz entre los nanotubos y los compuestos a base de cemento aumentando la eficiencia de transferencia de carga de la matriz de cemento a los nanotubos. Como resultado, las propiedades mecánicas de los compuestos son mejorados.

Las cuales se añadieron a la mezcla de cemento y se analizaron sus propiedades mecánicas demostrando que estos pueden mejorar la resistencia a la flexión, resistencia a la compresión y tensión, la adición de nanotubos puede modificar el tamaño de poro y disminuir su porosidad, se comprobó que existen interacciones entre nanotubos de carbono y las hidrataciones (C-H-S), produciendo alta resistencia en la unión de matriz de refuerzo y cemento, los nanotubos actúan como puentes a través de grietas y huecos. Al ser sometidos al tratamiento de H_2SO_4 y HNO_3 se forman grupos de ácido carboxilo en su superficie, el estudio contempló el uso de cemento Portland ordinario, el cemento con fibras de carbono y el cemento con nanotubos de carbono, el uso de nanotubos mejoró la deformación de cemento, disminuyó la porosidad y redujo el volumen total de poros aproximadamente 64% menor que los de control actuando como relleno de huecos. (Li et al., 2005).

Otras adiciones como la ceniza volante han sido estudiadas con la incorporación de nanotubos de carbono a 0.5 y 1% en peso para compuestos en forma de pastas y morteros sin embargo se ha estudiado más su resistencia y microestructura que su durabilidad, el uso de nanotubos dio lugar a una mayor resistencia a morteros de ceniza volante, la más alta fue en la adición 1% y 20% de ceniza volante, se mostró una buena interacción entre los

nanotubos y la matriz de cemento, los nanotubos actúan como relleno entre los productos de hidratación logrando una microestructura más densa, en comparación con el control.

La ceniza volante se reconoce como material de construcción importante debido a sus beneficios ambientales así como sus características, bajo calor de hidratación, mayor capacidad de trabajo y mayor durabilidad ante cloruros y sulfatos. La resistencia desarrolla más lento la resistencia por su reacción puzolánica a largo plazo, pero para el caso de ceniza volante con nanotubos alcanzó su resistencia a los 28 días, los nanotubos actúan como material de carga en la microestructura del concreto (Chaipanich et al., 2010).

Se ha evaluado los nanotubos de carbono multipared en materiales a base de cemento, el principal objetivo ha sido la porosidad y la microestructura por ello los nanotubos de pared múltiple de carbono se sustituyeron hasta en 1%, en cemento portland tipo I, se utilizaron para pastas con relación agua cemento 0.5, la porosidad total de las mezclas disminuyó con el aumento del contenido de los nanotubos de carbono, se redujo el número de mesoporos (10 y 50nm) y se mostró la dispersión de nanotubos en la fase de hidratación. Los nanotubos de carbono multicapa pueden proporcionar enlaces químicos entre grupos de COOH de nanotubos y el CSH de la matriz de cemento, diferentes tipos de cementantes como el Cemento Portland, cemento Portland Blanco y Compuestos Portland con ceniza volante han aumentado sus resistencias y se ha visto una buena dispersión durante la mezcla (Nochaiya y Chaipanich, 2011).

Conclusión del estado del arte.

Se destacan las siguientes conclusiones del estado del arte:

Durabilidad en el concreto

1. En zona costera los principales agentes agresores son cloruros, sulfatos y humedad, el concreto durable debe retener su forma original, calidad y condiciones de servicio.
2. Como resultado de las interacciones ambientales, la microestructura y las propiedades de los materiales cambian con el tiempo su calidad y condiciones de servicio.

3. La estructura del concreto al ser heterogénea es difícil determinar su comportamiento futuro, factores como su exposición afectan su composición.
4. El concreto tiene propiedades de transporte que promueven el ingreso de agentes agresivos; absorción de agua, permeabilidad al agua, permeabilidad al aire, porosidad y resistividad eléctrica, los modelos de predicción de ion cloruro que más se ajustan son los que logran una concentración superficial más correcta.

Penetración de Ion cloruro en el concreto.

1. El contenido de ion cloruro en concretos expuestos a ciclos de secado y humedecido es más alto que en los de inmersión total.
2. Al someter el concreto a cargas se disminuyen sus poros, cambian sus diámetros afectando el transporte de cloruros.
3. La acumulación de cloruro libre en la superficie del concreto se debe al humedeciendo y secado, el mayor contenido de cloruros se localiza en la superficie expuesta.
4. La rápida permeabilidad de cloruros se relaciona más con el tamaño del poro y no con la porosidad total.
5. Las pruebas de penetración rápida permiten su rápido ensayo, corta duración y buena repetitividad de resultados.
6. El correcto diseño de concreto considera cantidades (espesores) y calidades (permeabilidad de cloruros), pruebas con el método NT Build 492 se basan en experiencia con mezclas de CPO dejando posibilidad de estudiar su comportamiento con otro cementante.

Puzolana como adición al cemento Portland.

1. La puzolana natural modifica la microestructura del concreto mediante efecto relleno respecto a la porosidad, al paso del tiempo sigue formando gel C-S-H.
2. La sustitución parcial del Clinker con adiciones mejoran su resistencia mecánica y de durabilidad, arcillas como puzolanas su sustitución favorece procesos de hidratación, provocando fases hidratadas más estables.

3. El uso de puzolana en un porcentaje parcial de sustitución decrece la interconectividad de poros a medida que estas se hidratan presentando mayor reducción a la permeabilidad de iones cloruros.
4. El tiempo de fraguado de concretos elaborados con cemento Portland puzolanico es mayor que un ordinario debido a la lenta reacción puzolanica, además de ser más fino resulta en mezclas más rígidas disminuyendo la porosidad de la pasta de cemento.
5. El uso de materiales puzolanicos e hidráulicos en los cementos produce un aumento de las propiedades mecánicas, así como mejores reacciones de hidratación mejorando su microestructura mediante la reducción de porosidad.
6. Concretos a base de adiciones como escoria granular de alto horno han mostrado mayor resistencia contra penetración de cloruros, en comparación con cementos resistentes a sulfatos y cemento Portland ordinario.

Nanotubos de carbono

1. La nanotecnología a través de la manipulación de moléculas a escala nano permiten la mejora de la durabilidad y disponibilidad de materiales potencializando sus características.
2. Los nanotubos de carbono multipared en el concreto se han evaluado por su comportamiento mecánico del concreto con diferentes cementantes, en un CPO se distribuyeron los nanotubos a una escala más fina que las fibras comunes, logrando un puente entre poros y propagación entre compuestos.
3. El uso de nanotubos de carbono en concretos está delimitado para durabilidad y se ha empleado más como método que como compuesto para evaluar la penetración de cloruros.
4. El uso de nanotubos de carbono en el concreto presenta dos problemáticas, la dispersión y la interacción interfacial entre los nanotubos y los productos de hidratación para su anclaje.
5. El implemento de otros tipos de cementantes como el ceniza volante, humo de sílice y escoria granular de alto horno con adición de nanotubos de carbono permiten la mejor dispersión y mayor homogeneidad del concreto a comparación de un cemento Portland ordinario.

6. Los nanotubos de carbono favorecen la resistencia inicial en diferentes cementantes los cuales por su adición puzolánica suelen tardar en reaccionar sus compuestos.

El concreto debe ser capaz de mantener su forma original, calidad y condiciones de servicio pero su microestructura cambia dependiendo del tipo de ambiente y condiciones de servicio y exposición, el principal agente agresivo en zona costera es la penetración de ion cloruro, el concreto por su estructura heterogénea es difícil determinar su comportamiento y concretos sometidos a constante proceso de humedecimiento y secado son susceptibles ante ataque de cloruros, la permeabilidad se relaciona con el tamaño de los poros del concreto por lo que es necesario el uso de ensayos acelerados que puedan predecir el comportamiento del elemento ante los cloruros, el uso de cementos puzolánicos modifican la microestructura del concreto disminuyendo la porosidad del elemento, este tipo de cementante mejora su resistencia mecánica y durabilidad, el uso de puzolana decrece las interconectividad de poros que junto con otros tipos de cementantes han resultado ser superiores a las características brindadas por un cemento ordinario, la clave de la durabilidad se encuentra en su microestructura y a una escala menor es por ello que el uso de nanotecnologías en el concreto ha ayudado a la manipulación del material, nanotubos de carbono se ha utilizado en el concreto para mejorar su resistencia mecánica más que su durabilidad, estos sirven como puentes entre los poros del concreto, pero presentan dos problemas; la dispersión y la homogeneidad, sin embargo el uso de cementantes como el humo de sílice, escoria granular de alto horno y ceniza volante han ayudado a disminuir estos problemas y han presentado resistencias mecánicas tempranas y a su edad de diseño mejores que en cemento ordinario con y sin adición de nanotubos, de ahí la necesidad de estudiar la interacción que estos pueden tener con un cemento con puzolana natural con un enfoque de durabilidad.

Capítulo 3. METODOLOGÍA

3.1 Métodos de trabajo.

El presente trabajo fue de tipo experimental, constó de 9 fases como se muestra en la Figura 1.

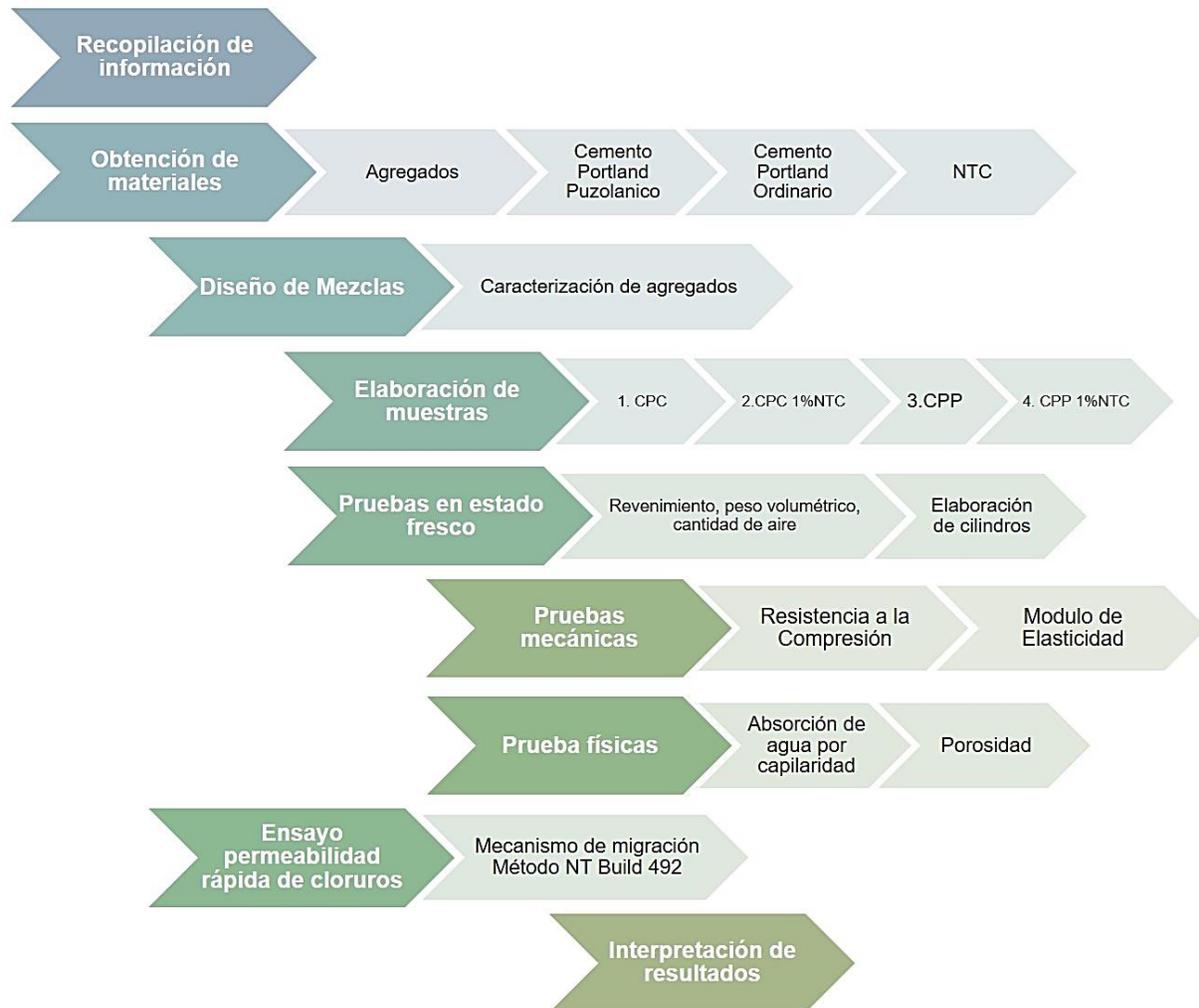


Figura 1. Bosquejo metodológico.

El bosquejo metodológico consta de tres tipos de variables, la variable dependiente contempla la penetración de cloruros, las variables independientes los tipos de cemento y la variable a controlar abarca la relación agua-cemento a utilizar (Tabla 1):

Tabla 1. Variables dependientes, independientes y a controlar.

| |
|---|
| <p>Variables dependientes (Penetración de Cloruros)</p> <ul style="list-style-type: none"> •-Coeficiente de difusión y migración |
| <p>Variables Independientes (Tipos de cemento)</p> <ul style="list-style-type: none"> •Cemento Portland Compuesto CPC •Cemento Portland Compuesto + Nanotubos de carbono multipared (CPC+NTC0.5%) •Cemento Portland Puzolanico CPP •Cemento Portland Puzolanico + Nanotubos de carbono (CPP+NTC0.5%) |
| <p>Variables a controlar</p> <ul style="list-style-type: none"> •Relación agua-cemento •Porcentaje de adición de nanotubos de carbono multipared al 0.5% •Tiempo de curado a 28 días |

La integración de las variables se muestra en la Figura 2, en donde las variables independientes como el tipo de cemento junto con las variables a controlar arrojarán los ensayos a evaluar y mediante el método de permeabilidad rápida de cloruros se podrá obtener el coeficiente de difusión y la concentración de cloruros con lo cual se podrá elaborar un perfil de difusión de cloruros para los diferentes tipos de cemento.

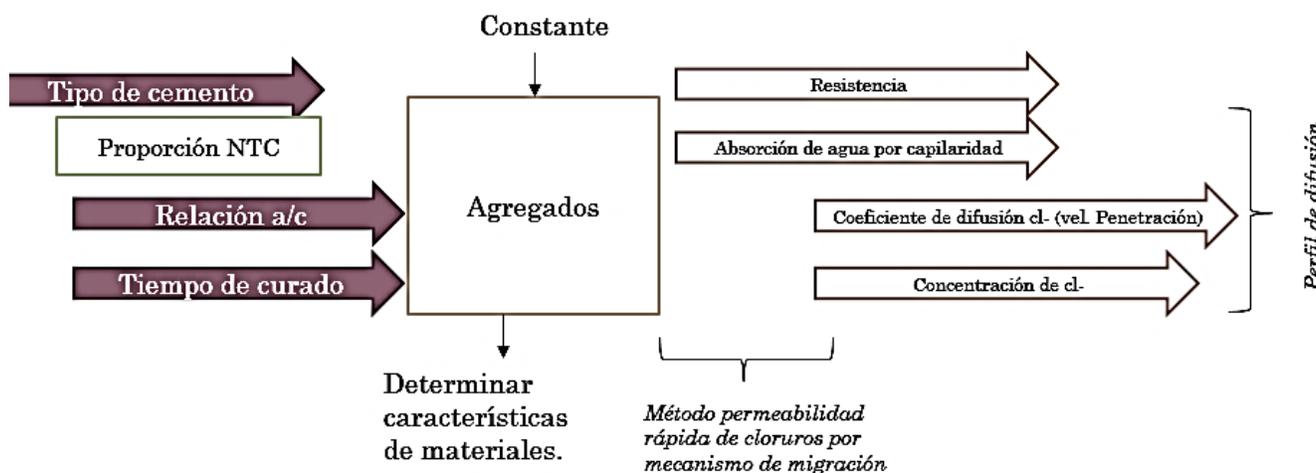


Figura 2. Diseño experimental.

La obtención de los diferentes compuestos a ensayar se muestra en la Figura 3 en donde se puede observar 12 diferentes compuestos con características diferentes, las cuales serán sometidas a pruebas mecánicas, físicas y de durabilidad.

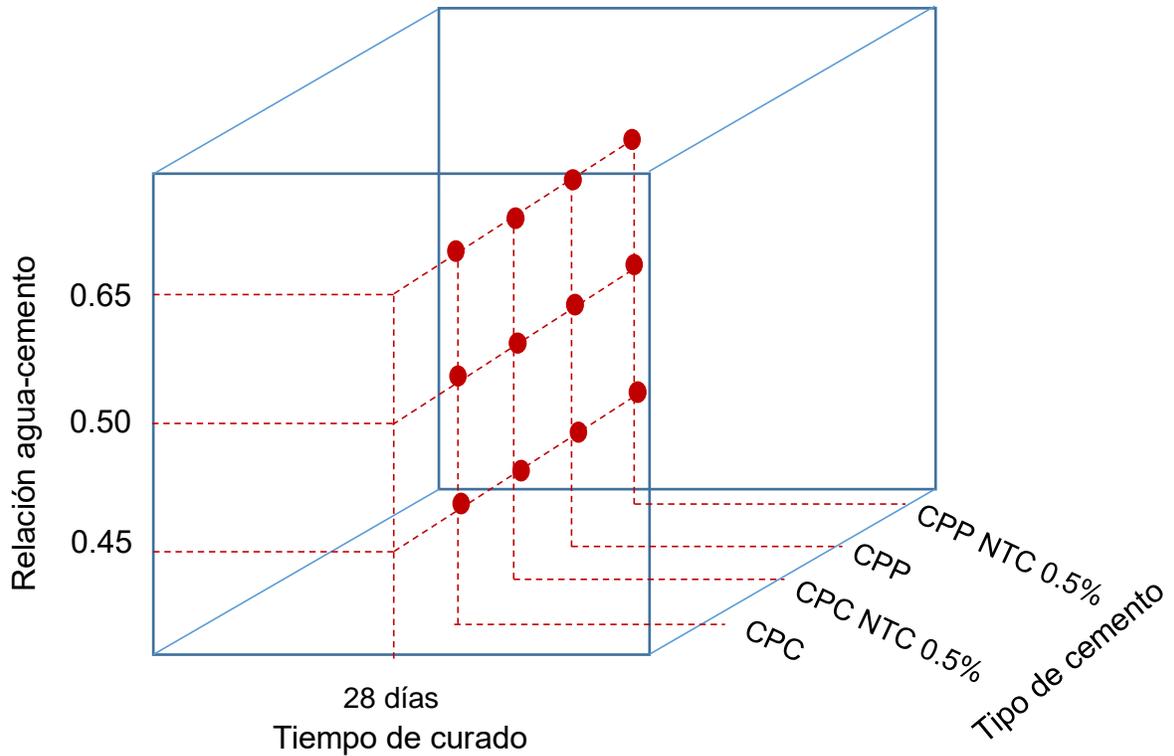


Figura 3. Diseño de experimentos de Box-Behnken para 3 variables (Huerta-García et al., 2014).

En la Tabla 3 se indican las familias de concreto obtenidas con las diferentes características, las pruebas se someterán a un mismo tiempo de curado, siendo este a los 28 días ya que es cuando se espera este lleguen a su resistencia de diseño, en la Tabla 2 se muestra como se conforman las diferentes mezclas.

Tabla 2. Conformación de familias.

| Tipo de cemento | Relación a/c | Edad de curado |
|-----------------|--------------|----------------|
| CPP | 0.65 | 28 días |
| CPC | 0.50 | |
| CPP NTC | 0.45 | |
| CPC NTC | | |

Tabla 3. Familias de concreto.

| | Coeficiente de difusión cl⁻ (cel. Penetración)/ resistencia/absorción de agua por capilaridad/ porosidad | | | | | | | | | | | | |
|------------------------|--|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Cementante y adiciones | CPC | X | X | X | | | | | | | | | |
| | CPC+NTC 0.5% | | | | X | X | X | | | | | | |
| | CPP | | | | | | | X | X | X | | | |
| | CPP+NTC 0.5% | | | | | | | | | | X | X | X |
| Relación agua-cemento | 0.60 | X | | | X | | | X | | | X | | |
| | 0.50 | | X | | | X | | | X | | | X | |
| | 0.45 | | | X | | | X | | | X | | | X |
| Tiempo de curado | 28 días | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |

2.2 Especímenes a utilizar

La determinación de los especímenes elaborados se tomaron de acuerdo a la cantidad de pruebas a la que se sometieron y su repetividad de cada una de ellas, con las cuales se redujo el sesgo estadístico, la TABLA 4 muestra los especímenes para la relación agua cemento de 0.60, en la tabla 5 se muestran los especímenes a utilizar para relación agua cemento 0.50 y en la tabla 6 se muestran los especímenes a utilizar en la relación agua cemento 0.45.

Tabla 4. Especímenes para 0.60 a/c.

| | Relación a/c= 0.60 | | | | |
|---|---------------------------|-------------------------|------------|-------------------------|---------------------------|
| | CPC | CPC+NTC 0.5% | CPP | CPP+NTC 0.5% | Medida Probeta |
| Resistencia a la compresión | 5 | 5 | 5 | 5 | 150mm x 300mm |
| Módulo de elasticidad | 3 | 3 | 3 | 3 | 150mm x 300mm |
| <i>Total</i> | 8 | 8 | 8 | 8 | 150mm x 300mm |
| Porosidad, absorción y densidad | 3 | 3 | 3 | 3 | 100mm x 200mm |
| Absorción capilar y electromigración de cloruros | 2 | 2 | 2 | 2 | 100mm x 200mm |
| Exposición natural | 1 | 1 | 1 | 1 | 100mm x 200mm |
| <i>Total</i> | 6 | 6 | 6 | 6 | 100mm x 200mm |

Tabla 5. Especímenes para 0.50 a/c.

| | Relación a/c= 0.50 | | | | |
|--|---------------------------|-------------------------|------------|-------------------------|---------------------------|
| | CPC | CPC+NTC 0.5% | CPP | CPP+NTC 0.5% | Medida Probeta |
| Resistencia a la compresión | 5 | 5 | 5 | 5 | 150mm x 300mm |
| Módulo de elasticidad | 3 | 3 | 3 | 3 | 150mm x 300mm |
| <i>Total</i> | 8 | 8 | 8 | 8 | 150mm x 300mm |
| Porosidad, absorción y densidad | 3 | 3 | 3 | 3 | 100mm x 200mm |
| Absorción capilar y electro migración de cloruros | 2 | 2 | 2 | 2 | 100mm x 200mm |
| Exposición natural | 1 | 1 | 1 | 1 | 100mm x 200mm |
| <i>Total</i> | 6 | 6 | 6 | 6 | 100mm x 200mm |

Tabla 6. Especímenes para 0.45 a/c.

| | Relación a/c= 0.45 | | | | |
|--|---------------------------|-------------------------|------------|-------------------------|---------------------------|
| | CPC | CPC+NTC 0.5% | CPP | CPP+NTC 0.5% | Medida Probeta |
| Resistencia a la compresión | 5 | 5 | 5 | 5 | 150mm x 300mm |
| Módulo de elasticidad | 3 | 3 | 3 | 3 | 150mm x 300mm |
| <i>Total</i> | 8 | 8 | 8 | 8 | 150mm x 300mm |
| Porosidad, absorción y densidad | 3 | 3 | 3 | 3 | 100mm x 200mm |
| Absorción capilar y electro migración de cloruros | 2 | 2 | 2 | 2 | 100mm x 200mm |
| Exposición natural | 1 | 1 | 1 | 1 | 100mm x 200mm |
| <i>Total</i> | 6 | 6 | 6 | 6 | 100mm x 200mm |

3.1 Procedimiento experimental

El proceso experimental que se llevó a cabo para cumplir las nueve fases propuestas se siguió conforme a la figura 4:

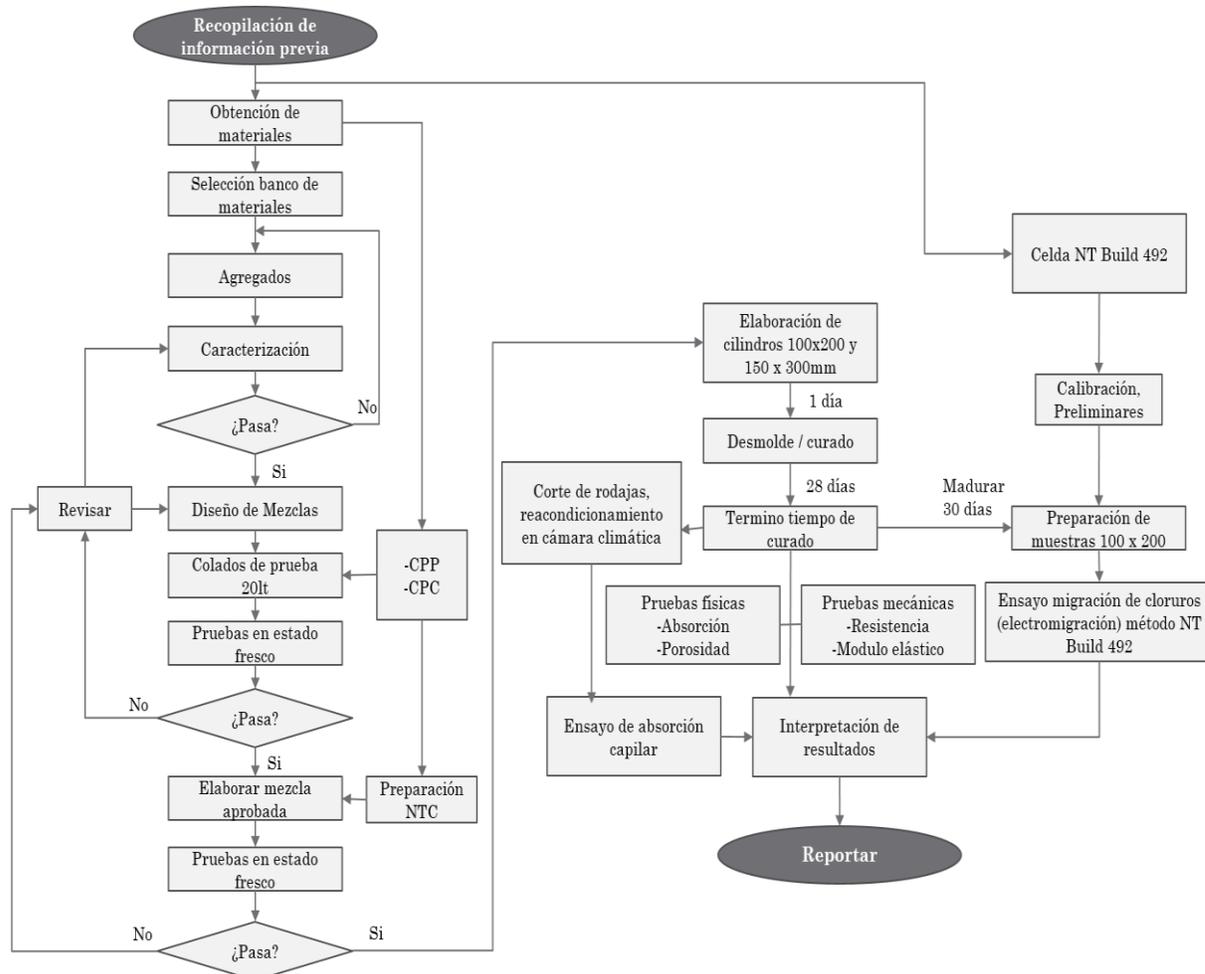


Figura 4. Diagrama metodológico.

Atendiendo los objetivos de la investigación se plantearon ensayos experimentales capaces de evaluar las características, físicas, mecánicas y de durabilidad de los concretos dichos experimentos atendieron las normas vigentes internacionales ASTM así como la norma Noruega NTBuild 492 que se basa en la evaluación de concretos y morteros ante la presencia de cloruros en estado no estacionario, las tres dosificaciones se diferencian principalmente por el tipo de cementante empleado, la primera familia se basó en el Cemento Portland Compuesto CPC 30R el cual se le denominó control, dicho cementante es el utilizado

principalmente en la región y fue el punto de partida para la diferenciación de los datos obtenidos.

Se registraron tres relaciones agua/cemento 0.60, 0.50 y 0.45, sin el empleo de algún tipo de aditivo. El curado de las probetas se realizó por inmersión a los 28 días, las probetas se curaron a temperatura ambiente debido a que la elaboración de la mezcla se encuentra en un clima cálido sub-húmedo por lo que no hay necesidad de variar la temperatura.

-Identificación de diferentes mezclas de concreto:

- **CPC.**- Mezcla control, fabricada con CPC 30R, $a/c= 0.60, 0.50$ y 0.45
- **CPCNTC.**- Mezcla de ensayo, fabricada con CPC adicionada con 0.5% de su peso en NTC (nanotubos de carbono multicapa), $a/c= 0.60, 0.50$ y 0.45
- **CPP.**- Mezcla de ensayo, fabricada con CPP, $a/c= 0.60, 0.50$ y 0.45
- **CPPNTC.**- Mezcla de ensayo, fabricada con CPP adicionada con 0.5% de su peso en NTC (nanotubos de carbono multicapa), $a/c= 0.60, 0.50$ y 0.45

-Tipos de curado:

- **A.** Curado por inmersión a temperatura ambiente a 28 días.

- Evaluación de las diferentes propiedades del concreto:

- Resistencia a la compresión
- Módulo de elasticidad
- Coeficiente de difusión y migración de cloruros
- Absorción por capilaridad
- Porosidad, densidad y absorción

-Características principales de la propuesta experimental:

- Se sometieron muestras al método de penetración rápida de cloruros por medio del mecanismo de migración, forzando el ingreso del ion cloruro mediante campo eléctrico a la estructura de la muestra simulando un ambiente con altas concentraciones.

3.2 Fabricación del concreto

Las muestras de concreto se fabricaron en el laboratorio de posgrado maestría en construcción, del Instituto Tecnológico Nacional, campus Instituto Tecnológico de Chetumal, en la ciudad de Chetumal, Quintana Roo.

3.3 Materiales empleados

- **Cemento**

Se empleó Cemento Portland Compuesto (NMX-C-414-ONNCCE) de fabricación mexicana clase resistente 30R, pertenece al cemento tipo I marca CEMEX MAYA y Cemento Portland Puzolánico el cual resulta de la molienda conjunta del Clinker Portland, puzolanas y sulfato de calcio (NMX-C-414-ONNCCE), de fabricación mexicana perteneciente al cemento tipo II de la marca CEMEX MAYA (Figura 5), en la tabla 7 se muestran sus características físicas y químicas (SCT, 2002).



Figura 5. Presentación cemento Portland puzolanico en saco de 50kg.

Tabla 7. Composición de los cementos Portland (SCT, 2002).

| Cemento Pórtland | | Clinker Portland + sulfato de calcio | Componentes principales | | | | Componentes minoritarios |
|------------------|--|---|-------------------------|---------------------|-------------------|--------|-----------------------------|
| Tipo | Denominación | | Puzolana s (1) | Escoria granulad | Humo de sílice | Caliza | |
| CPO | Cemento Portland ordinario | 95-100 | - | - | - | - | 0-5 |
| CPP | Cemento Portland Puzolánico | 50-94 | 6-50 | - | - | - | 0-5 |
| CPEG | Cemento Portland con escoria granulada de alto horno | 40-94 | - | 6-60 | - | - | 0-5 |
| CPC (3) | Cemento Portland compuesto | 50-94 | 6-35 | 6-35 | 1-10 | 6-35 | 0-5 |
| CPS | Cemento Portland con humo de sílice | 90-99 | - | - | 1-10 | - | 0-5 |
| CEG | Cemento con escoria granulada de alto horno | 20-39 | - | 61- 80 | - | - | 0-5 |

(1) Las puzolanas pueden ser naturales, artificiales y cenizas volantes.

(2) Los componentes minoritarios pueden ser uno o más de los componentes principales, salvo que estén incluidos ya como tales en el cemento.

(3) El cemento Portland compuesto contendrá dos componentes principales como mínimo, excepto cuando se trate de caliza, la que puede ser el único componente principal.

- **Nanotubos de carbono**

Nanotubos de carbono multipared funcionalizados para concreto de origen comercial fue necesario someterlos a un análisis específico bajo el microscopio electrónico de barrido, con el cual se obtuvieron las características y su composición química a base de carbón en un 97%, aluminio en un 0.56%, acero en un 0.45%, sulfuro en 0.11% y oxígeno en 1.82%.

- **Agua**

En la elaboración de las mezclas se utilizará agua potable suministrada por el pozo del Instituto Tecnológico de Chetumal, la cual garantiza las condiciones de pureza necesarias para ser usadas en la pasta de cemento.

- **Agregados**

Se empleó el uso de agregado calizo de la región grueso y fino respetando los límites que establece Romel Solis-Carcaño para las características permisibles del agregado calizo de alta absorción predominante en la península de Yucatán.

3.4 Obtención de agregados

Se llevó a cabo un estudio previo para determinar la calidad de los agregados de tres bancos de materiales diferentes con el objetivo de obtener aquellos que cumplieran con las características necesarias para esta investigación, se evaluó su granulometría, peso volumétrico suelto y compacto, así como su porcentaje de desgaste, de los cuales se concluyó que el banco de material de Juan Sarabia proporcionaba el agregado fino con las características requeridas (Figura 6) y respecto al agregado grueso este se obtuvo del banco denominado el tigre localizado a la entrada de la ciudad de Chetumal (Figura 7).



Figura 6. Banco 1 Ejido Juan Sarabia y Banco 2 Mercader, ubicados en Localidad Juan Sarabia carretera Chetumal-Escárcega (Google Earth).

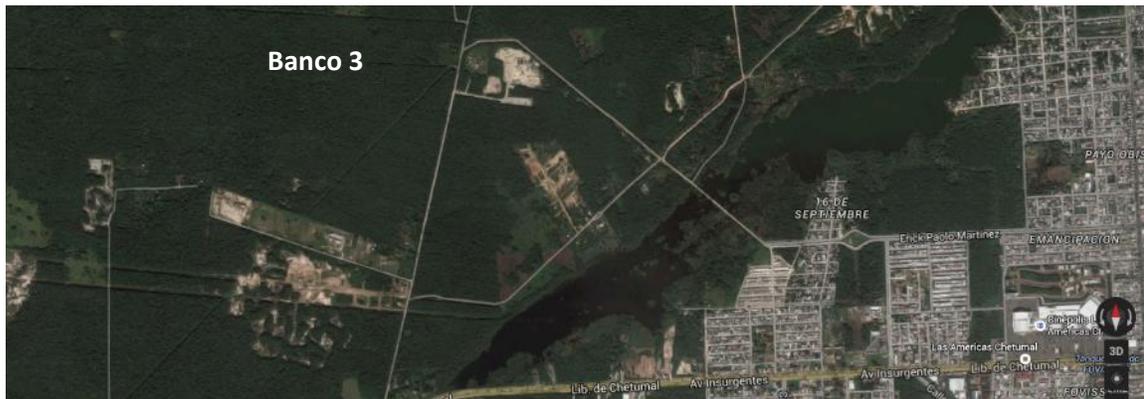


Figura 7. Banco 3 El tigre, ubicado a la salida de Chetumal (Google Earth).



Figura 8. Obtención de agregados.

Se adquirió de los bancos correspondientes, 1m³ de agregado fino así como 1.50 m³ de agregado grueso (Figura 8).

La selección se hizo por inspección visual de las pilas de agregados (almacenaje) siguiendo la práctica de muestreo de la ASTM D 75 (Figura 9), se transportaron hasta el laboratorio de maestría en construcción en instalaciones del ITCH.



Figura 9. Obtención de material en el banco.

Se procedió a homogenizar el material mediante el cuarteo general tomando en cuenta la norma ASTM C 702, este proceso se repitió 2 veces más (Figura 10).



Figura 10. Cuarteo general de agregados.

Se redujo el cono a 1/3 de su altura y se dividió en dos partes iguales que a su vez cada una se volvió a dividir en dos partes iguales, se seleccionaron dos partes en esquinas opuestas y se homogeneizaron, se repitió el procedimiento de cuarteo hasta obtener una muestra de medio saco (20 kg) destinada para la caracterización de agregados (Figura 11), este procedimiento se utilizó tanto en agregado fino como en agregado grueso, la muestra

restante se almaceno en costales limpios y se ubicaron en bases elevadas y techadas para evitar que estas se encontraran en contacto con humedad.



Figura 11. Cuarteo general de agregado fino.

3.5 Caracterización de agregados

3.5.1 Granulometría, ASTM C 33, ASTM C 136.

Agregado grueso

La prueba se realizó siguiendo la norma ASTM C136 de forma mecánica y ASTM C33 para identificar los límites de los agregados en el caso del agregado grueso se tomó los límites de $\frac{3}{4}$ " de pulgada a la malla no. 4.

Se cuarteó, se llevó al horno por 24 horas a una temperatura de 110°C. Se procedió a colocarlas en el agitador mecánico y se determinó su masa retenida en cada malla. Por cuestiones de estadística se llevó a cabo en total 4 veces la prueba, se promediaron los pesos retenidos y se procedió a los cálculos correspondientes.

Agregado fino

Se procedió a realizar el proceso de lavado para determinar el porcentaje que pasa la malla 200 siguiendo la norma ASTM C 117 a cada una de ellas, se llevaron al horno y se pesaron las muestras. Se colocó en el agitador mecánico y luego se procedió a pesar lo retenido en cada malla (Figura 13). Este proceso se realizó para las 4 muestras.



Figura 13. Proceso de lavado y tamizado de la arena.

3.5.2 Gravedad específica y absorción

Agregado grueso, ASTM C127.

Se llevó a cabo el ensayo para determinar la gravedad específica en estado saturado superficialmente seco del agregado grueso, dicho dato se usó para el cálculo de las dosificaciones en el diseño de mezclas.

La muestra de ensayo se preparó previamente de acuerdo a la práctica ASTM C 702 (Figura 14).



Figura 14. Reducción de la muestra por cuarteo.

El tamaño de la muestra fue en función del tamaño máximo del agregado señalado en el ensayo de granulometría ASTM C33, la muestra se introdujo al horno y se secó luego se procedió a determinar su peso y se saturó en agua por 24 horas (Figura 15).



Figura 15. Saturación de agregado grueso 24 horas.

Al término de las 24 horas se secó para obtener el estado saturado superficialmente seco (SSS), se procedió a determinar su masa (Figura 16).



a) Se retiró el exceso de agua después de 24h.



b) Determinación del peso del agregado SSS.

Figura 16. Proceso para determinar la absorción y gravedad específica.

La muestra se sumergió y se determinó su peso sumergido (Figura 17).



Figura 17. Determinación del peso del agregado en estado sumergido.

Se secó por 24 horas y se determinó su peso, se procedió a los cálculos correspondientes (Figura 18).



Figura 18. Determinación del peso del agregado después de seco en horno a 110°C durante 24h.

Para los cálculos se utilizaron las siguientes formulas

Densidad Relativa:

Donde:

A= Peso de la muestra secado al horno en aire, g.

B= Peso de la muestra en estado saturado superficialmente seco en aire, g.

C= Peso aparente de la muestra en estado saturado sumergida en agua, g.

- **Densidad Relativa (Gravedad específica) Seca al horno (SH):**

$$\text{Densidad Relativa (Gravedad específica)(SH)} = \frac{A}{(B - C)}$$

- **Densidad Relativa (Gravedad específica) Saturada Superficialmente Seca (SSS):**

$$\text{Densidad Relativa (Gravedad específica)(SSS)} = \frac{B}{(B - C)}$$

- **Porcentaje de absorción**

$$\text{Absorción, \%} = \left[\frac{B - A}{A} \right] \times 100$$

Agregado fino, ASTM C128

La muestra de ensayo se preparó previamente de acuerdo a la práctica ASTM C 702 (Figura 19).

La muestra se introdujo al horno y se secó por 24 horas, al término se procedió a pesar la muestra y se saturó en agua por 24 horas.



a) Muestra al horno a 110°C por 24h.



b) Saturación de material por 24h.

Figura 19. Preparación de la muestra de ensaye.

Al termino con ayuda de una hornilla y charola se secó hasta alcanzar su estado saturado superficialmente seco (SSS) (Figura 20 y 21).



Figura 20. Prueba provisional de molde de cono, 25 golpes con pinzón.



Figura 21. Agregado fino en estado saturado superficialmente seco SSS.

Se tomó parte de la muestra en estado SSS y se metió al horno para determinar la absorción y la otra parte se destinó al método gravimétrico con el picnómetro (Figura 22).



a) 500g. A horno



b) 500g. A picnómetro.

Figura 22. Muestra para determinar la absorción.

Se ajustó la temperatura, se determinó el peso, se decantó (Figura 23), se secó en horno y se determinó su peso en estado seco (Figura 24).



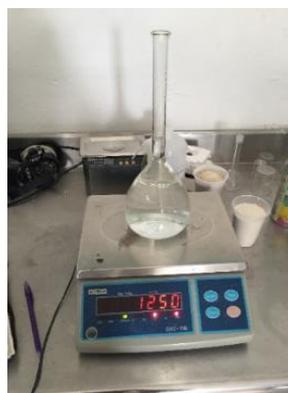
a) *Peso Muest.+A + Pic*



b) *Decantado de picnómetro*



c) *Ajuste de temperatura*



d) *Peso de picnómetro + agua*

Figura 23. Procedimiento en el ensaye de absorción del agregado fino.

El ensayo se repitió 2 veces más (3 muestras en total) por cuestiones estadísticas, se utilizó la media aritmética para el nuevo diseño de mezclas.



Figura 24. Peso seco de la muestra después de horno 110°C por 24h.

Se procedió a los cálculos

Donde:

A= Peso de la muestra secado al horno, g.

B= Peso del picnómetro + agua hasta su marca de calibración, g.

C= Peso del picnómetro + espécimen + agua hasta su marca de calibración, g.

S= Peso del espécimen en estado saturado superficialmente seco (SSS), g.

- **Densidad Relativa (Gravedad específica) Seca al horno (SH), procedimiento gravimétrico:**

$$\text{Densidad Relativa (Gravedad específica)(SH)} = \frac{A}{(B + S - C)}$$

- **Densidad Relativa (Gravedad específica) Saturada Superficialmente Seca (SSS), procedimiento gravimétrico:**

$$\text{Densidad Relativa (Gravedad específica)(SSS)} = \frac{S}{(B + S - C)}$$

- **Porcentaje de absorción**

$$\text{Absorción, \%} = \left[\frac{S - A}{A} \right] \times 100$$

3.5.3 Peso Volumétrico agregado grueso y fino, ASTM C 29

La determinación del peso volumétrico seco y compactado fue de acuerdo a la norma ASTM C 29, tanto para el agregado fino como el grueso, los datos obtenidos ayudaran en el cálculo de la dosificación de los agregados en el diseño de mezclas.

Para obtener el volumen exacto del recipiente se procedió a realizar su calibración.

Calibración del recipiente:

Llenando el recipiente de agua, quitando el exceso de aire y determinando su peso de acuerdo a su temperatura (Figura 25).



(1) Llenado del recipiente



(2) Eliminación de aire



(3) Peso recipiente + agua + vidrio



(4) Agua a 28°C



(5) Peso recipiente + vidrio

Figura 25. Calibración de recipiente.

Para 28°C se considera una densidad del agua de 996.22 kg/m³ por interpolación).

Se registró el peso del recipiente + vidrio y con estos valores se procedió a calcular el factor de calibración:

$$F = \frac{Mu}{Ma}$$

Donde:

Mu= Masa unitaria del agua a los 28°C → 996.22 kg/m³

Ma= Masa de agua de recipiente = (recipiente + vidrio + agua) - (recipiente + vidrio)=

$$9.470\text{kg} - 4.627\text{kg} = 4.843\text{kg}$$

Sustitución:

$$F = \frac{996.22 \text{ kg/m}^3}{4.843\text{kg}} = 205.70 \frac{1}{\text{m}^3}$$

Una vez que se calculó el factor de calibración del recipiente se procedió al ensayo. La muestra de ensayo se preparó previamente de acuerdo a la práctica ASTM C 702, se repitió el procedimiento de cuarteo hasta que se redujo la muestra.

Se colocó al horno para secar la muestra y se tomaron dos tipos de mediciones, peso volumétrico suelto y peso volumétrico varillado:

Peso volumétrico suelto.

Para el peso volumétrico suelto del agregado grueso y el agregado fino se fue recolectando la muestra según la norma y se eliminaron los excedentes cuidando de no compactarla (Figura 26).



Figura 26. Peso volumétrico suelto grava.

Peso volumétrico compacto (varillado).

Para el peso volumétrico compacto de los agregados, conforme se iba llenando y varillando se acomodaba la muestra con golpes en su exterior, se enrazó la capa superior y se determinó su peso del recipiente + muestra (Figura 27 y 28).



Figura 27. Peso volumétrico compacto grava.



Figura 28. Peso volumétrico compacto arena.

Cálculos

- *Agregado Grueso, peso volumétrico suelto.*

Donde:

M= Peso volumétrico del agregado, kg/m³.

G= Peso de la muestra + recipiente, kg.

T= Peso del recipiente, kg. = 3.947kg

F= Factor del recipiente calibrado, kg. = 205.70 $\frac{1}{m^3}$

$$\text{Peso volumetrico } M = (G - T) \times F$$

3.5.4 Porcentaje de desgaste a la abrasión ASTM C 131 (Maquina de los ángeles).

Se cuarteo el material a ensayar y se procedió a seleccionar el tamaño de la muestra según su graduación al igual que el número de esferas de acero, se seleccionó la cantidad de muestra y se pasó por las respectivas mallas indicadas en la norma, se lavó y se secó al horno y se colocó dentro de la máquina de los ángeles junto con las esferas, se hizo girar el tambor a una velocidad de 33 rpm hasta alcanzar 500 revoluciones, se descargó el material se pasó por el tamiz No. 12, se lavó el material más grueso y se secó para después determinar la masa de la muestra (Figura 29) y se procedió a los cálculos.



a) Cuarteo de la muestra



b) Determinación de muestra



c) Muestra con 12 esferas metálicas



d) Ensayo hasta 500 revoluciones



e) Determinación de masa final

Figura 29. Procedimiento de desgaste a la abrasión.

3.6 Caracterización de Nanotubos de Carbono Multipared

Los nanotubos de carbono multipared usados en esta investigación fueron de origen comercial provenientes de Shanghai, China, se solicitaron funcionalizados en concreto para poder ser implementados en las muestras, para evaluar sus características se realizó el ensayo de microscopía electrónica de barrido (SEM) en el Instituto Tecnológico de Cancún, este se basó en el principio de la microscopía óptica la cual sustituye el haz de luz por un haz de electrones, consistió en incidir un barrido de haz de electrones sobre la muestra, generando partículas de electrones retrodispersados y electrones secundarios, el microscopio recoge la energía y la transforma en imágenes y datos, se obtuvieron imágenes a 1kx, 1.5kx, 3kx, 10kx, 20kx, 50kx, 200x, 500x, 800x, así como su espectro de composición química.

3.7 Criterio para el diseño de mezclas

Se establecieron las siguientes características que deben cumplir las mezclas como la relación agua-cemento 0.60 (250 kg/cm²), 0.50 (300 kg/cm²) y 0.45 (380 kg/cm²) tomando en cuenta los dos tipos de cementantes cemento Portland compuesto y cemento Portland puzolánico al igual que la adición de los nanotubos de carbono multicapa NTC en dos porcentajes 0% y 0.5%, el diseño de mezclas se basó en el método de proporcionamiento de materiales para el diseño de mezclas ACI 211, a pesar de tener relación agua-cemento baja de 0.45, en colados de prueba se determinó que no era necesario el uso de algún aditivo plastificante ya que la trabajabilidad del concreto se encontraba dentro de los límites establecidos en el diseño de mezclas.

Método de proporcionamiento de materiales para el diseño de mezclas ACI 211:

- Paso 1. Selección de revenimiento
- Paso 2. Selección tamaño máximo de agregado
- Paso 3. Cálculo de agua de mezclado y contenido de aire
- Paso 4. Selección de la relación agua/cemento
- Paso 5. Cálculo de contenido de cemento
- Paso 6. Cálculo de volumen del agregado grueso
- Paso 7. Determinación del agregado fino
- Paso 8. Ajuste por humedad

3.8 Elaboración de concreto

3.8.1 Elaboración de la mezcla

En la dosificación se tomó en cuenta las correcciones por humedad de los agregados al momento de su uso, se utilizó una balanza para pesar los materiales y para el mezclado de los materiales se empleó una revolvedora eléctrica de capacidad de 1 saco, para el numero de cilindros utilizados por familia de concreto se calculó un volumen de 0.078m^3 de concreto perteneciente a 78 litros, al inicio de cada colado se humectó del tambor de la revolvedora, y los utensilios para las pruebas en estado fresco, la charola, el recipiente de volumen conocido, palas, cucharas, cono de Abrahams, plato metálico y varillas, posteriormente, se colocó el agregado grueso al interior de la revolvedora y se adiciono aproximadamente un 40% del agua de mezclado, se encendió la revolvedora y por un lapso de un minuto se permitió que la graba absorbiera humedad, se vació en su interior el agregado fino, se continuo con el vaciado del cemento y el 40 % de agua de mezclado apartando aun el 20% para poder mediar la mezcla, para las familias de concreto donde se adicionó el 0.5% respecto al peso de cemento de nanotubos de carbono multipared se agregó el 20% del agua de mezclada destinada a la dispersión de los nanotubos después de verter el cemento, posteriormente se le agrego 20% apartado y con el 20% restante se medió la mezcla, una vez que todos los componentes se encontraban dentro de la revolvedora, se mezcló el concreto durante 3 minutos se apagó y se dejó descansar por otros tres minutos, en el periodo del descanso se humedeció un trapo y se colocó en la boca de la revolvedora con el fin de que la mezcla no perdiera humedad, al término se puso en marcha nuevamente por dos minutos más.

Se introdujo el concreto sobre la charola y se homogeneizó a mano con palas de punta plana, inmediatamente se inició la prueba de revenimiento, peso volumétrico y contenido de aire, así como el vaciado de las probetas. Para pruebas mecánicas (resistencia a la compresión y módulo de elasticidad), se utilizaron 8 probetas de 150 mm de diámetro por 300 mm de alto, para pruebas de absorción, densidad y porosidad se utilizaron 3 cilindros de 100 mm de diámetro por 200 mm y para pruebas de absorción capilar, se utilizaron 2 cilindros de 100 mm de diámetro por 200 mm de altura.

Se tomó como base la norma ASTM C 31 para el vaciado en los moldes fue en 3 capas y cada capa se varillo 25 veces y se golpeó con el mazo de hule alrededor de 15 veces para evitar vacíos en las muestras, se enraso la superficie con la varilla y con llana (Figura 30).



a) Vaciado de agregados en revolvedora



b) Mezclado de concreto en revolvedora



c) Colado de moldes



d) Fraguado de concreto

Figura 30. Colado muestras de concreto.

3.8.2 Dispersión y adición de nanotubos de carbono

Uno de los principales problemas en la adición de nanotubos de carbono múltipara en el concreto NTC es la dispersión homogénea que estos deben de tener ya que estos tienden a aglomerarse en grupos mediante el agua de la mezcla de cemento, el problema se tiene principalmente en concretos a base de Cemento Portland ordinario, sin embargo en concretos con adiciones se mejora esta propiedad (H. K. Kim et al., 2014; Nam et al., 2012) es por ello que se le dio preparación a los nanotubos para que estos logran una mejora en la dispersión en el compuesto de concreto, para el pesado de los nanotubos de carbono multipared se determinó utilizar el 0.5% respecto al peso del cemento, para ello se utilizó una

balanza eléctrica de laboratorio con exactitud 0.0001g, se utilizó equipo de protección, bata, guantes y mascarilla debido al tamaño de los nanotubos de carbono multipared (Figura 31), se almacenaron en recipientes y se sellaron, para su adición al concreto se apartó el 20% del agua de mezclado a la que se le agregaron las cantidades correspondientes al porcentaje de nanotubos de carbono multipared en base al peso de cemento, se disolvieron mediante medios mecánicos con ayuda de globo y un taladro para disiparlos en el agua (Figura 32), se observó que el producto de esto fue una mezcla densa que inmediatamente se adicionó al agua de mezclado en la revolvedora sin interrumpir el proceso de mezclado (Figura 33).



Figura 31. Pesaje NTCM.



Figura 32. Dispersión por medios mecánicos de NTC con agua de mezclado.



Figura 33. Concreto en estado fresco adicionado con NTCM, CPC0.45NTC.

3.8.3 Desmolde y curado de probetas

Los especímenes se desmoldaron después de 24h de haberse colado, se identificaron mediante una clave compuesta del tipo de cementante, relación agua cemento, en su caso el porcentaje de nanotubos de carbono multipared adicionado, fecha de inicio de curado, numero de espécimen y prueba a la que estuvo destinado, debido a que se manejó una sola edad de curado se decidió omitir este dato en el rotulo:

**CPP 0.65 0.5% NTC
7-mar-17
1 ME**

Los especímenes se sometieron a curado por inmersión en una pileta las condiciones de agua se mantuvieron a temperatura ambiente por 28 días (Figura 32).



Desmolde de cilindro 24h después de colado Curado en pileta a temperatura ambiente

Figura 32. Desmolde y curado de probetas.

3.9 Ensayos de concreto en estado fresco

La composición de la mezcla y su integración tendrán gran importancia en la cohesión de los componentes, es por ello que se realizaron pruebas en estado fresco.

3.9.1 Revenimiento

El método para determinar la trabajabilidad o revenimiento del concreto corresponde al Cono de Abrahams basado en la norma ASTM C 143, humedecido, se colocó el cono de Abraham sobre el plato metálico y el cono embudo en su parte superior, se fijaron con los pies y se procedió a vaciar la mezcla, se llenó por tres capas, varillando cada una, se enrazo el cono

y en un solo movimiento vertical se levantó el recipiente, con el flexómetro se determinó la diferencia entre la superficie de la mezcla y la del cono (Figura 33).



Figura 33. Ensayo de revenimiento.

3.9.2 Determinación de la masa unitaria

Se vació la mezcla en 3 capas, en cada una se varilló, se golpeó el recipiente, se enrazó el recipiente y se determinó su peso, de acuerdo a la norma ASTM C 183 (Figura 34).

Cálculos

Donde:

D =Peso volumétrico, kg/m^3 .

M_c =Peso de la muestra + recipiente, kg .

M_m =Peso del recipiente, $\text{kg} = 3.947\text{kg}$

V_m =Volumen del recipiente, $V = 0.00486138\text{m}^3$

$$\text{Peso volumetrico } D = (M_c - M_m) / V$$



Figura 34. Ensayo peso volumétrico del concreto.

3.9.3 Contenido de aire

El método empleado fue el método B basado en la norma ASTM C 231, humedecido el recipiente se llenó y se varilló, para eliminar el exceso de aire se golpeó la parte exterior.

Se enrazó la superficie, se limpiaron los bordes y se colocó la tapa con la válvula de presión, se fijaron los lados y se cerró la válvula liberadora de aire, se abrieron las válvulas laterales de purga y se introdujo agua hasta producir un flujo constante, se ejerció presión con la bomba para alcanzar su calibración, una vez cerrando las válvulas de purga, se liberó la presión con la válvula de aire, se registró el porcentaje de contenido de aire que indico el manómetro (Figura 35).



a) Concreto en recipiente



b) Sellado de recipiente



c) Bombeo y purga de aire



d) Lectura ensayo de porcentaje de aire

Figura 35. Prueba de contenido de aire.

3.10 Ensayos de concreto en estado endurecido

La finalidad de los ensayos en concreto endurecido es determinar las características mecánicas del mismo, se ensayó la resistencia a la compresión y se determinó el módulo de elasticidad.

3.10.1 Resistencia a compresión

Los ensayos a compresión se llevaron a cabo según la norma ASTM C 39, durante los ensayos se emplearon probetas de 150mm de diámetro y de 300mm de altura, utilizando tres probetas para la edad de 28 días bajo condiciones normales de curado, para su cabeceo se utilizaron almohadillas de neopreno para la cara que permaneció expuesta del molde dicho procedimiento cumple con la norma ASTM C 1231, una vez retirados los especímenes de la pleta de curado, estas se retiró el exceso de agua para su manipulación, para cuestiones estadísticas a esta prueba se destinaron 5 probetas, se determinó su masa y se midió su diámetro con el Vernier en cuatro puntos para determinar la media, se introdujo en la prensa cada espécimen sobre el disco y se centró lo más exacto posible para que la carga se repartiera de igual manera, con el nivel de mano se verifico que el disco de la prensa estuviera alineado, al cabezal se le colocó la almohadilla de neopreno, se introdujeron datos de diámetro, altura y tipo de espécimen a la prensa y se procedió a aplicar la carga, (Figura 36), aunque la prensa fue capaz de determinar el f'_c del concreto se realizaron los cálculos correspondientes dividiendo la carga de ruptura entre el área del cilindro en su sección transversal.



a) Obtención de diámetro con Vernier CPC 0.5



b) Determinación de masa del espécimen CPP 0.65 NTC



c) Especímenes de la familia CPP 0.50

Figura 36. Pesaje, medición y compresión de especímenes.

Los especímenes fueron evaluados por su tipo de ruptura según la tabla indicada en la norma reportando también si la falla fue por adherencia, por pasta cementante o por agregado.

3.10.2 Obtención de muestras para análisis microscópico

De cada espécimen sometido al ensayo de resistencia a la compresión se obtuvieron muestras de aproximadamente 1 cm, 3 muestras de la parte superior, 3 muestras de la parte media y 3 muestras de la parte inferior, a su vez se tomaron del lado derecho, izquierdo y medio, dejando un centímetro de separación de la superficie tanto en el perímetro del cilindro como 1 cm de la base y de la parte superior evitando los poros que quedan en la superficie por efectos del colado (Figura 37).

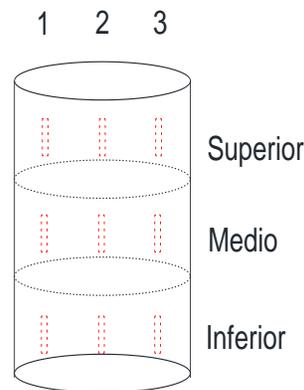


Figura 37. Diagrama de obtención de muestras.

Al tener 12 familias de concreto, a cada una le pertenecieron 5 especímenes que a su vez de cada espécimen se extrajeron 9 muestras, obteniendo un total de 540 muestras, que se

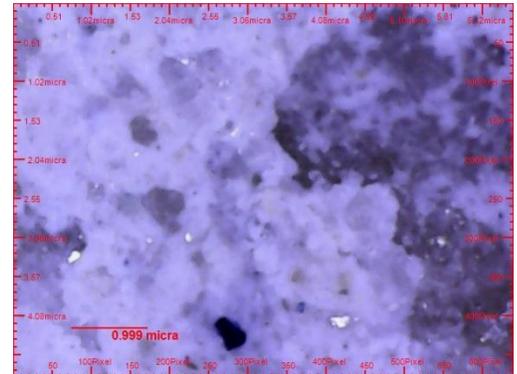
sometieron al microscopio electrónico con una aproximación de 400x, las muestras se filtraron para ver la interacción de la pasta cementante y el agregado, evaluando sus características microscópicas (Figura 38), cada muestra se denominó por el número de muestra, la zona de su obtención (superior, medio e inferior), numero de espécimen, y familia de concreto; **1SEsp.2CPP0.45**.



a) Abertura de espécimen



b) Selección y almacenamiento de muestras.



c) Muestra sometida al microscopio electrónico 400x, S1Esp.1CPP 0.65

Figura 38. Toma de muestra para barrido.

3.10.3 Módulo de elasticidad

Se realizó el ensayo siguiendo la norma ASTM C 469 donde se utilizaron tres probetas de 150mm por 300mm, la prueba se realizó cumplidos los 28 días de curado, se retiraron las probetas de la pileta de curado retirando el exceso de agua y se procedió a medir su diámetro y altura con el vernier, se determinó la masa y se les colocó los anillos del deformimetro, se nivelaron y se colocaron en cero los deformimetro, para el cabeceo se utilizaron almohadillas de neopreno, se colocó el cilindro dentro de la prensa y se ensayó, para determinar el módulo de elasticidad se utilizaron los datos de carga de ruptura (ASTM C39), de acuerdo a este dato, se aplicaron 2 precargas y 1 carga final, las 2 primeras precargas fueron al 15% de la carga de ruptura y sirvieron para calibrar los deformimetro y la carga final aumento uniformemente en ciclos de carga hasta el 40% de la carga de ruptura, se registraron las deformaciones por tonelada hasta las primeras 5 toneladas de ahí se registraron a cada 5 toneladas hasta el 40% (Figura 39), la velocidad de carga fue de acuerdo a la establecida en la norma, se registró en video para tener datos exactos de la deformación que correspondía, debido fue necesario ensayar 3 especímenes, se obtuvo el módulo de elasticidad de forma

individual y se determinó la media aritmética, el cálculo del módulo de elasticidad se obtuvo mediante la ecuación 1:

$$Ec = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - 0.005\%}$$

(1)

σ_2 = Esfuerzo correspondiente al 40% de la carga última

σ_1 = Esfuerzo correspondiente a la deformación longitudinal de 0.005%

ε_2 = Deformación longitudinal producida por el esfuerzo



a) Colocación y nivelación de anillos



b) Colocación de cilindro en prensa mecánica



c) Aplicación de carga al 40% en base a carga de ruptura

Figura 39. Módulo de elasticidad.

3.10.4 Absorción, densidad y porosidad del concreto.

Para el ensayo se utilizaron 3 probetas de 100mm de ancho por 200mm de altura, el ensayo se basó en la norma ASTM C642, al cumplirse los 28 días de curado, las muestras fueron trasladadas al interior del laboratorio en contenedores de agua para evitar pérdida de agua dentro de los especímenes, tras el paso de 28 días en la pileta de curado se tomó su estado como saturado por lo que se procedió a determinar su masa sumergida por medio de una balanza, una vez registrada, se removió cada espécimen y se eliminó el exceso de agua con un pañuelo con el fin de lograr el estado saturado superficialmente seco y se determinó su masa, se colocaron las muestras en un contenedor con agua hirviendo y se hirvieron por un periodo de 5 horas, después del lapso de tiempo se retiraron los especímenes del

contenedor, se retiró el exceso de agua y se determinó su masa, las probetas se secaron en horno (Figura 40) y se registró su masa cada 24 horas por 5 días, hasta que su masa no registró variaciones, se registró el peso seco final y se procedió a realizar los cálculos con las ecuaciones 2, 3 y 4:

$$Porosidad\ total = \frac{C - A}{C - D} \times 100 \quad (2)$$

$$Densidad\ aparente = \frac{A}{B - D} \quad (3)$$

$$Absorción = \frac{B - A}{A} \times 100 \quad (4)$$

Dónde:

A=Peso seco al horno.

B=Peso saturado.

C=Peso saturado después de hervir.

D=Peso sumergido.



a) Probetas sumergidas en agua hirviendo



b) Peso Sumergido

Figura 40. Procedimiento de muestras sumergidas.

3.11 Ensayos de durabilidad en el concreto

Para determinar la durabilidad de los concretos elaborados se sometieron a ensayos de absorción capilar, sorptividad del concreto y electro migración de cloruros forzando el ingreso del ion cloruro mediante corriente eléctrica, dichos ensayos se llevaron a cabo simultáneamente para homologar la edad de las probetas (Figura 41).

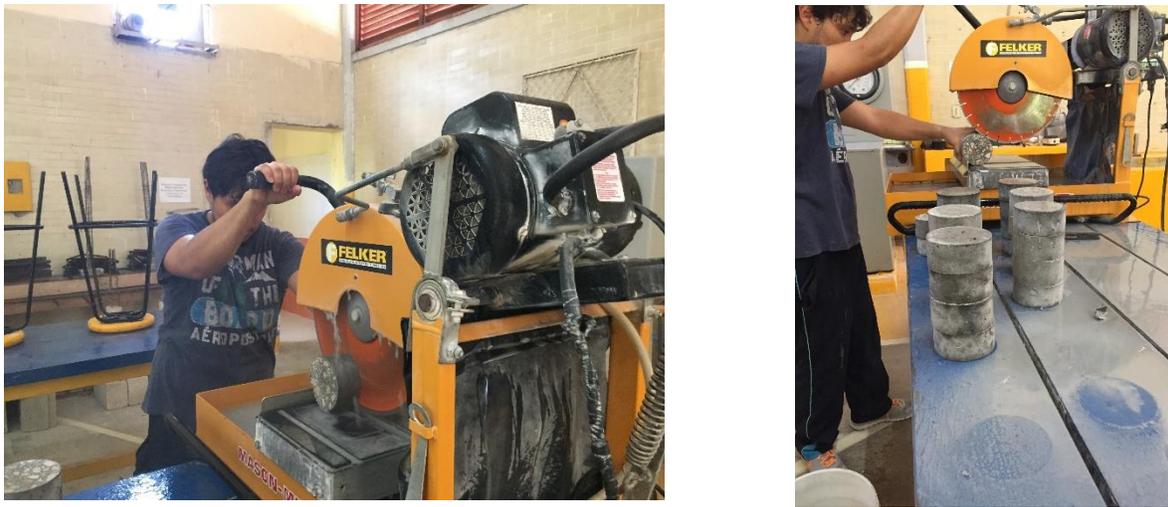


Figura 41. Ensayos NTBuild 492 y absorción capilar realizados simultáneamente.

3.11.1 Preparación de probetas para ensayos de durabilidad.

Los cilindros destinados a estas pruebas fueron las probetas de 100mm de diámetro por 200mm de alto y se destinaron dos probetas de cada familia de concretos, debido a que los ensayos requirieron que se presentara en rodajas, se procedió a dividir en cuatro partes el cilindro y mediante el equipo eléctrico se procedió a cortarlos en 4 rodajas de 50mm de alto ± 3 mm (Figura 42), debido a que el concreto no es homogéneo y las características de la rodaja inferior pueden tener variantes respecto a la rodaja superior se procedió a eliminar los extremos y a ensayar las rodajas medias, debido a que los ensayos por cuestión estadística requerían una repetitividad de 2 ensayos para obtener la media, en el primer cilindro la rodaja media superior fue destinada a cloruros y la rodaja media inferior a absorción capilar, en el segundo cilindro se invirtió el orden destinando la rodaja media superior a absorción capilar y la rodaja media inferior a cloruros con el objetivo de homogeneizar las características del

concreto, en ambas pruebas se expusieron las caras de las rodajas que cortaban por la mitad el cilindro (Figura 43).



a) Corte de rodajas de 50mm de altura.

b) Obtención de rodajas

Figura 42. Obtención de rodajas.

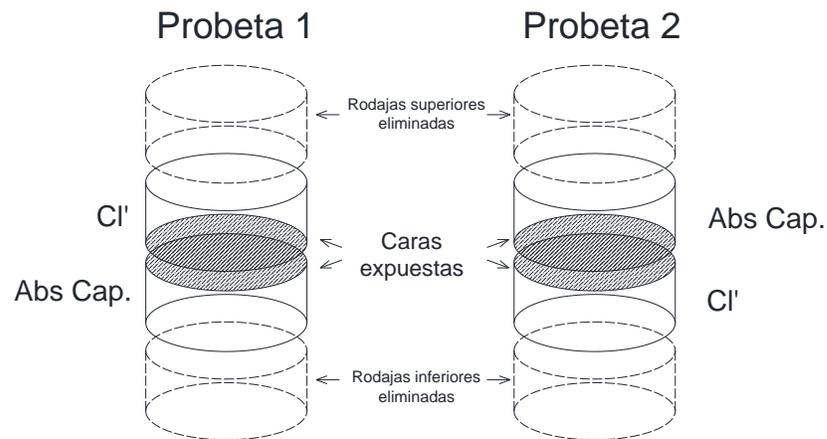


Figura 43. Distribución de rodajas para ensayo.

3.11.2 Ensayo absorción capilar ASTM C 1585

El comportamiento del concreto sometido a diferentes agentes agresivos está en función de la penetrabilidad del sistema de poro, en el concreto no saturado la velocidad de ingreso del agua o de cualquier otro líquido es controlada por la absorción, la cual depende de la dosificación del concreto, la presencia de adiciones en las mezclas, composición y

características físicas de los componentes cementicios y agregados, contenido de aire, tipo y duración de curado, presencia de microgrietas, tratamientos superficiales y tipo de puesta en obra.

El ensayo se basó en la norma ASTM C 1585 (ASTM C 1585, 2007), determinó la velocidad de absorción capilar, se midió el incremento de la masa de una muestra en función de tiempo considerando la exposición al agua de una sola cara, la superficie expuesta se sumergió en agua propiciando su ingreso mediante succión capilar en el interior, durante los minutos iniciales de la prueba.

Antes de iniciar la prueba fue necesario acondicionar las rodajas para que su humedad relativa interna al momento del ensayo fueran entre el 50% y 70%, similar a la humedad relativa encontradas en estructuras a nivel de campo (ASTM C 1585, 2007), para ello, todas las rodajas de las familias de concreto se introdujeron en la cámara climática y se programó a una temperatura de $50 \pm 2^{\circ}\text{C}$ a una humedad relativa de $80\% \pm 3\%$ durante tres días, utilizando agua desionizada para los humidificadores de la máquina, después de los 3 días cada rodaja se introdujo en un contenedor sellado por separado cuidando que la rodaja no tocara la pared de los contenedores y estos estuvieron debidamente sellados, se dejaron reposar por 15 días a una temperatura ambiente de $23^{\circ} \pm 2^{\circ}$, se sacaron del contenedor y se determinó la masa del espécimen (antes del sellado) al igual que su diámetro y altura, se procedió al sellado con pintura epóxica con el fin de sellar los poros de la superficie perimetral de la rodaja, se dejó secar y en la cara que no se dejó expuesta al agua se cubrió con plástico sujetado con ligas con el fin de mantener la humedad en el interior y se procedió a pesar la rodaja, se elaboraron bases de tubos de PVC con muescas con el fin de soportar las rodajas durante la prueba, se realizó una programación de acuerdo a los tiempos de pesaje de cada rodaja con el fin que no hubiera interferencia entre ellas para reducir las tolerancias y se apegó al horario establecido, se colocó agua en la bandeja, se colocó el soporte y con ayuda del Vernier se colocaron muescas en las rodajas indicando la altura máxima a la que debía de llegar la superficie del agua apegándose a los 2mm que indica la norma y se comenzó la prueba, en el pesaje se levantó la rodaja de acuerdo al tiempo programado, se retiró el exceso de agua con un trapo húmedo y se giró la rodaja para evitar que la cara de contacto tocara la balanza y se determinó su masa así subsecuentemente con los horarios

programados en la tabla 8 se muestra el horario de mediciones (Figura 44). Una vez obtenidos los datos se graficaron obteniendo la absorción inicial y la absorción secundaria, con ellas se determinó el tiempo y mediante el método de Fagerlund se determinó la sorptividad del elemento.

Tabla 8. Horario y tolerancias de mediciones.

| | | | | | | | | | | |
|------------|-----|-------|--------|--------|--------|--------|--------------------|-------------------------------|--|-------------------------|
| Tiempo | 60s | 5 min | 10 min | 20 min | 30 min | 60 min | Cada hora hasta 6h | Una vez al día hasta el 3 día | 3 medidas separada 24 h hasta el día 7 | 1 medida hasta el día 9 |
| Tolerancia | 2s | 10s | 2 min | 2 min | 2 min | 2 min | 5 min | 2 h | 2h | 2h |



a) Rodajas en cámara climática



b) Acondicionamiento a 50°C y 80% HR



c) Reposo de 15 días a 25°C



d) Sellado de rodajas



e) Determinación de la masa
Figura 44. Determinación de masa.

3.11.3 Diseño y construcción de la celda NTBuild 492

Para llevar a cabo la prueba de electro migración fue necesario la construcción del contenedor, las bases, el ánodo y el cátodo, se basó en estudios previos (Camacho, 2014; Villagrán, 2012; Vega, 2015; González, 2014) así como el departamento de transporte de Florida siguiendo la norma NT BUILD 492 (Figura 45), para el propio diseño de la celda.



a) (Camacho, 2014)



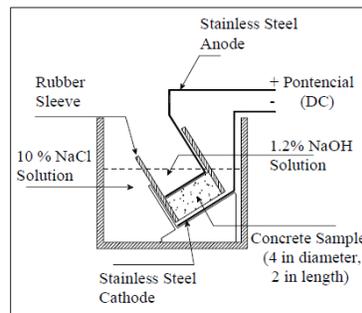
b) (Villagrán, 2012)



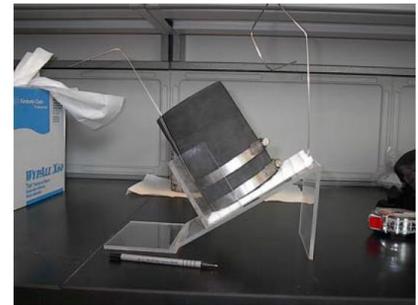
c) (Vega, 2015)



d) (González, 2014)



e) NTBuild 492



f) FDOT

Figura 45. Ensayos de la norma NT BUILD 492.

Se presentó el diseño final el cual se construyó a base de acrílico, y se utilizó el ánodo y cátodo de acero inoxidable (Figura 46).

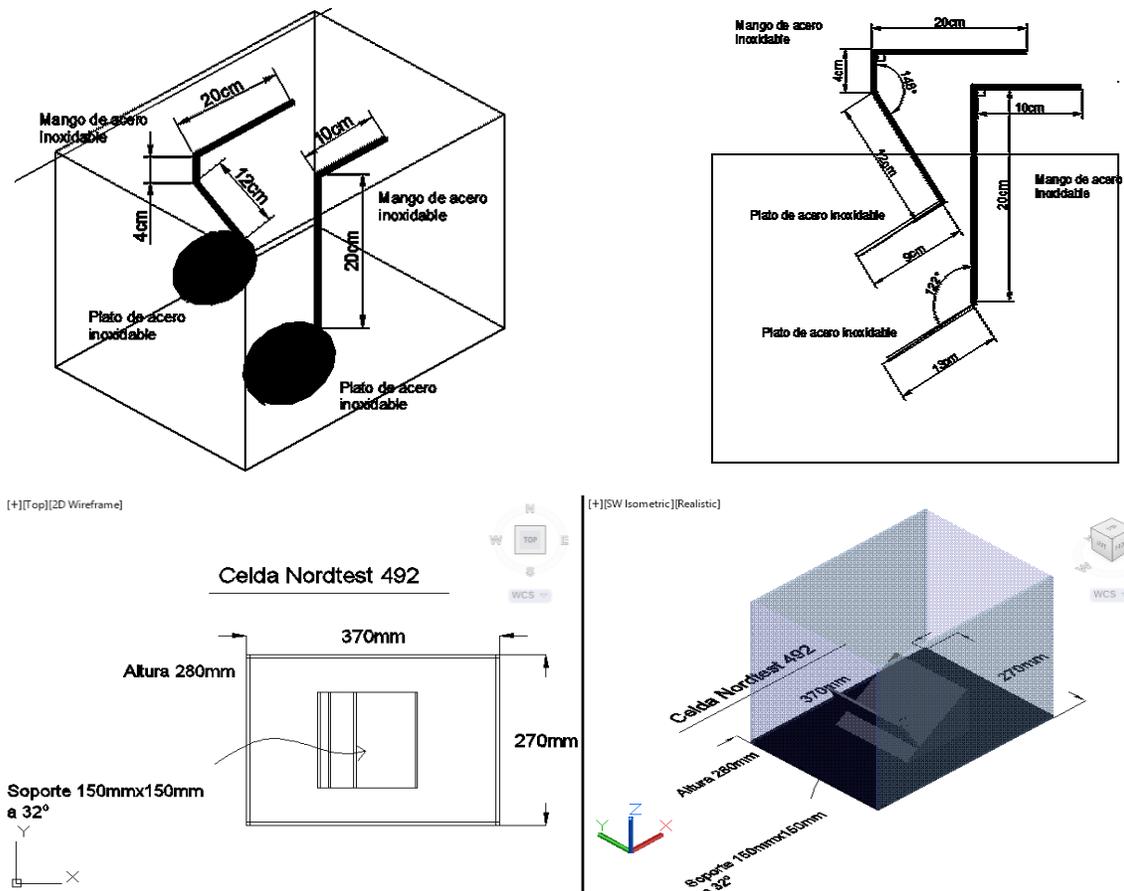


Figura 46. Especificaciones pecera y base.

Se supervisó que las medidas y materiales fueran de acuerdo a lo diseñado y apegado a la norma NTBuild 492 (Figura 47 y 48).



Figura 47. Construcción de celda NTBuild 492.



Figura 48. Despiece de celda.

3.11.4 Penetración rápida de cloruros

El ensayo de migración de cloruros en el interior del concreto a través de la solución contenida en la red porosa, es un proceso que ocurre bajo la aplicación de un campo eléctrico externo el cual moviliza las especies iónicas con la finalidad de acelerar el movimiento de los iones cloruro (Figura 51) y obtener resultados a corto plazo para evaluar la durabilidad del concreto.

La normativa aplicada correspondió a la norma NT BUILD 492 (NT Build 492, 1999), la cual determina el coeficiente de migración en estado no estacionario (Figura 52), se aplica en el concreto endurecido, el coeficiente de migración de cloruros determinado en este método es un valor indicativo de la resistencia que el material opone a la penetración de cloruros.

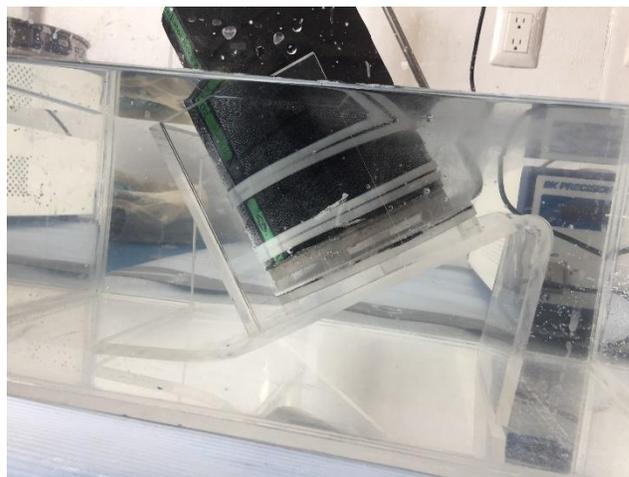
El método requirió probetas cilíndricas con un diámetro de 100 mm y un espesor de 50 mm, extraídas de probetas previamente elaboradas en el laboratorio. Se procedió a ensayar dos rodajas, el principio teórico se basó en la inducción de un potencial eléctrico aplicado axialmente a través de la muestra, forzando los iones cloruros localizados en la solución a migrar hacia el interior.

Para la preparación del ensayo la muestra sometida se introdujo en una manga de caucho y se selló con silicón al ras de la manga en el exterior (cara expuesta a la prueba) y en el interior, para ayudar al sellado se apretó con cuatro cinchos plásticos con el fin de prevenir cualquier filtración, se colocó el cátodo en la plataforma y sobre él se colocó el anillo base donde se apoyó la muestra con la manga de caucho con la cara expuesta a ensayar hacia

abajo y con una separación del cátodo de 15mm., el cloruro de sodio NaCl utilizado fue a base de sal de grano, y el agua utilizada fue purificada, la base de la solución catódica fue el 10% de NaCl en peso del H₂O utilizada, por los 12 litros de agua se utilizó 1333.33 gr. de NaCl, para la solución anódica la base fue de 0.3M NaOH en agua desionizada (12 gr. por litro de agua), por cada prueba se utilizó 300 ml de solución anódica, la solución catódica se introdujo en la celda cuidando que esta no se introdujera dentro de la manga de caucho en el espécimen, la solución anódica se introdujo dentro de la manga de caucho, ambas soluciones estuvieron en el rango de los 25°C y se registraron, al introducir el ánodo dentro de la solución anódica se conectó al potencióstato: el cátodo al polo negativo y el ánodo al polo positivo y se inició la prueba (Figura 49).



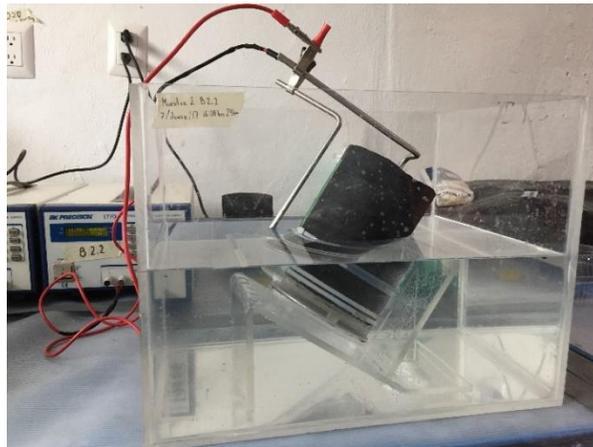
a) 1333.33 gr. NaCl



b) Especimen sellado en solución catódica



c) Registro de temperatura solución NaOH



d) Conexión de cátodo y ánodo al potencióstato

Figura 49. Proceso NT BUILD 492.

Al inicio de la prueba se le aplicó un voltaje de 30V y se registró la corriente inicial que de acuerdo a la Tabla 1 del apéndice 2 de la NTBuild 492 indicó un reajuste en el voltaje, después del reajuste se registró la nueva corriente inicial la cual de acuerdo a la Tabla 1 del apéndice 2 de la norma indicó el tiempo de duración de la prueba (Figura 50), se monitoreó la prueba en su transcurso haciendo reajustes necesarios de los límites indicados en la Tabla 1 del apéndice 2 de la norma.



Corriente inicial a 30V CPC 0.65 NTC.



Ajuste a 15V CPC 0.65 NTC, 24h. Duración.

Figura 50. Proceso del ajuste en voltaje en la prueba.

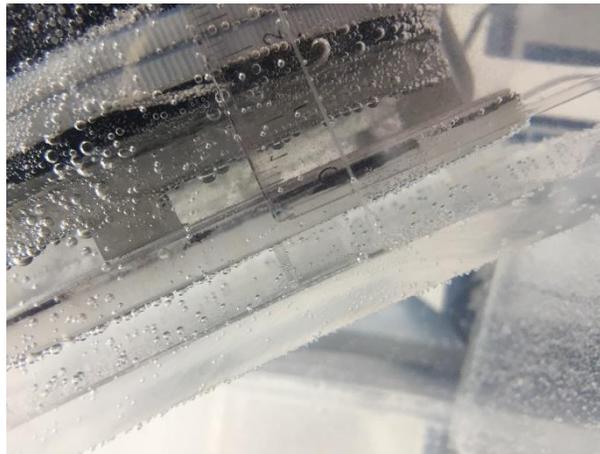


Figura 51. Separación 15mm entre cara expuesta de la muestra y cátodo.

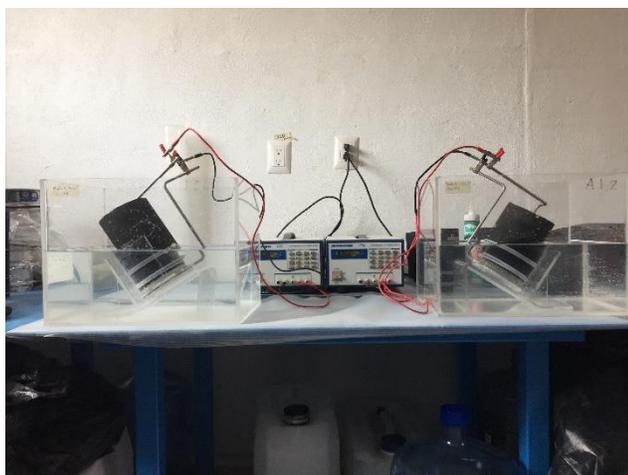


Figura 52. Ensayo permeabilidad rápida de cloruros NTBuild 492.

Al concluir el lapso establecido en la norma se interrumpió el paso de corriente, se registraron las temperaturas de ambas soluciones, se procedió a retirar la manga de caucho con el espécimen, se removieron los residuos de las soluciones y se procedió a remover la rodaja del caucho, la muestra se cortó axialmente con ayuda de marro y cincel para evitar que se corra el frente de penetración en la rodaja y se roció nitrato de plata en la superficie para obtener la profundidad de penetración del ion cloruro utilizando método colorimétrico, la solución de nitrato de plata se preparó en base a $0.1M \text{ AgNO}_3$ en agua desionizada, con un atomizador y uso de guantes se roció la rodaja, la reacción química de la solución con el cloruro de plata generó una zona visible de cloro blanco (Figura 53).



a) Nitrato de Plata para método colorimétrico



b) Medición de penetración con Vernier

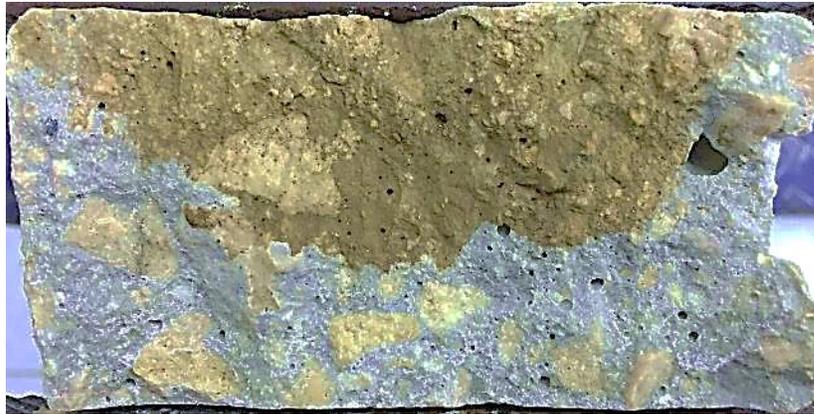


Figura 53. Profundidad de penetración muestra CPC 0.65.

Se identificó el frente de penetración de cloruros mediante la diferencia de color de la superficie alcanzada por el ion cloruro y con el vernier se realizaron mediciones del frente de penetración espaciadas a cada 10mm, eliminando 10mm de los extremos, las mediciones en donde el ingreso del ion cloruro era bloqueado por un agregado fueron eliminadas o movidas según el caso que se presentó. El cálculo del coeficiente de migración en estado no estacionario se obtuvo mediante la ecuación 5 de la norma NTBuild 492 la cual es una simplificación de la segunda ley de Fick aplicada a este método:

$$D_{nssm} = \frac{0.0239(273 + T)L}{(U - 2)t} \cdot \left(X_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273 + T)L X_d}{U - 2}} \right) \quad (5)$$

Donde:

- D_{nssm} : Coeficiente de migración en estado no estacionario $\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$.
- U : Valor absoluto del voltaje aplicado, V.
- T : Valor promedio de la temperatura inicial y final de la solución anólito, °C.
- L : Espesor del espécimen, mm.
- X_d : Valor promedio de la profundidad de penetración, mm.
- t : Duración de la prueba, hora.

Capítulo 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Caracterización de agregados.

La calidad de los agregados ensayados fue evaluada de acuerdo a las características que estos registraron en los diversos ensayos a los que fueron sometidos, dichas características fueron comparadas con estudios realizados de agregados de origen calizo de alta absorción de la región de estudio con el fin de determinar si son de buena o de mala calidad para ser utilizados en el diseño de mezclas de concreto (Moreno y Solís-Carcaño, 2008), una de las principales características a evaluar fue su granulometría la cual respecto al agregado grueso se encontró dentro de las curvas de los límites marcados por la norma ASTM C 33 (Figura 54), siendo esta la adecuada.

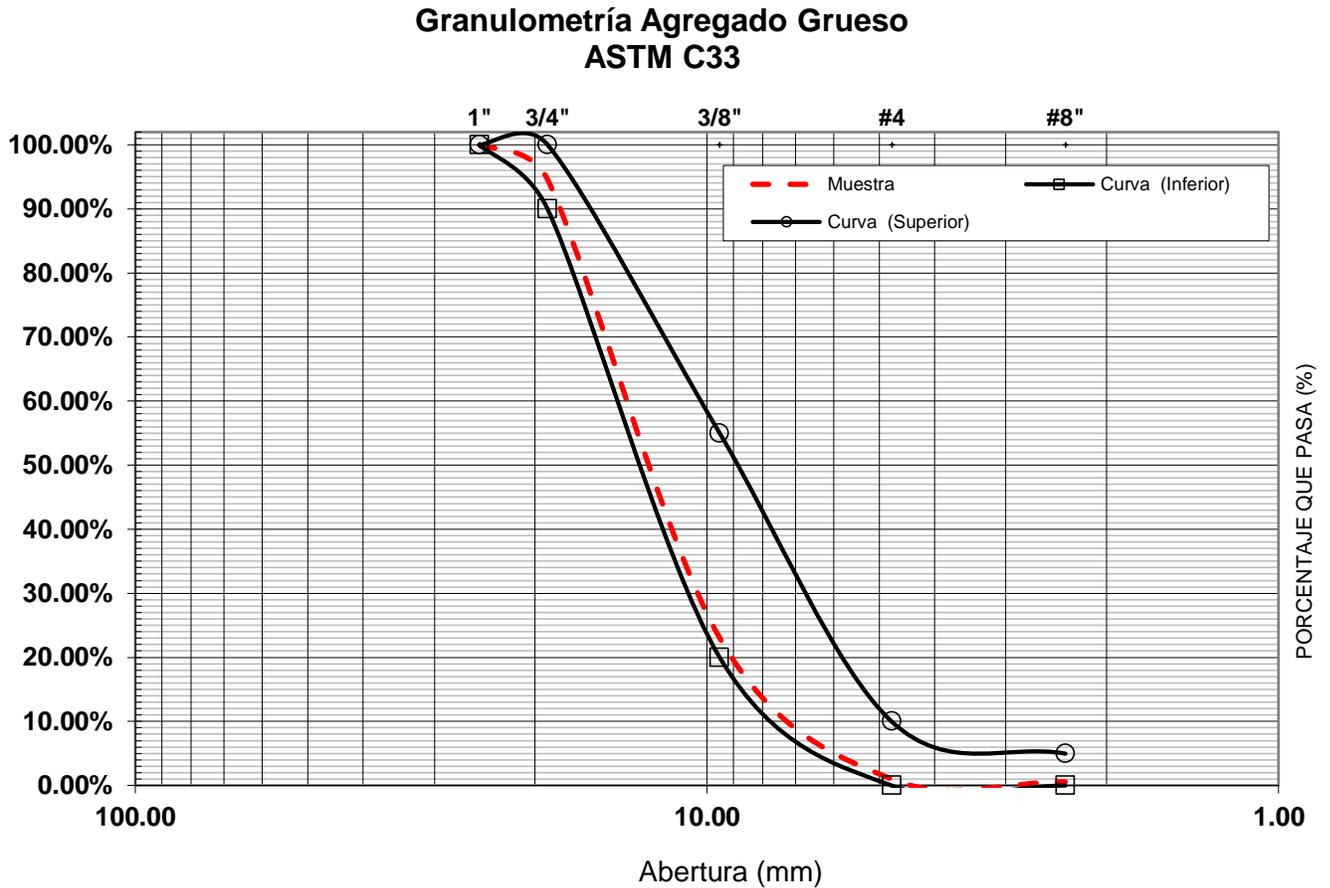


Figura 54. Granulometría agregado grueso.

Respecto al agregado fino la curva que registro se encontró dentro de los límites establecidos en la norma exceptuando el material que pasa por la malla No. 100 en la cual el material sobresale de la curva superior en un 7.90% (Figura 55), indicando que el material destinado a esa abertura contiene más partículas de las establecidas en los límites.

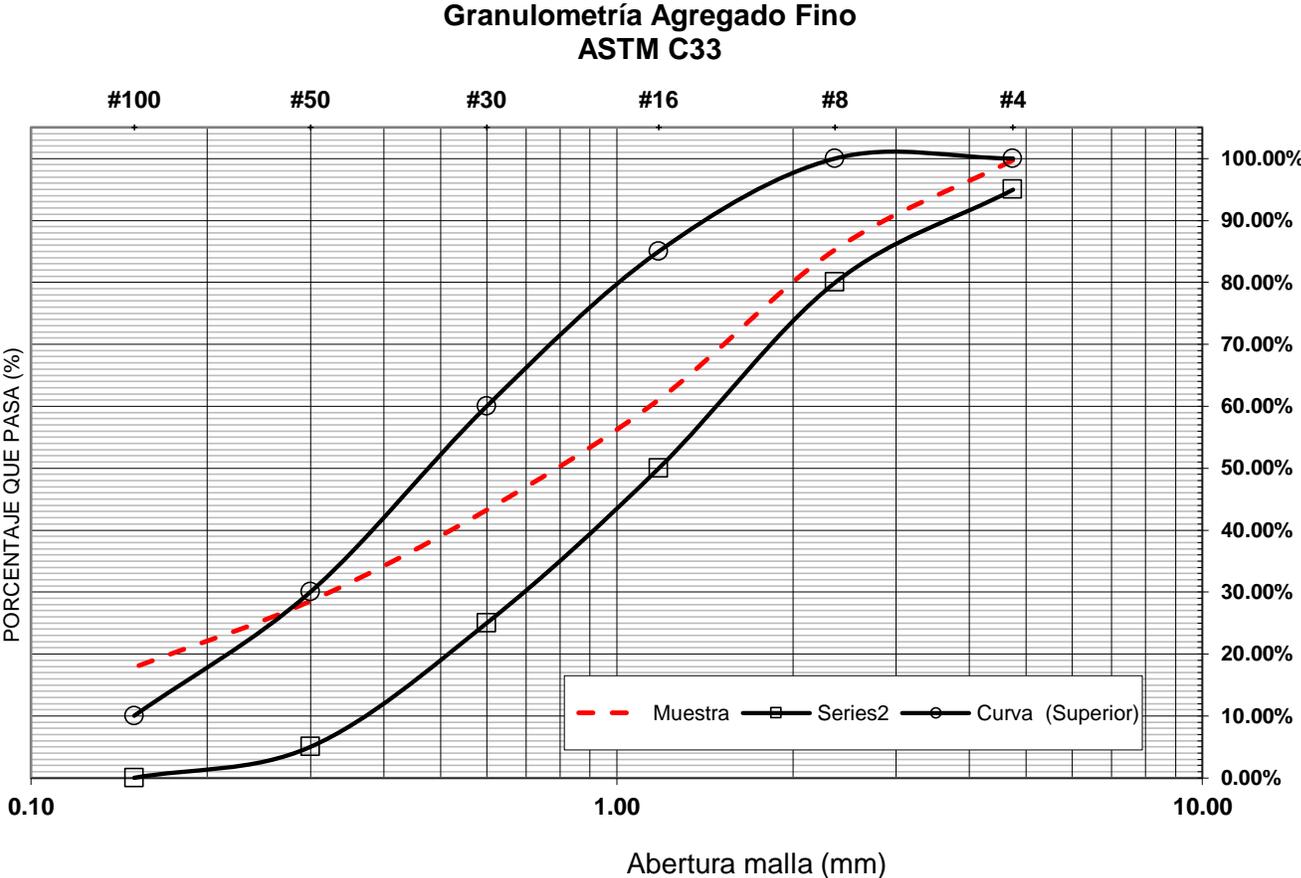


Figura 55. Granulometría agregado fino.

Se realizaron las pruebas físicas de los agregados y los resultados se resumen en la Tabla 9 evaluando su calidad de agregado altamente absorbente.

Tabla 9. Característica física de los agregados.

| | FINO | GRUESO |
|---------------------------|-------------|---------------|
| %MF | 2.64% | --- |
| Densidad relativa | 2.77 | 2.40 |
| Densidad relativa SSS | 2.64 | 2.47 |
| % Absorción | 2.88 | 3.27 |
| Peso vol. Suelto kg/m3 | 1570.25 | 1254.62 |
| Peso vol. Varillado kg/m3 | 1718.55 | 1391.15 |
| % Desgaste | --- | 24.55% |

Tabla 10. Características del agregado fino (Moreno y Solís-Carcaño, 2008).

| Agregado Fino | Peso Vol. Suelto kg/cm2 | Densidad Relativa SSS | Absorción | %Fino |
|----------------------|--------------------------------|------------------------------|------------------|--------------|
| BUENA CALIDAD | >1350 | >2.50 | <4.5 | <15 |
| MALA CALIDAD | <1300 | <2.45 | >6.00 | >19 |

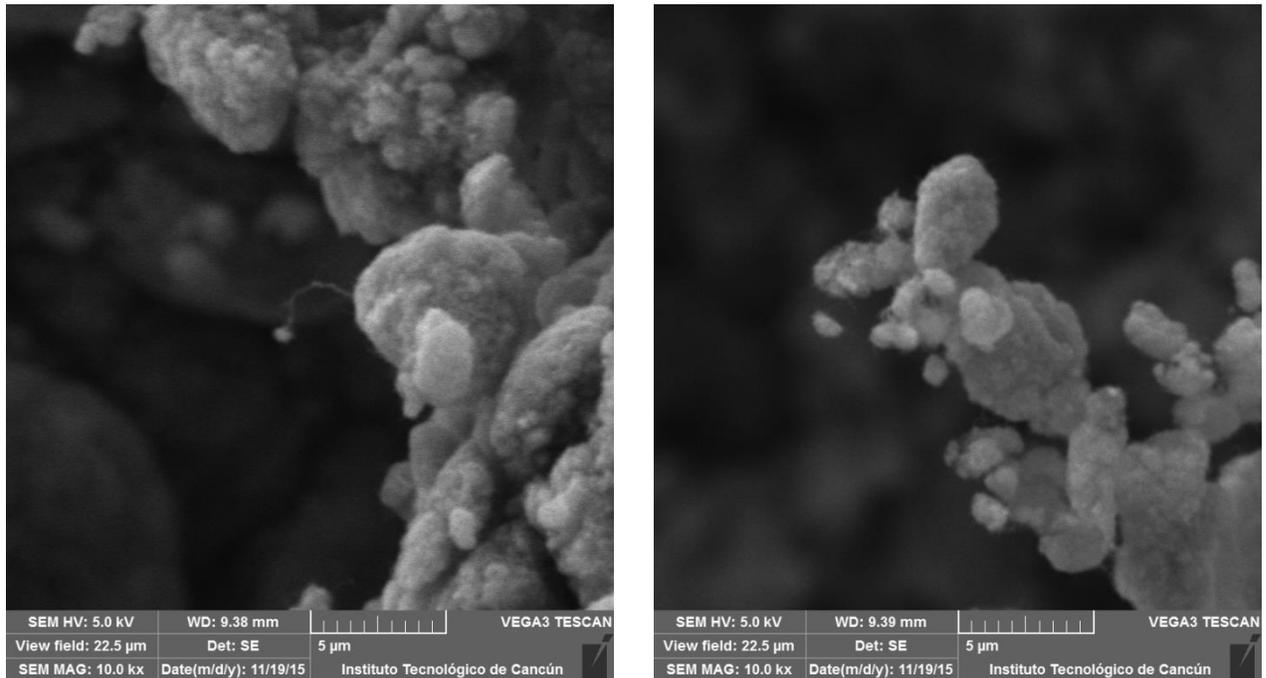
Tabla 11. Características del agregado grueso (Moreno y Solís-Carcaño, 2008).

| Agregado Grueso | Peso Vol. Compactado kg/cm2 | Densidad Relativa SSS | Absorción | %Abrasión |
|------------------------|------------------------------------|------------------------------|------------------|------------------|
| BUENA CALIDAD | >1300 | >2.35 | <5.80 | <28 |
| MALA CALIDAD | <1260 | <2.30 | >7.00 | >35 |

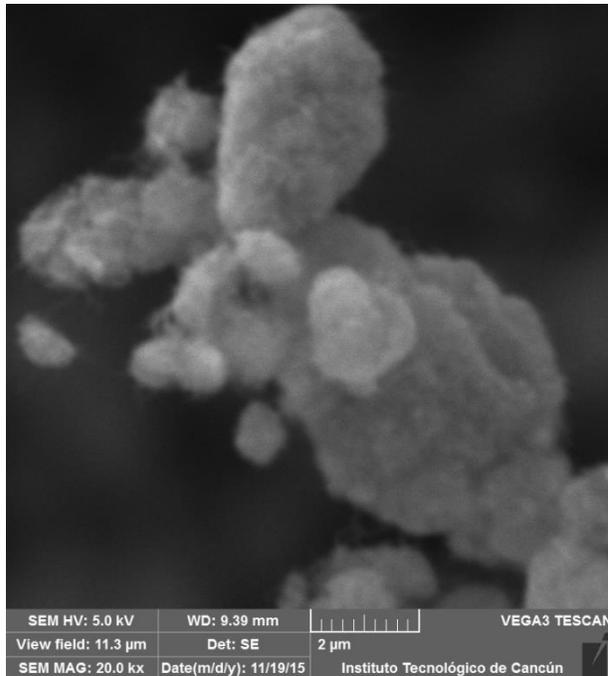
Los agregados mostraron características favorables y permisibles con respecto a agregados calizos altamente absorbentes evaluándolos según estudios previos como se muestra en la tabla 10 y 11 de dichas características fueron utilizadas en el diseño de mezclas para la elaboración de las familias de concreto.

4.2 Caracterización de nanotubos de carbono multipared.

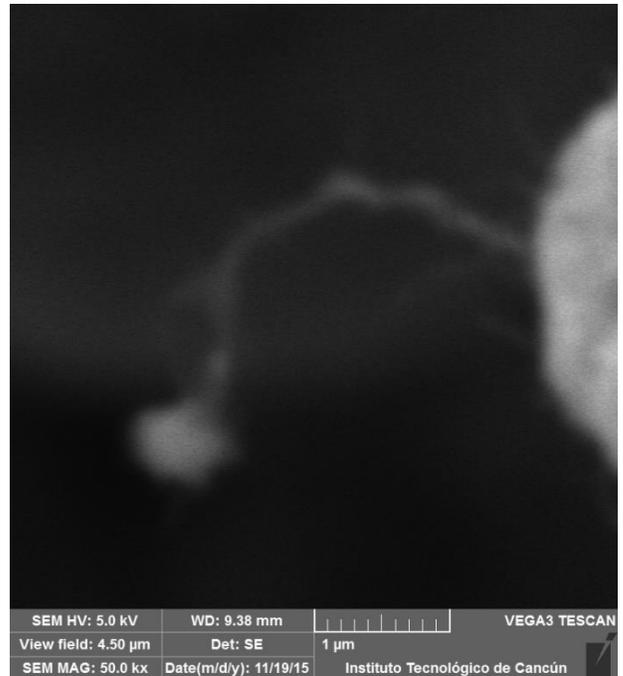
Ya que los nanotubos de carbono multipared funcionalizados para concreto utilizados fueron de origen comercial fue necesario someterlos a un análisis específico bajo el microscopio electrónico de barrido, con el cual se obtuvieron las características y su composición química al igual que se obtuvieron imágenes a un nivel micro y nanoscópico donde se apreciaron filamentos a un acercamiento de 10000x, 20000x y 50000x (Figura 56), característicos de la estructura cilíndrica de los nanotubos de carbono multipared con una longitud aproximada a 3µm promedio, el estudio arrojó dichas estructuras cilíndricas en zonas localizadas ya que la mayor parte del material en su composición fue carbón amorfo, por lo que la cristalinidad y la presencia de sulfuro indico impuresas en la obtención de los NTCM del material se vio comprometida.



a) SEM 10000x



b) SEM 20000x



c) SEM 50000x

Figura 56. SEM 10000x, 20000x, 50000x.

Respecto a su composición química elemental (Tabla 12) se encontró la presencia de carbono siendo este el principal elemento en el compuesto, aluminio, acero, sulfuro y oxígeno complementaron la composición del material utilizado como se muestra en la figura 57.

Tabla 12. Composición química nanotubos de carbono multicapa.

| Elemento | Unn. C | Norm. C | Atom. C |
|----------|--------|---------|---------|
| | Wt. % | Wt. % | At. % |
| Carbon | 97.05 | 97.05 | 98.22 |
| Aluminio | 0.56 | 0.56 | 0.25 |
| Acero | 0.45 | 0.45 | 0.09 |
| Sulfuro | 0.11 | 0.11 | 0.04 |
| Oxigeno | 1.82 | 1.82 | 1.38 |
| | 100% | 100% | 100% |

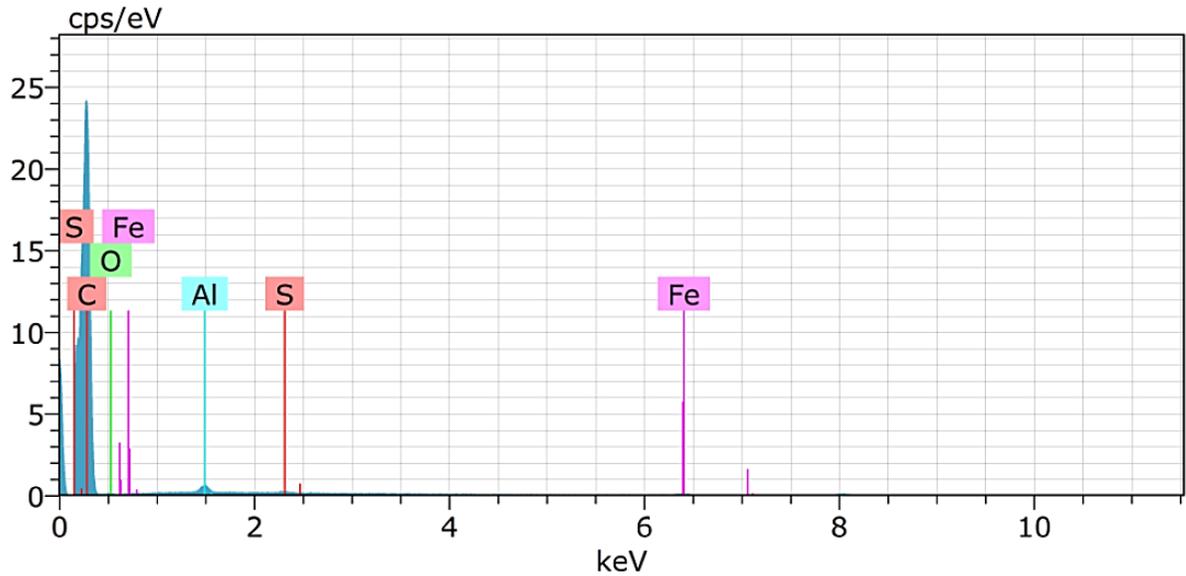


Figura 57. Espectro Nanotubos de Carbono Multipared (CTNM).

Aunque la presencia de carbono amorfo es mayor a las estructuras cilíndricas de los nanotubos de carbono multipared, se pudieron observar su presencia por lo que se procedió a utilizarlos en la presente investigación.

4.3 Diseño de mezclas método ACI.

Para el diseño de mezclas de las diferentes familias de concreto que de acuerdo a la metodología planteada, y a la combinación de variables, relación agua-cemento, porcentaje de adición de nanotubos de carbono multipared y tipo de cemento, resultaron ser 12 familias de concreto, identificando las familias primeramente por su tipo de cementante **CPP** (Cemento Portland Puzolánico), **CPC** (Cemento Portland Compuesto), seguido por su relación agua-cemento (0.45, 0.50 y 0.65) y por último el porcentaje de adición de nanotubos de carbono multipared, 0.5% y 0% omitiendo este último en la nomenclatura de las familias, con respecto a la adición de nanotubos de carbono multipared no se modificó la dosificación de los materiales y el porcentaje fue respecto al peso de cemento, el método de diseño de mezclas utilizado fue el ACI 211, por volumen absoluto, es decir se obtuvo la dosificación de los materiales correspondientes a 1m³ de concreto, se decidió a utilizar este método debido a que las características de los agregados calizos de la región la variación de peso por metro cubico de concreto a lo establecido por la ACI es impredecible. Un aspecto importante que

se cuidó fue la absorción de los agregados y su corrección por humedad respecto al agua de mezclado, tomando en cuenta el agregado en estado saturado superficialmente seco para poder mediar el agua, de acuerdo a la literatura (O'Reily) se tomó como base el 80% del agua de mezclado y de ahí se partió para lograr la trabajabilidad establecida, a pesar de que se tenían relaciones agua-cemento bajas como 0.45, no se utilizó aditivo fluidificante ya que las familias de control estuvieron dentro de la tolerancia del revenimiento establecido, con respecto a la adición de nanotubos de carbono multipared no se modificó la dosificación de los materiales y estas quedaron establecidas como en la tabla 13.

Tabla 13. Dosificación familias de concreto kg/m³.

| | Familia | Agua | CPP | CPC | Grava | Arena | CTNM |
|-----|--------------------------|-------------|------------|------------|--------------|--------------|-------------|
| 1. | CPC 0.65 | 205 | --- | 315 | 884 | 836 | --- |
| 2. | CPP 0.65 | 205 | 315 | --- | 884 | 836 | --- |
| 3. | CPC 0.65 0.5% NTC | 205 | --- | 315 | 884 | 836 | 1.575 |
| 4. | CPP 0.65 0.5% NTC | 205 | 315 | --- | 884 | 836 | 1.575 |
| 5. | CPC 0.50 | 205 | --- | 410 | 884 | 757 | --- |
| 6. | CPP 0.50 | 205 | 410 | --- | 884 | 757 | --- |
| 7. | CPC 0.50 0.5% NTC | 205 | --- | 410 | 884 | 757 | 2.05 |
| 8. | CPP 0.50 0.5% NTC | 205 | 410 | --- | 884 | 757 | 2.05 |
| 9. | CPC 0.45 | 205 | --- | 455 | 884 | 718 | --- |
| 10. | CPP 0.45 | 205 | 455 | --- | 884 | 718 | --- |
| 11. | CPC 0.45 0.5% NTC | 205 | --- | 455 | 884 | 718 | 1.278 |
| 12. | CPP 0.45 0.5% NTC | 205 | 455 | --- | 884 | 718 | 1.278 |

4.4 Concretos en estado fresco

Después de ser vaciado el concreto en la charola metálica y homogenizado a pala se procedió a colar las probetas mientras se realizaban los ensayos al concreto en estado fresco simultáneamente para evitar su pronto endurecimiento, las pruebas realizadas se basaron en las normas ASTM, determinando el peso volumétrico, el revenimiento y contenido de aire resumiendo los resultados en la tabla 14.

Tabla 14. Resultados en concreto fresco.

| | Familia | Revenimiento | Peso volumétrico | Contenido aire % |
|----|-------------------|--------------|------------------|------------------|
| 1 | CPP 0.65 | 10.00 | 2248.10 | 3.70 |
| 2 | CPP 0.50 | 9.50 | 2255.29 | 3.50 |
| 3 | CPP 0.45 | 7.50 | 2263.93 | 3.40 |
| 4 | CPP 0.65 NTC 0.5% | 8.50 | 2254.27 | 3.40 |
| 5 | CPP 0.50 NTC 0.5% | 7.00 | 2265.58 | 2.90 |
| 6 | CPP 0.45 NTC 0.5% | 5.30 | 2272.78 | 2.75 |
| 7 | CPC 0.65 | 9.50 | 2249.54 | 3.80 |
| 8 | CPC 0.50 | 9.00 | 2286.77 | 3.00 |
| 9 | CPC 0.45 | 8.00 | 2290.47 | 2.80 |
| 10 | CPC 0.65 NTC 0.5% | 9.40 | 2248.10 | 3.20 |
| 11 | CPC 0.50 NTC 0.5% | 8.00 | 2277.92 | 2.80 |
| 12 | CPC 0.45 NTC 0.5% | 7.20 | 2278.74 | 2.75 |

4.4.1 Observaciones durante el mezclado

Las características inmediatas que se pudieron observar fueron que tras la adición de NTCM a la mezcla esta se torna más espesa y de color gris oscuro con respecto al concreto elaborado con CPC, los concretos elaborados con CPP se tornaron de un color gris-café respecto a las CPC (Figura 58).



a) Concreto base CPP



b) Concreto base CPC



c) Concreto CPP NTCM

Figura 58. Diferencias visibles.

Durante el amasado a las relaciones a las que se les añadió NTCM estos fueron previamente mezclados con agua de la mezcla y medios mecánicos para promover su dispersión sin embargo estos solos con agua mostraron dificultad y aglomeración de los NTCM por lo que se añadió parte del cemento CPP y CPC según correspondía a cada familia, esta adición

facilito su dispersión en la mezcla la cual resulto en un líquido espeso y de tonalidad negra que se agregó a la revolvedora (Figura 59).



Figura 59. Dispersión NTCM.

Se observó que el CPC demanda menos agua en la dosificación pudiendo mediar el agua para alcanzar el revenimiento necesario en comparación al CPP puede deberse a que el Clinker de cemento tarda menor tiempo en formar productos de hidratación en comparación a la puzolana, respecto a los concretos elaborados con NTCM, demando mayor agua en la dosificación que los otros cementantes ensayados, utilizando el 100% del agua establecida en el diseño de mezcla y aun así mostró bajo revenimiento durante su estado fresco, en el proceso de varillado y al golpeo con el mazo de hule en pruebas y en las probetas, se observaba que los NTCM subían quedando aglomerados entre la pasta de cemento (Figura 60) observando que no se logró una buena dispersión de ellos en la mezcla.



Figura 60. Aglomeración NTCM en concreto estado fresco.

4.4.2 Revenimiento

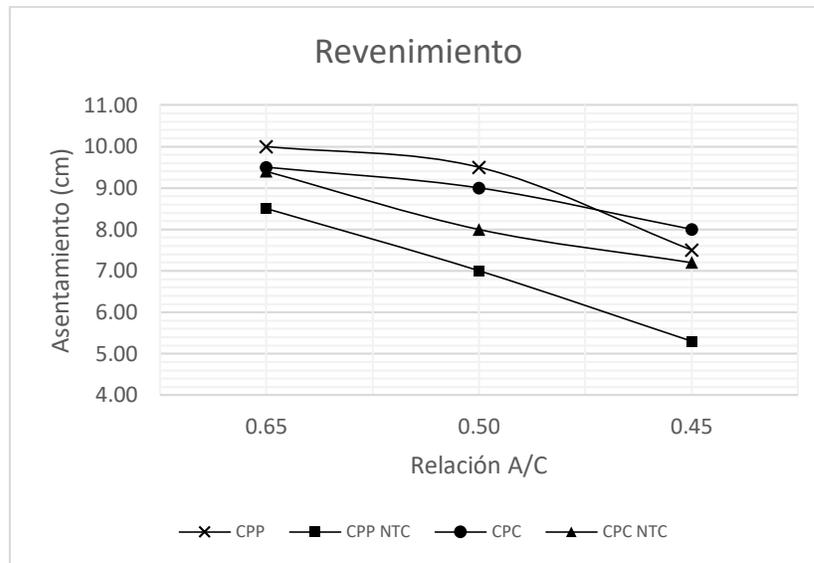


Figura 61. Revenimiento de concreto.

El revenimiento establecido en el diseño de mezclas de las familias de concreto fue de 10cm. \pm 2.5 cm, en donde todas las familias de la relación 0.65 a/c, cumplieron con lo establecido siendo las adicionadas con NTCM las de trabajabilidad más baja, en las familias de concreto de relación 0.50 a/c, la única fuera de lo establecido fue la CPP NTCM saliendo del límite establecido, las relaciones de concreto de 0.45 a/c mostraron baja trabajabilidad sin embargo al ser una relación baja fue permisible para los concretos elaborados con CPP y CPC sin el uso de un aditivo fluidificante, las más bajas fueron las adicionadas con NTCM donde la CPP NTCM mostro un revenimiento muy bajo y fuera de los límites establecidos por lo que el concreto presento difícil trabajabilidad la comparativa se muestra en la figura 61.

4.4.3 Peso Volumétrico

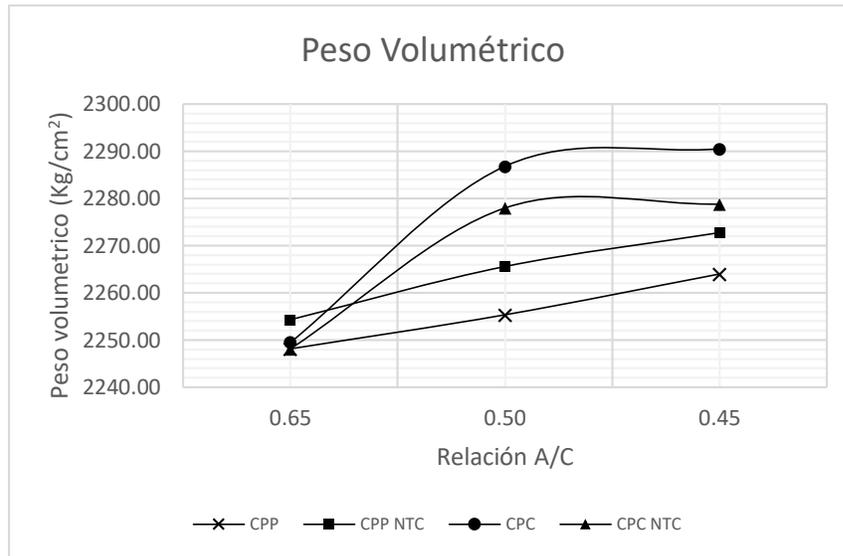


Figura 62. Peso volumétrico.

El peso volumétrico de todas las familias de concretos estuvo por debajo de los 2300 kg/m³ siendo más ligeros los elaborados con CPP en familias con relación a/c 0.5 y 0.45, y mostrando una tendencia más uniforme conforme se reduce la relación a/c (Figura 62).

4.4.4 Porcentaje de aire atrapado

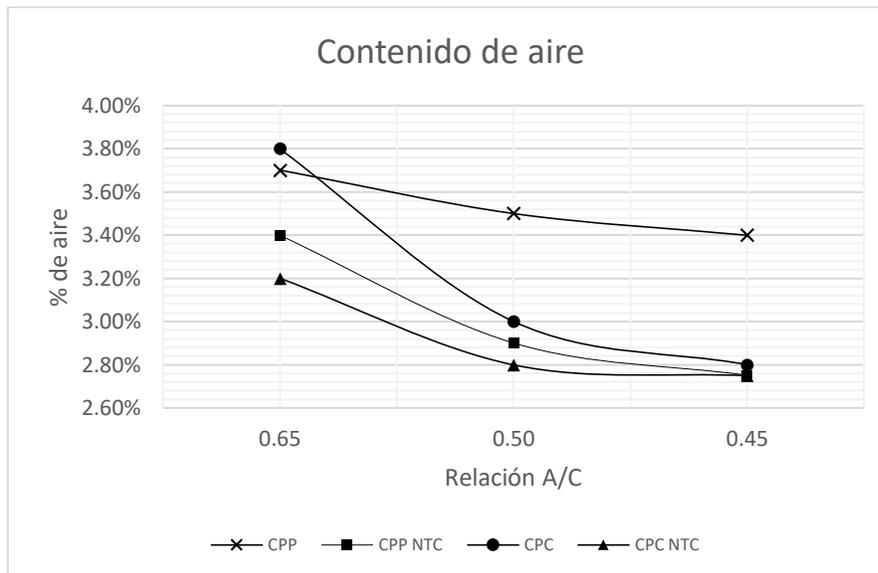


Figura 63. Contenido de aire.

Respecto al porcentaje de aire incluido se determina que para un agregado calizo altamente absorbente dentro de la mezcla de concreto el porcentaje debe de estar entre el 3% y 4%, las familias de concretos ensayadas se encontraron entre los 2.70% y 3.80% mostrando que los concretos elaborados con CPP NTCM, CPC, CPP NTC tuvieron un decremento uniforme caso contrario con los concretos elaborados con CPP, los cuales se observó mayor % de aire incluido con respecto a las relaciones 0.50 y 0.45 (Figura 63).

4.4 Concretos en estado endurecido

Después de su desmolde las probetas se sometieron a curado por inmersión en un lapso de 28 días, de las cuales las probetas de 100mm x 200mm se sometieron a pruebas físicas de absorción, densidad y porosidad.

4.4.1 Pruebas físicas en los concretos

Las pruebas físicas se ven resumidas en la tabla 15.

Tabla 15. Porcentajes de absorción densidad y porosidad de los concretos.

| | Familia | Absorción % | Densidad | Porosidad% |
|----|-------------------|-------------|----------|------------|
| 1 | CPP 0.65 | 11.12 | 2.03 | 21.45 |
| 2 | CPP 0.50 | 10.67 | 2.04 | 21.04 |
| 3 | CPP 0.45 | 10.58 | 2.04 | 20.91 |
| 4 | CPP 0.65 NTC 0.5% | 10.72 | 2.06 | 21.32 |
| 5 | CPP 0.50 NTC 0.5% | 10.69 | 2.04 | 21.24 |
| 6 | CPP 0.45 NTC 0.5% | 11.26 | 2.02 | 21.86 |
| 7 | CPC 0.65 | 10.86 | 2.08 | 21.42 |
| 8 | CPC 0.50 | 9.11 | 2.10 | 18.01 |
| 9 | CPC 0.45 | 8.83 | 2.11 | 17.66 |
| 10 | CPC 0.65 NTC 0.5% | 9.47 | 2.09 | 18.71 |
| 11 | CPC 0.50NTC 0.5% | 9.06 | 2.10 | 18.14 |
| 12 | CPC 0.45 NTC 0.5% | 9.25 | 2.08 | 18.37 |

Absorción

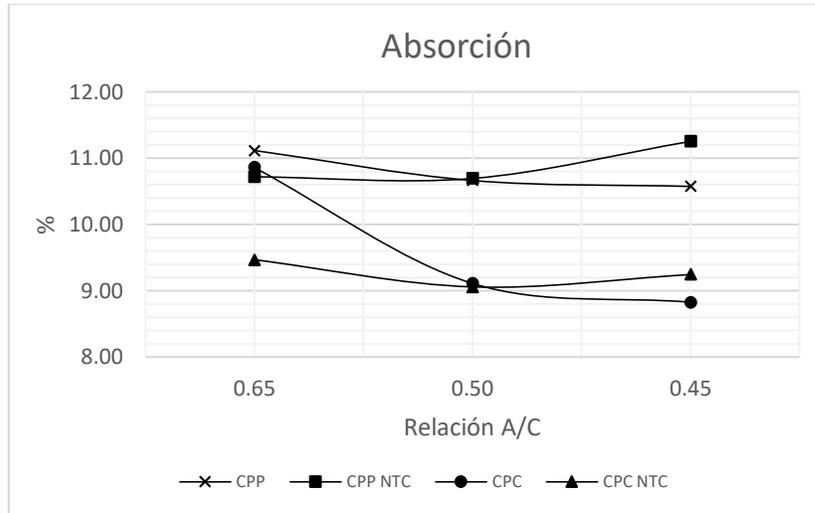


Figura 64. Grafica de absorción 0.65, 0.5, 0.45.

El concreto a base de cemento CPC mostro mayor desempeño a la absorción para una relación a/c 0.45, mientras que el concreto a base de CPP NTCM resulto el más absorbente de las 12 familias de concreto, en las familias con relación a/c 0.50 los resultados con y sin adición de NTCM para cada cemento respectivamente no se observaron mayores variaciones compartiendo un 10.68% para CPP y CPP NTCM y un 9.09% para el CPC y CPC NTCM, mostrando un mayor desempeño el cemento CPC ante el CPP, para las relaciones a/c 0.65, el mayor desempeño ante la absorción fueron los concretos adicionados con NTCM siendo el CPP de menor desempeño para dicha relación (Figura 64).

Densidad

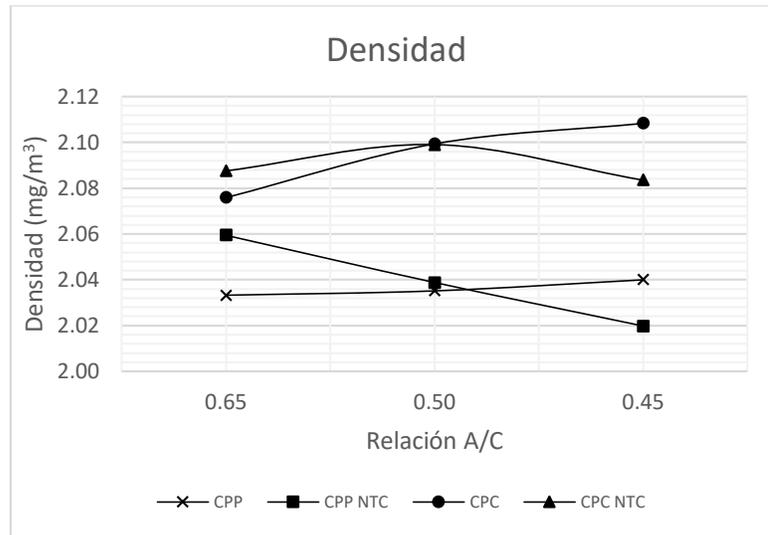


Figura 65. Densidad en relaciones agua/cemento 0.65, 0.50, 0.45.

El CPP mostro densidades más bajas respecto al CPC, tanto en los controles como en los adicionados con NTC, la densidad más alta para todas las familias de concreto fueron las de la relación 0.45 a/c del CPC, resultando menor la densidad del concreto CPP NTCM, las densidades en la relación de 0.5 a/c resultaron similares con y sin adición de NTCM en el CPC y mayor el CPP NTCM respecto al CPP, para la relación 0.65 a/c los concretos adicionados con NTCM tuvieron mayor densidad a los concretos sin adición en el CPC y CPP respectivamente (Figura 65).

Porosidad

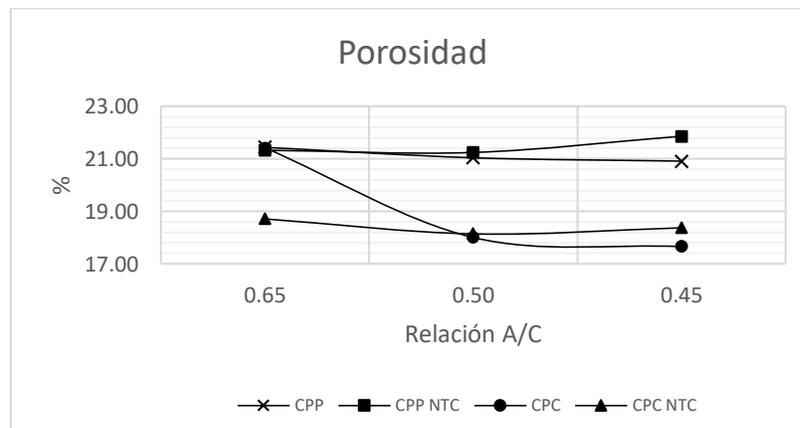


Figura 66. Porosidad en relaciones agua/cemento 0.65, 0.50, 0.45.

Con respecto a la porosidad los concretos adicionados con NTCM resultaron ser más porosos a los de sin adición, a excepción de la relación 0.65 a/c donde el CPP resulto más poroso respecto al CPP NTCM, los concretos a base de CPC con y sin adición resultaron menos porosos a los CPP con y sin adición exceptuando la relación 0.65 a/c donde el concreto a base de CPP NTCM resulto menos poroso que el concreto CPC y el CPC NTCM resulto el menos poroso de esta relación (Figura 66).

4.4.2 Pruebas mecánicas en los concretos

Resistencia a la compresión

Los resultados mecánicos de los concretos se muestran resumidos en la tabla 16.

Tabla 16. Resistencia a compresión de los concretos CPP, CPC c/n y sin nanotubos

| Mezcla | Fc | |
|-------------------|--------------------|-------|
| | Kg/cm ² | MPa |
| CPP 0.65 | 268.21 | 26.30 |
| CPP 0.50 | 358.75 | 35.18 |
| CPP 0.45 | 418.94 | 41.08 |
| CPP 0.65 NTC 0.5% | 222.76 | 21.85 |
| CPP 0.50 NTC 0.5% | 319.91 | 31.37 |
| CPP 0.45 NTC 0.5% | 345.58 | 33.89 |
| CPC 0.65 | 254.61 | 24.97 |
| CPC 0.50 | 376.88 | 36.96 |
| CPC 0.45 | 410.52 | 40.26 |
| CPC 0.65 NTC 0.5% | 218.65 | 21.44 |
| CPC 0.50NTC 0.5% | 319.69 | 31.35 |
| CPC 0.45 NTC 0.5% | 348.09 | 34.14 |

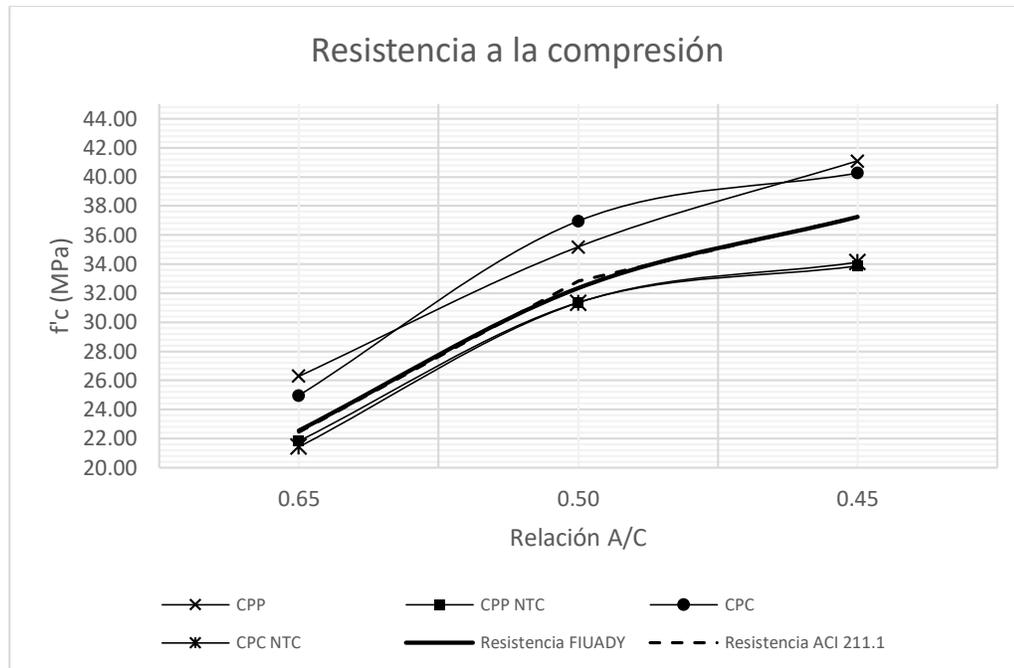


Figura 67. Resistencia a compresión

Los concretos adicionados con nanotubos de carbono multipared tanto en concretos con CPP como con CPC resultaron tener un bajo desempeño a la compresión axial, el concreto CPP 0.65 NTCM disminuyo un 17% su resistencia a la compresión en comparación al CPP 0.65, el concreto a base de CPC 0.65 NTCM disminuyo un 14% respecto al CPC 0.65, el concreto CPP 0.50 NTCM disminuyo un 11% respecto al CPP 0.50, el concreto CPC 0.50 NTCM disminuyó en un 16% respecto al CPC 0.50, el concreto CPP 0.45 NTCM disminuyo un 18% respecto al CPP 0.45 y el concreto CPC 0.45 NTCM disminuyo un 15% respecto al CPC 0.45, se observó que en los concretos tanto con base cemento CPC como con CPC al ser adicionados con NTCM estoy disminuyen en promedio un 15% su resistencia a la compresión, se observó que los adicionados con NTCM no alcanzan las resistencias a la compresión de diseño las cuales se tomaron en base a estudios de la FIUADY, ni por las establecidas por la ACI 211.1 (Figura 67), y los resultados con adición entre los dos tipos de cementante fueron similares entre las tres relaciones a/c.

Respecto a los concretos si adición estos mostraron el desempeño esperado al de diseño sobrepasando en un 12% para el concreto a base de CPP el cual mostro un mejor desempeño en las relaciones a/c 0.65 y 0.45, mientras que el CPC mostro un mayor

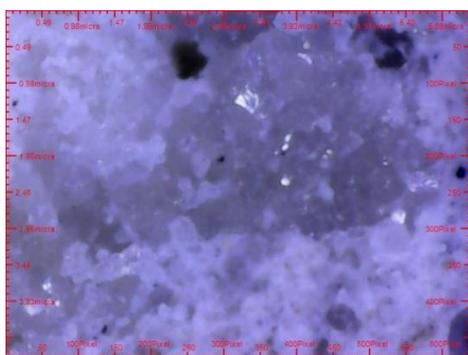
desempeño en la relación 0.50, este sobrepaso en un 11% a lo diseñado. Los concretos para las relaciones 0.65 y 0.50 adicionados con NTCM en CPP, estuvieron 3% por debajo a lo diseñado, en la relación 0.45 igual adicionados con NTCM en CPP, estuvieron un 9% bajos por lo diseñado, respecto a los CPC NTCM en la relación 0.65 estuvieron en un 5% por debajo a lo diseñado, en la relación 0.50 estuvieron un 3% y en la 0.45 un 8% por debajo.

Se pudo observar que la principal causa de falla en los concretos adicionados con NTCM fue por adherencia, ya que se apreciaba un claro desprendimiento entre el agregado y la pasta de cemento, la zona de interface no logro una buena interacción debido a la falta de dispersión de los NTCM, el concreto se disgregaba y se desprendía en lascas que seguían la forma del agregado (Figura 68), es por ello que dichos concretos mostraron un menor desempeño ante la compresión axial.

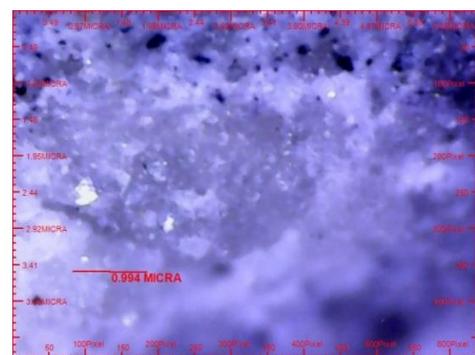


Figura 68. Ensayo de resistencia a la compresión en concretos con adición NTCM.

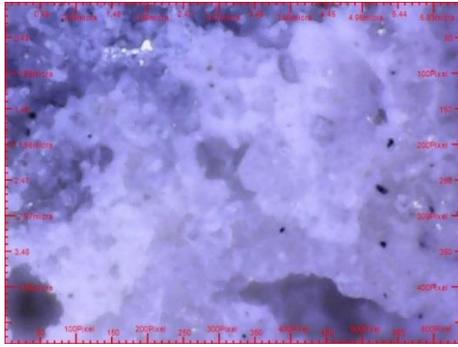
Análisis de microscopía óptica unifocal (micrografías)



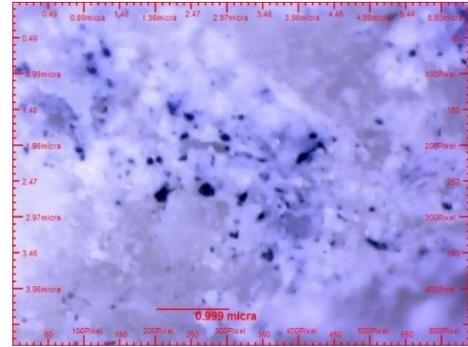
a) Zona de interfase pasta de cemento-agregado CPP 0.65



b) Zona de interfase pasta de cemento-agregado CPP 0.65 NTCM



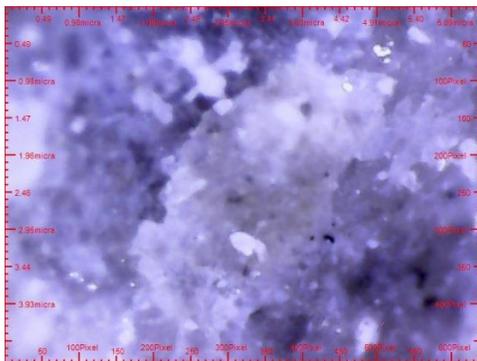
c) Zona de interfase pasta de cemento-agregado CPC 0.65



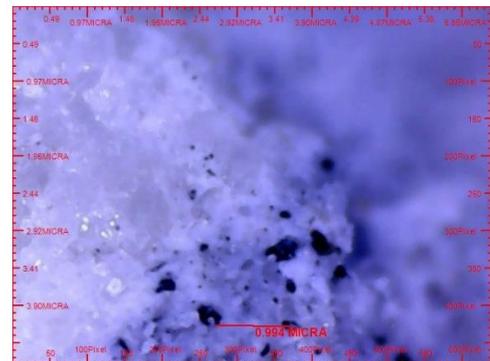
d) Zona de interfase pasta de cemento-agregado CPC 0.65 NTCM

Figura 69. Zona de interfaz pasta de cemento/agregado relación 0.65.

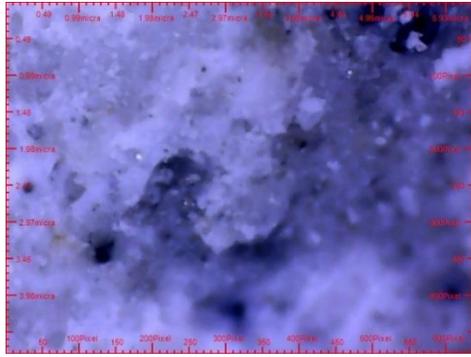
En las relaciones 0.65 del concreto a base de CPP se observó la cristalización al contorno del agregado calizo con poros de 0.5 micras de tamaño, mientras que en los adicionados con NTCM se aprecia la aglomeración de NTCM alrededor del agregado en grupos de 0.25 micras de tamaño. El concreto CPC 0.65 mostro una mejor interface entre el agregado y la pasta de cemento, dentro de la pasta de cemento se encontraron diversos poros con un diámetro aproximado de 0.1 micras, respecto al CPC 0.65 NTCM se observaron agrupaciones de NTCM en la pasta de cemento de 0.25 micras de diámetro, faltó la dispersión de estos en la mezcla (Figura 69).



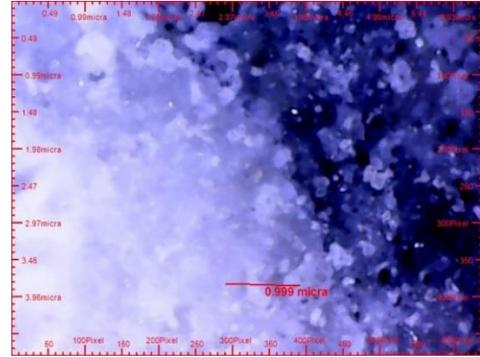
a) Zona de interfase pasta de cemento-agregado CPP 0.50



b) Zona de interfase pasta de cemento-agregado CPP 0.50



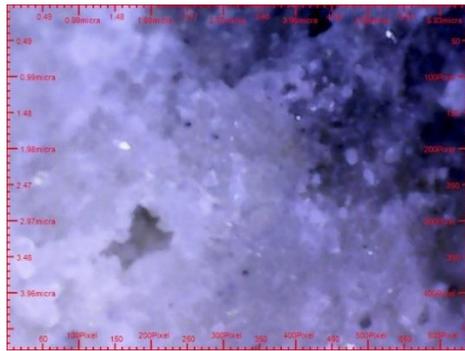
c) Zona de interfase pasta de cemento-agregado CPC 0.50



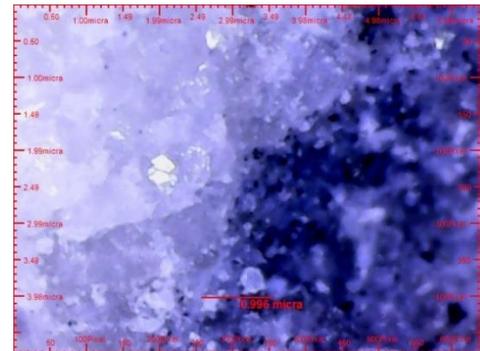
d) Zona de interfase pasta de cemento-agregado CPC 0.50 NTCM

Figura 70. Zona de interfaz pasta de cemento/agregado relación 0.50.

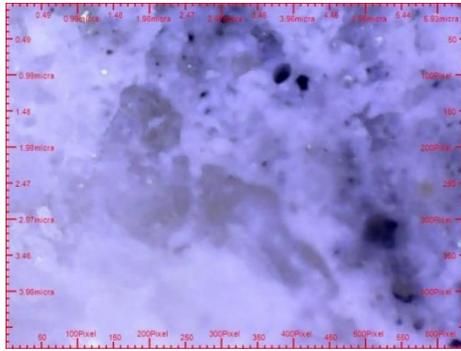
En los concretos con relaciones 0.50 respecto al cemento CPP se observó que los poros del agregado eran cubiertos por NTCM como efecto de relleno dichos poros poseían un tamaño promedio de 0.5micras, mientras que los poros observados en la pasta cementante del CPP 0.50 eran de aproximadamente 0.1micras, en el concreto CPC 0.50 se pudo apreciar un buen anclaje de la pasta de cemento en el agregado e apreciaron poros de 0.50 micras de longitud, en la CPC 0.5 NTCM se observaron productos de hidratación entre la pasta de cemento y el agregado calizo, sin embargo se veía la delimitación entre ambos (Figura 70).



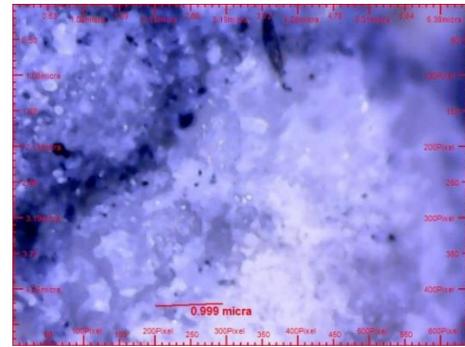
a) Zona de interfase pasta de cemento-agregado CPP 0.45



b) Zona de interfase pasta de cemento-agregado CPP 0.45 NTCM



c) Zona de interfase pasta de cemento-agregado CPC 0.45



d) Zona de interfase pasta de cemento-agregado CPC 0.45 NTCM

Figura 71. Zona de interfaz pasta de cemento/agregado relación 0.45.

En el análisis microscópico se pudieron observar los productos de hidratación formados por el gel C-H-S (silicatos de calcio hidratados) en forma de cristales, se observa que en el concreto CPP 0.45 la pasta de cemento se funde con el agregado calizo relleno de los microporos de su superficie, en la zona de interface del concreto CPP 0.45 NTCM se observó que existe una delimitación entre la pasta cementante y el agregado, provocando que esta no se adhiera correctamente a la superficie del agregado y provoque los desprendimientos observados, en el CPC 0.45 a pesar de verse una buena adherencia entre la pasta y el agregado se pudieron observar poros que iban de los 0.3 a los 0.5 micras de diámetro, se apreció en el CPC 0.45 NTCM que las aglomeraciones de los NTCM se daban alrededor de los agregados, esto pudo ser factor para dificultar la adherencia de la pasta de cemento y la grava (Figura 71).

Módulo de elasticidad en concretos

Después del análisis entre la carga de ruptura, el esfuerzo y la deformación se obtuvo el módulo de elasticidad para cada familia de concreto de las cuales se obtuvieron los datos mostrados en la Tabla 17.

Tabla 17. Módulo de elasticidad de concretos.

| | Familia | Ec (GPa) |
|----|--------------|----------|
| 1 | CPP 0.65 | 28.06 |
| 2 | CPC 0.65 | 24.81 |
| 3 | CPP 0.65 NTC | 25.58 |
| 4 | CPC 0.65 NTC | 25.23 |
| 5 | CPP 0.50 | 32.80 |
| 6 | CPC 0.50 | 31.81 |
| 7 | CPP 0.50 NTC | 28.84 |
| 8 | CPC 0.50 NTC | 29.53 |
| 9 | CPP 0.45 | 29.60 |
| 10 | CPC 0.45 | 32.92 |
| 11 | CPP 0.45 NTC | 29.10 |
| 12 | CPC 0.45 NTC | 32.87 |

Para diferenciar las características respecto al módulo de elasticidad se graficaron los datos, incluyendo las tres tipos de relaciones a/c 0.65, 0.50 y 0.45 así como los diferentes cementantes CPP, CPC, CPP NTCM, CPC NTCM (Figura 72).

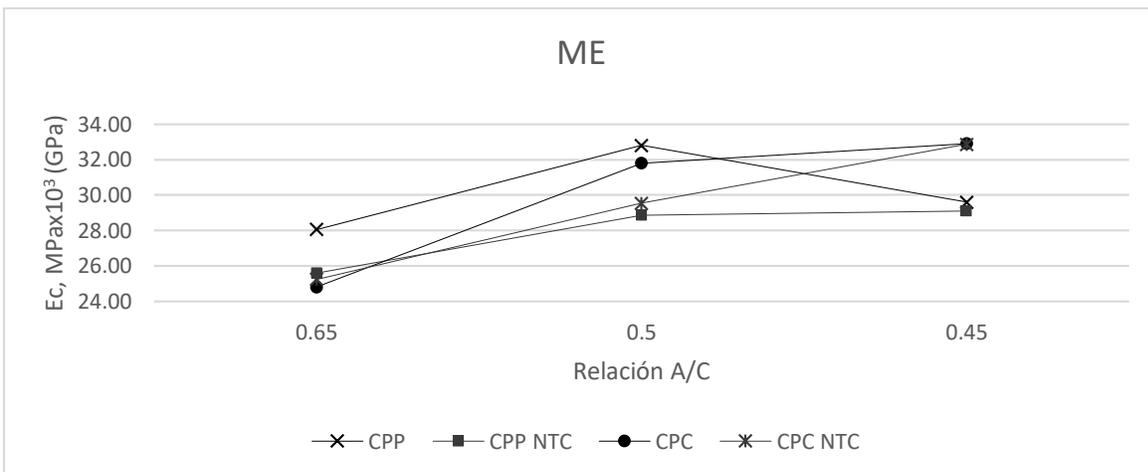


Figura 72. Comportamiento de módulo de elasticidad con diferentes tipos de concreto.

Se aprecia que los valores correspondientes al módulo elástico son similares en la relación **0.45 a/c** para los concretos elaborados con similares cementos con y sin adición, los elaborados con CPC fueron superiores a los elaborados con CPP, dentro de los CPP los adicionados con NTCM resultaron más bajos en un 2% que el CPP sin adición, respecto al CPC NTCM estuvo 0.15% bajo respecto al CPC.

En la relación **0.50 a/c** los concretos adicionados con NTCM muestran valores inferiores que los de sin adición, el concreto elaborado con CPP superó al CPC en un 3%, mientras que el concreto elaborado con CPC NTCM incremento en un 2%, respecto al CPP NTCM.

Para la relación **0.65 a/c** el concreto elaborado con CPP sin adición resulto tener valores superiores frente a las demás familias de concreto de similar relación a/c, seguido por su similar con adición CPP NTCM mostrando resultados similares a los concretos CPC NTCM y CPC, resultando este último con valores inferiores a los demás.

Se muestran la relación esfuerzo deformación para los tres tipos de relación a/c para la relación **0.65** el concreto a base de CPP mostro un mejor desempeño que el CPC sin ningún tipo de adición, los concretos elaborados con NTCM mostraron disminución en la relación siendo el CPC NTCM el inferior (Figura 73), para la relación **0.50** los concretos elaborados con CPP y CPC mostraron rendimientos similares de esfuerzo deformación entre ellos, siendo el concreto a base de CPC sin adición el superior a los demás de esta relación, los concretos con adición de NTCM tanto en CPC como en CPP mostraron rendimientos similares siendo el CPP NTCM superior al CPC NTCM (Figura 74), en la relación **0.45** el concreto a base de CPC mostro una mayor deformación a un mayor esfuerzo, seguida por el concreto CPP, a diferencia de las otras relaciones en esta los concretos adicionados con NTCM mostraron comportamientos diferentes (Figura 75), el concreto a base de CPP NTCM mostro una mayor deformación a menor esfuerzo en comparación al CPC NTCM.

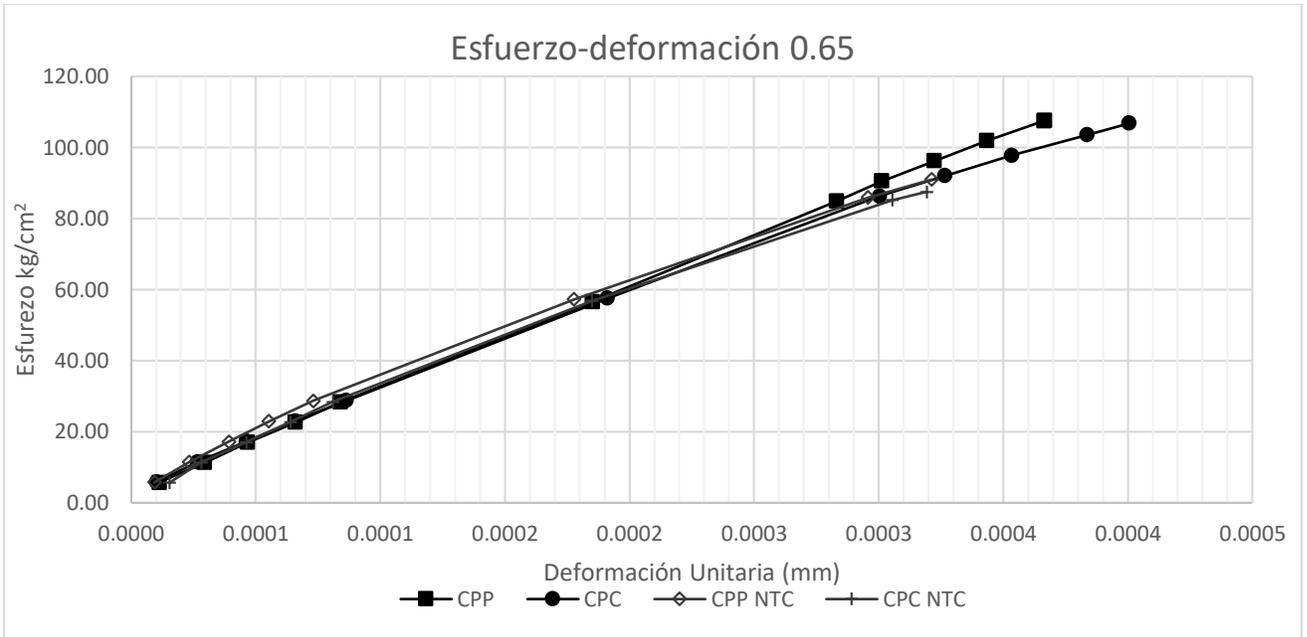


Figura 73. Esfuerzo deformación 0.65.

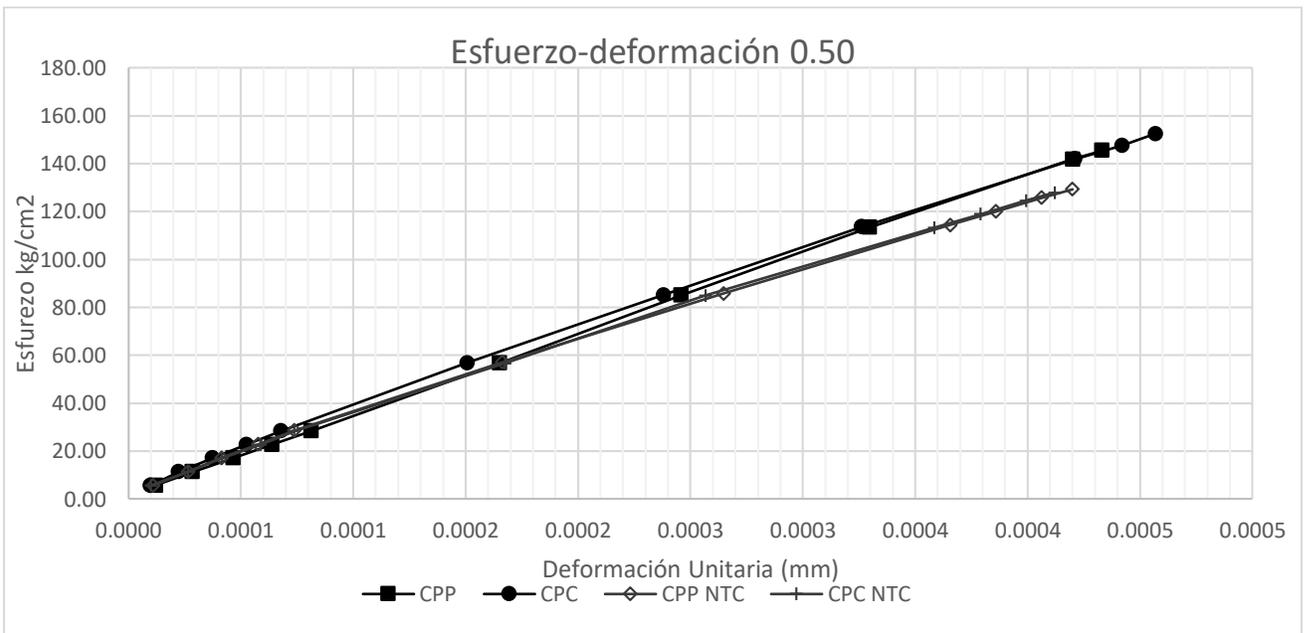


Figura 74. Esfuerzo deformación 0.50.

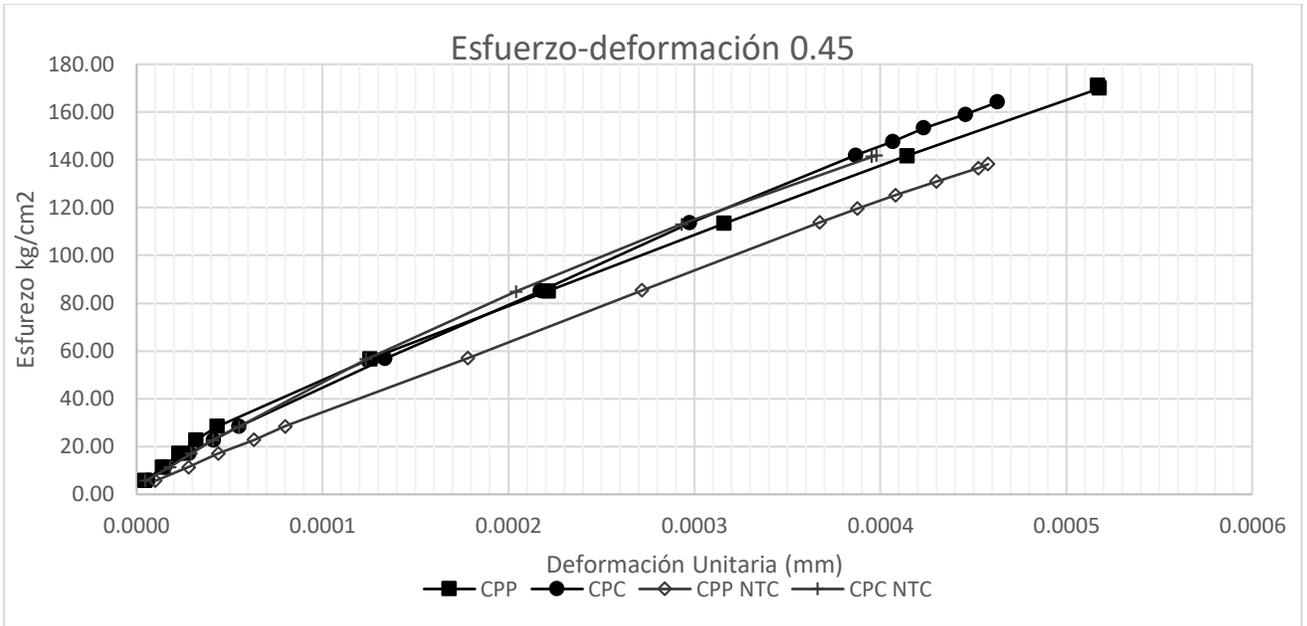


Figura 75. Esfuerzo deformación 0.45.

Se han propuesto ecuaciones predictivas para evaluar el comportamiento de los concretos sin embargo existen muchas variantes para poder establecer como se comportara dicho elemento, por lo cual autores como Carmen Andrade hacen esta distinción entre los métodos predictivos y su apego al comportamiento real, para evaluar el módulo de elasticidad se utilizó la ecuación 6 de la ACI 318 que basa sus parámetros en función a la resistencia a la compresión y al peso de cemento W_c para valores entre 1440 y 2480 kg/m^3 , correlacionando el módulo de elasticidad E_c con la resistencia a la compresión f'_c en la figura 76:

$$E_c = 0.043W_c^{1.5}\sqrt{f'_c}$$

(6)

Donde:

E_c = Módulo de elasticidad en kg/cm^2

W_c = Peso del concreto en kg/m^3

f'_c = Resistencia a la compresión especificada a los 28 días en kg/cm^2 .

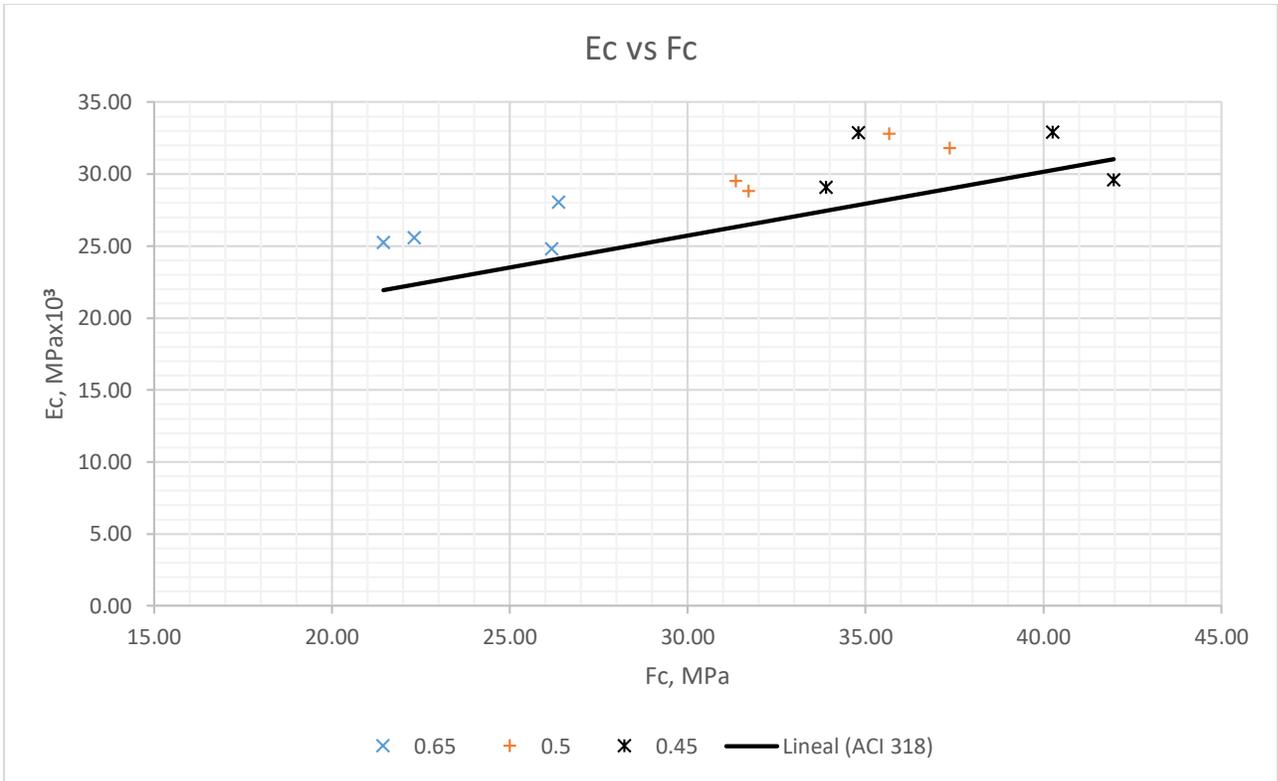


Figura 76. Grafica modulo elasticidad vs resistencia a compresión.

Los valores de las relaciones 0.65 y 0.45 se acercaron a la ecuación propuesta por la ACI 318, quedando esta última una familia por debajo de ella, la relación 0.50 se mostró por encima de la ecuación, al encontrarse los valores próximos a la fórmula propuesta por la ACI 318, esta predicción se aproxima a lo ensayado, ya que la tendencia es similar mostrando una intercalación entre los valores de la relación a/c 0.50 y 0.45, dicha interrelación se debe a los valores correspondientes a los NTCM que mostraron desempeño mecánico bajo en la relación 0.45 y se comparan con la relación 0.50 de concretos a base de CPP y CPC sin adición.

4.5 Índices de durabilidad en los concretos

Se estudiaron los índices de durabilidad para todas las familias de concretos elaboradas mediante dos indicadores que determinan la vida útil de un elemento de concreto estructural en un ambiente marino cálido-subhúmedo, siendo este la sopórtividad mediante el ensayo de absorción capilar y la resistencia a la penetración del ion cloruro, este último mediante el método de ensayo NT BUILD 492, ensayo acelerado que sirvió de comparación entre las

probetas, a pesar de ser un método acelerado este no refleja en proporción el tiempo del comportamiento del elemento ante este agente agresivo.

4.5.1 Absorción Capilar

La sorptividad se calculó mediante el ASTM C 1585 complementado por el método de Fagerlund (1986), con las ecuaciones 7, 8, 9, 10 y 11:

ASTM C 1585-04

$$I = \frac{m_t}{a/d} \quad (7)$$

I : Absorción, mm.

m_t : Cambio de masa del espécimen respecto a mas inicial, gr.

a : Área expuesta del espécimen, mm².

d : Densidad del agua = 0.001 g/mm³.

FAGERLUND

$$m = \frac{T}{h^2} \quad (8) \quad k = \frac{D}{\sqrt{T}} \cdot \frac{1}{A} \quad (9) \quad \epsilon e = \frac{D}{A \cdot h \cdot 1000} \quad (10) \quad S = \frac{1}{\sqrt{m}} \quad (11)$$

m : Resistencia a la penetración del agua, s/m².

T : Tiempo en el punto crítico de saturación de la probeta, s.

h : Espesor total del espécimen, m.

A : Área expuesta del espécimen, m²

k : Coeficiente de absorción capilar, (mm/h^{0.5}).

D : Cambio de masa del espécimen, gr.

ϵe : Porosidad efectiva, %.

S : Velocidad de absorción capilar (sorptividad), mm/h^{0.5}

El criterio usado para determinar las pendientes para obtener el tiempo ($t^{0.5}$) fue el similar al utilizado en el documento del IMT por Andrés Torres Acosta (Figura 77), donde se prolonga la pendiente en las primeras mediciones desde cero manteniendo una tendencia constante hasta donde empieza el cambio de dirección (IMT, 2006).

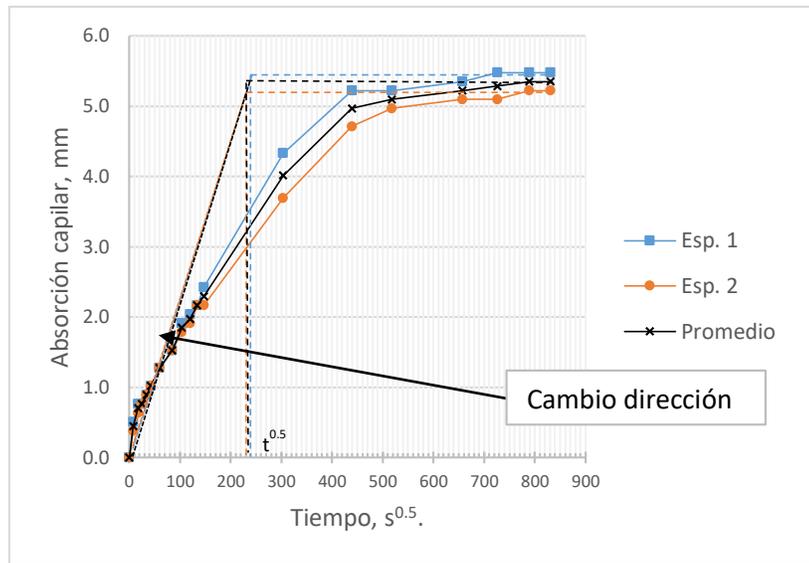


Figura 77. Absorción Capilar CPP 0.65.

Se muestran la evaluación de durabilidad respecto a la porosidad efectiva para los concretos ensayados en la tabla 18.

Tabla 18. Evaluación de durabilidad porosidad efectiva.

| Familia de concreto | Porosidad Efectiva, E | Durabilidad según ϵ_e |
|---------------------|-----------------------|--------------------------------|
| CPP 0.65 | 11.37 | MODERADO |
| CPC 0.65 | 11.37 | MODERADO |
| CPP 0.65 NTC | 10.92 | MODERADO |
| CPC 0.65 NTC | 11.33 | MODERADO |
| CPP 0.50 | 8.92 | ADECUADO |
| CPC 0.50 | 10.88 | MODERADO |
| CPP 0.50 NTC | 9.79 | ADECUADO |
| CPC 0.50 NTC | 8.09 | ADECUADO |
| CPP 0.45 | 12.50 | MODERADO |
| CPC 0.45 | 10.57 | MODERADO |
| CPP 0.45 NTC | 8.48 | ADECUADO |
| CPC 0.45 NTC | 7.88 | ADECUADO |

Para los valores de porosidad efectiva la RED DURAR del CYTED señala que con áridos calizos triturados y manteniendo la adecuada disciplina tecnológica en cuanto a garantizar una compactación completa del concreto y un cuidadoso curado, los concretos con una porosidad efectiva menor al 10% pueden desempeñarse y considerarse con una adecuada durabilidad en un ambiente agresivo, para porcentajes entre el 10 y el 15% se consideran de moderada calidad, permeables y no adecuados por su desempeño para ambientes agresivos (J. J. Howland y A. R. Martín, 2013), los concretos CPP 0.65 NTC, CPC 0.50 NTC y CPC 0.45 NTC mostraron niveles bajos de porosidad efectiva dentro de sus mismas relaciones a/c, la adición de NTCM contribuyó a la disminución de la porosidad efectiva en concretos con mismo tipo de cemento a excepción del CPP 0.50 y el CPP 0.50 NTC donde este último mostro valores de porosidad efectiva superiores.

Los concretos de la relación a/c de 0.50 resultaron adecuados según los límites establecidos menos la elaborada con cemento portland compuesto CPC, es decir el cemento portland puzolánico así como la adición de NTC resultaron favorables sobre el cemento denominado común. En la relación 0.45 los concretos con adiciones NTCM se encontraron por debajo del límite establecido resultando ser adecuados mejorando las características del concreto en este rango.

Todos los concretos de la relación 0.65 resultaron en nivel moderado por lo que no son adecuados para su exposición en ambientes agresivos.

La RED DURAR del CYTED establece que para las estructuras de concreto con un espesor de recubrimiento del acero de 30mm, en un ambiente altamente agresivo su valor máximo de sorptividad sea de un $5 \times 10^{-5} \text{ m/s}^{0.5}$ o $3 \text{ mm/h}^{0.5}$, se muestran los valores de sorptividad obtenidos por el método de la ASTM C1585 complementado por el método de Fagerlund en la Tabla 19.

Tabla 19. Sorptividad obtenidos por ASTM C1585, completando por el método Fagerlund.

| Familia de concreto | Sorptividad $\text{mm/h}^{0.5}$ |
|---------------------|---------------------------------|
| CPP 0.65 | 12.03 |
| CPC 0.65 | 13.00 |
| CPP 0.65 NTC | 12.20 |

| | |
|--------------|-------|
| CPC 0.65 NTC | 13.40 |
| CPP 0.50 | 9.50 |
| CPC 0.50 | 12.20 |
| CPP 0.50 NTC | 10.00 |
| CPC 0.50 NTC | 10.90 |
| CPP 0.45 | 11.40 |
| CPC 0.45 | 12.40 |
| CPP 0.45 NTC | 10.10 |
| CPC 0.45 NTC | 9.40 |

Todas las familias de concreto estuvieron por encima del criterio establecido por la RED DURAR del CYTED, para las relaciones a/c de 0.65 los concretos elaborados con CPP mostraron un mejor desempeño respecto a la sorptividad para la relación 0.50, seguido por su similar con adición de NTCM, el concreto elaborado con CPC con adición de NTCM mostro un desempeño menor en esta familia de concretos (Figura 78).

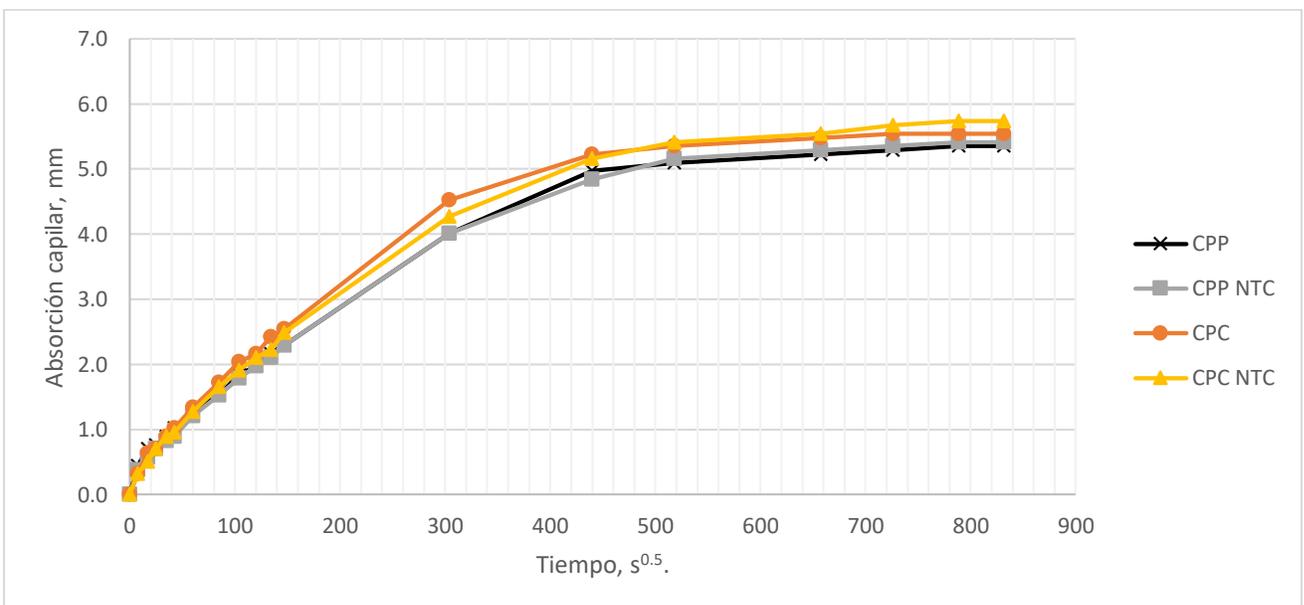


Figura 78. Absorción capilar en función de tiempo relación a/c 0.65.

En los concretos que corresponden a la relación 0.50 los concretos elaborados con CPP mostraron un mayor desempeño de sorptividad respecto al concreto elaborado con CPC el

cual fue inferior respecto a esta familia de concretos, los concretos con adiciones de NTCM se mantuvieron entre un 10 y 10.90 mm/h^{0.5} respectivamente, quedando con un desempeño medio de esta familia de concretos (Figura 79).

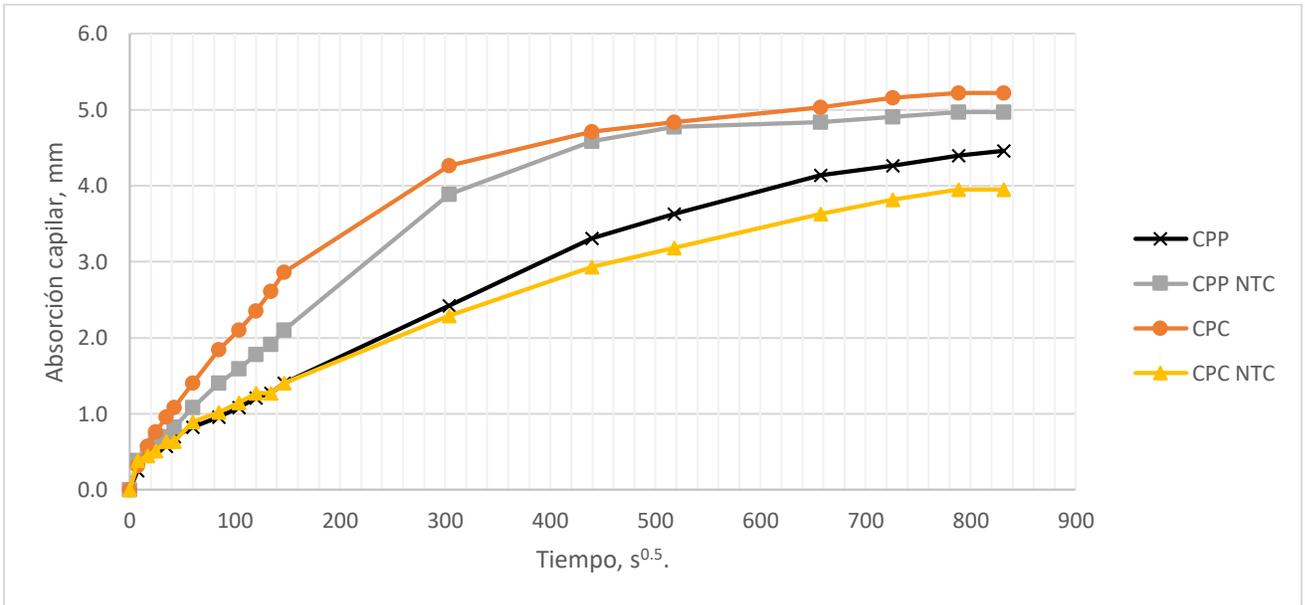


Figura 79. Absorción capilar en función de tiempo relación a/c 0.50.

Los concretos correspondientes a la relación a/c 0.45 que mostraron mayor desempeño respecto a sorptividad fueron los elaborados con CPC y adicionados con NTCM, mientras que los elaborados con su similar CPC sin adición fueron los que menor desempeño mostraron, los concretos elaborados con CPP con y sin adición resultaron en la media de esta relación a/c (Figura 80).

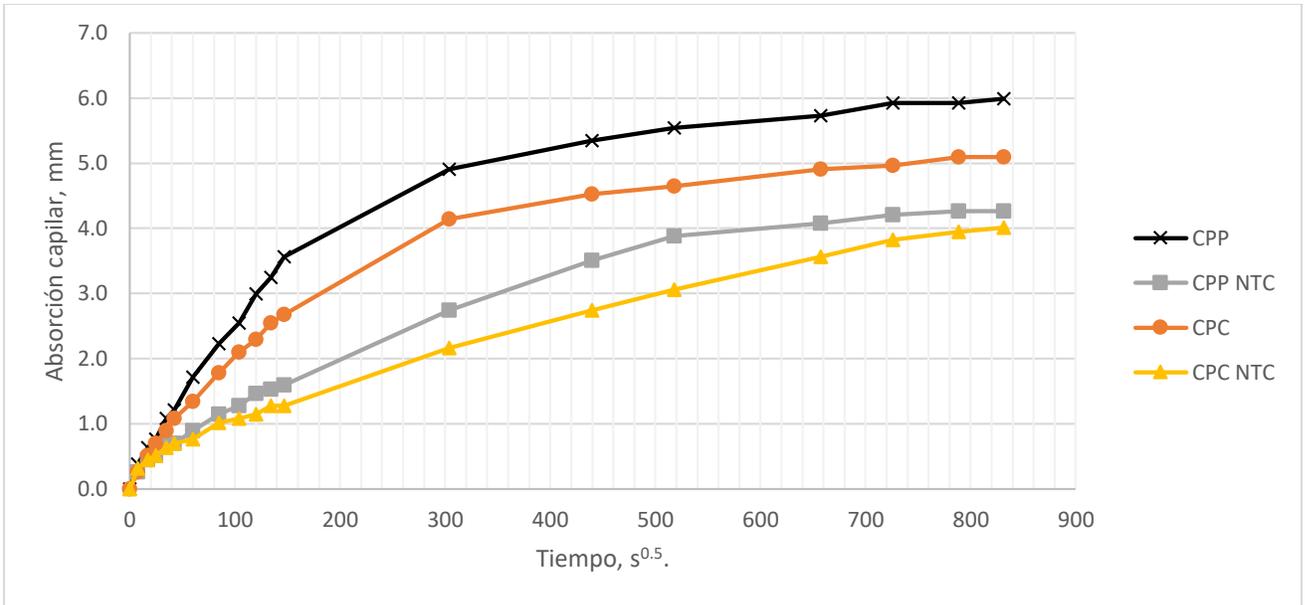


Figura 80. Absorción capilar en función de tiempo relación a/c 0.45.

En general el mejor desempeño mostrado de las familias de concreto ensayadas fue el de la familia CPC 0.45 NTC es decir con adición de NTCM con una sorptividad de $9.40 \text{ mm/h}^{0.5}$ seguido por el CPP 0.50 sin adición con $9.50 \text{ mm/h}^{0.5}$ y el CPP 0.50 NTCM con $10.00 \text{ mm/h}^{0.5}$ mientras que el menor desempeño fue el de la familia CPC 0.65 NTC es decir con adición de NTCM con $13.40 \text{ mm/h}^{0.5}$ y el CPC 0.65 con $13.00 \text{ mm/h}^{0.5}$.

4.5.2 Resultados permeabilidad de cloruros.

Para evaluar la permeabilidad de cloruros se obtuvo el coeficiente de migración/difusión en estado no estacionario mediante el ensayo de electro migración rápida de cloruros, utilizando el método Noruego NTBuild 492, el cual fuerza el ingreso del ion mediante la aplicación de campo eléctrico, el coeficiente de migración/difusión en estado no estacionario se calculó mediante los datos obtenidos en el ensayo por la profundidad de penetración obtenido mediante método colorimétrico de nitrato de plata en la muestra ensayada de 5 cm de espesor, el tiempo de duración de la prueba, el voltaje aplicado y la temperatura de las soluciones, este cálculo se efectuó mediante la simplificación de la segunda ley de Fick.

La prueba arrojó que las familias de concreto a base de CPC con y sin adición de NTCM mostraron una tendencia de mayor a menor permeabilidad conforme la relación A/C va disminuyendo, siendo las adicionadas con NTCM las que mostraron un coeficiente de migración mayor que su similar sin adición en un 47% más en la relación 0.65, 21% mayor en la relación 0.50 y un 29% mayor en la ración 0.45, la tendencia de disminución del coeficiente de migración del concreto CPC es del 8% de relación mayor a relación menor, resultando la 0.45 más permeable que las demás.

Respecto a las elaboradas a base de CPP la tendencia de disminución del coeficiente de migración se vio reflejada de la relación 0.65 a la 0.50, en un 2% para los concretos elaborados a base de CPP si adición y en un 17% en los concretos a base de CPP NTCM, sin embargo en la relación 0.45 en ambas familias de concreto mostraron un aumento de coeficiente de migración, aumentando en un 18% para el concreto CPP y en un 15% para el CPP NTCM (Figura 81), esto puede deberse a que la relación 0.45 es una relación con una trabajabilidad menor y como se observó la puzolana demandó más agua volviendo más espesa la mezcla en el CPP, caso similar con CPP NTCM ya que los nanotubos de carbono multipared volvió más densa el agua de mezclado, dificultando el colado y compactación en las probetas de 200mm x 100mm.

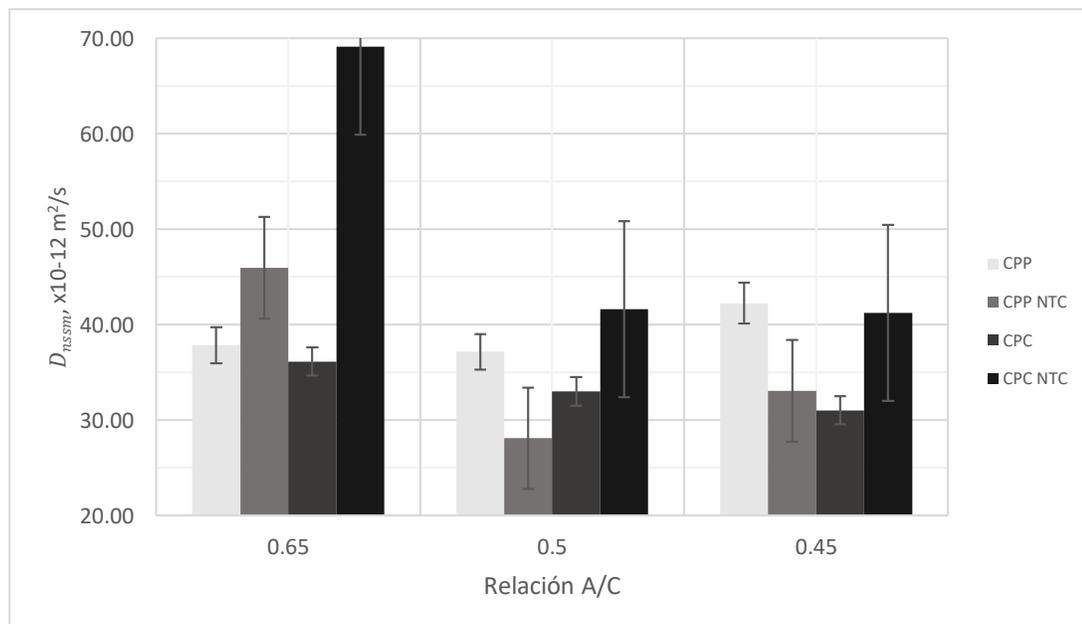


Figura 81. Coeficientes de migración.

De acuerdo a un estudio realizado por la universidad de Chile de la facultad de ciencias físicas y matemáticas en el departamento de ingeniería civil, se hizo una comparativa para evaluar la permeabilidad del ion cloruro en muestras de concreto comparando dos métodos de ensayo, uno de acuerdo a la ASTM C 1202 y otro mediante el Nordtest NTBuild 492, lo cual permitió medir de manera cualitativa concretos elaborados con cemento puzolánico tomando en base la correlación de los resultados la cual se puede ver en la tabla 20 (Vega, 2015).

Tabla 20. Correlación de resultados entre ASTM y NORDTEST NTBuild 492.

| ASTM | NORDTEST |
|------------------------------|---------------------------------------|
| Permeabilidad al Ion Cloruro | D_{nssm} , x10-12 m ² /s |
| Muy Baja | Entre 0 y 3.5 |
| Baja | Entre 3.5 y 6.75 |
| Moderada | Entre 6.75 y 10.5 |
| Alta | >10.5 |

Por lo que el desempeño de todos los concretos ensayados fue baja ya que los coeficientes de migración resultaron mayores a los 10.5 x10-12 m²/s es decir con alta permeabilidad al Ion Cloruro como se ve en la tabla 21.

Tabla 21. Desempeño de los concretos ensayados.

| Familia de concreto | D_{nssm} , x10-12 m ² /s | Permeabilidad al Ion Cloruro |
|---------------------|---------------------------------------|------------------------------|
| CPP 0.65 | 37.83 | Alta |
| CPC 0.65 | 36.14 | Alta |
| CPP 0.65 NTC | 45.97 | Alta |
| CPC 0.65 NTC | 69.14 | Alta |
| CPP 0.50 | 37.17 | Alta |
| CPC 0.50 | 33.01 | Alta |
| CPP 0.50 NTC | 28.09 | Alta |
| CPC 0.50 NTC | 41.64 | Alta |
| CPP 0.45 | 42.26 | Alta |

| | | |
|--------------|-------|------|
| CPC 0.45 | 31.04 | Alta |
| CPP 0.45 NTC | 33.05 | Alta |
| CPC 0.45 NTC | 41.22 | Alta |

De acuerdo a la relación coeficiente de migración vs. sorptividad se pudo ver que si bien se aprecia una tendencia decreciente conforme aumenta la relación a/c, siendo la 0.65 la de menor desempeño en todos los concretos, algunos concretos de la relación 0.50 tuvieron mejor desempeño que la mayoría de los 0.45, ya que tanto las características de la puzolana y de los NTCM volvían la mezcla más difícil de trabajar, los concretos que mostraron un mejor desempeño de acuerdo a la durabilidad tomando en base la relación sorptividad -coeficiente de migración de ion cloruro del concreto tomando en cuenta los índices estudiados fueron los pertenecientes al CPP y CPP NTCM 0.5, resultando el de menor desempeño el CPC adicionado con NTCM en su relación 0.65 (Figura 82).

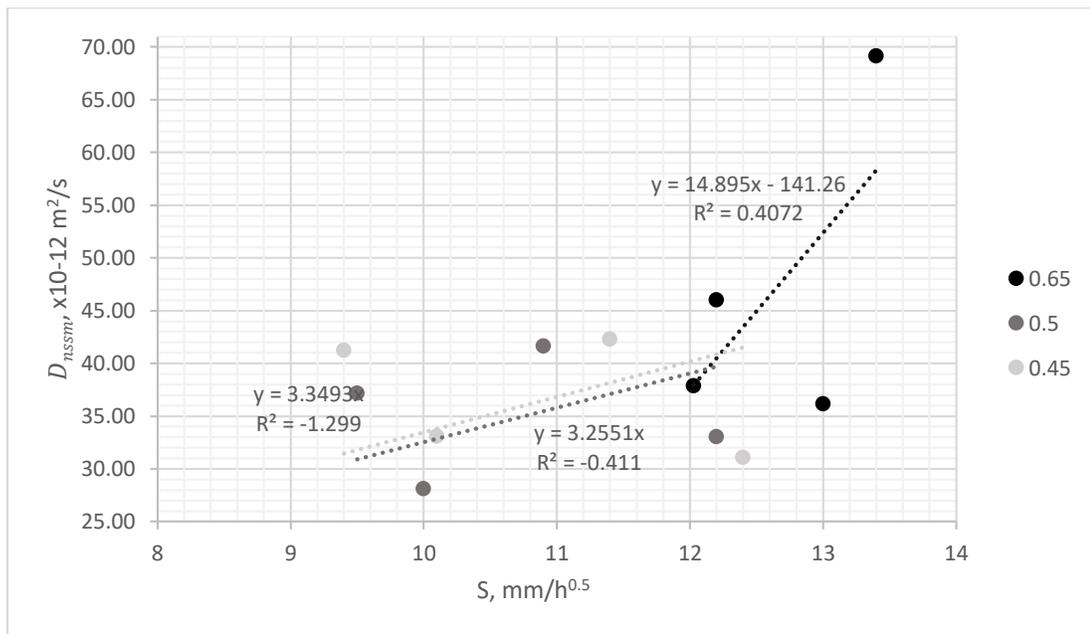


Figura 82. Coeficientes de migración vs Sorptividad

La figura 83 muestra la comparativa de estudios similares, uno de ellos fue en el estado de Yucatán que comparte características similares en zona costera, en dicho estudio se evaluó el cemento portland puzolánico contra el cemento portland compuesto, sin embargo su estudio a diferencia de este fueron expuestas las probetas de manera natural al ambiente

marino utilizando concretos curados a 14 días (Moreno et al., 2015), los otros estudios fueron evaluados mediante el mismo método de ensayo NTBuild 492 y concretos con alguna adición puzolánica, concreto con humo de sílice y escoria granular de alto horno (Bernal Jesús, 2014) y concreto a base de cemento portland puzolánico (Vega, 2015).

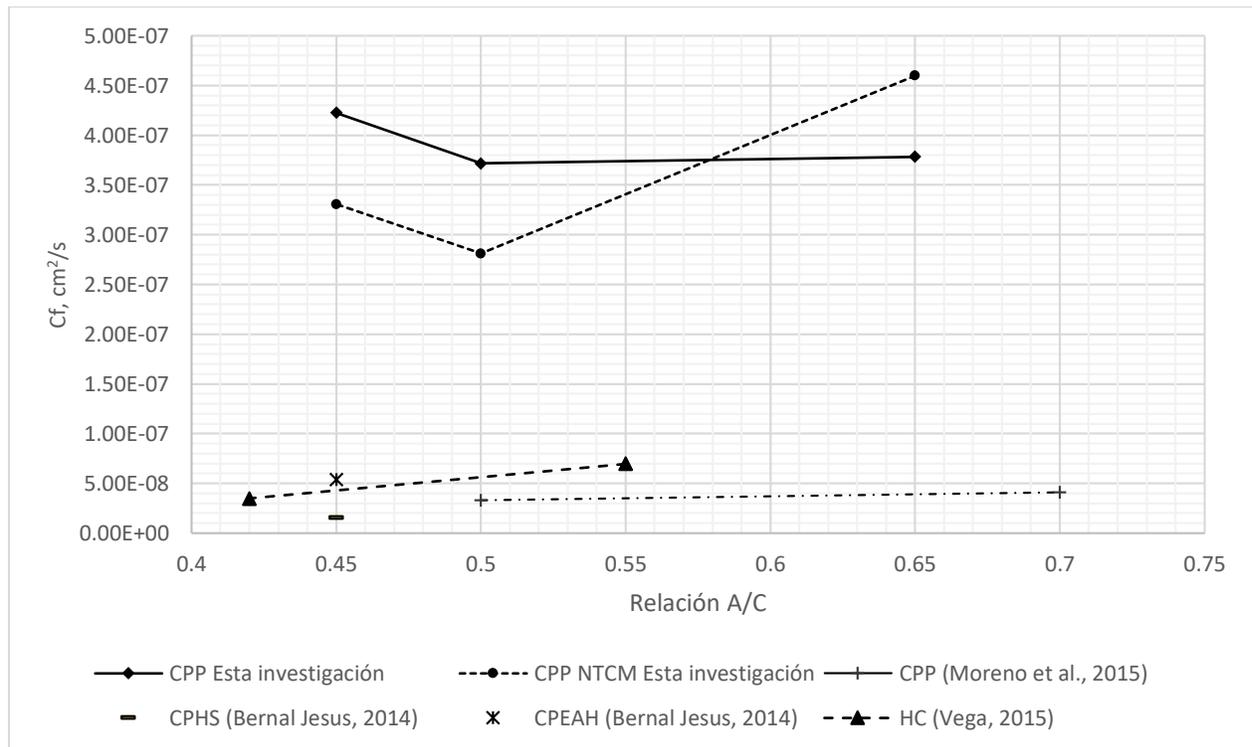


Figura 83. Comparativa concretos con adiciones puzolánicas

También se compararon los concretos de control elaborados a base de cemento portland compuesto y cemento portland ordinario como se ve en la figura 84, en ambas situaciones los resultados de esta investigación resultaron superiores en comparación a lo reportado por los autores mencionados, estudios previos realizados en la península de Yucatán fueron evaluados con métodos de titulación acuosa y ácido, Jiménez (2017) evaluó dos tipos de exposiciones, muestras sumergidas y en zona de salpicadura, mediante una exposición de agua de mar sintética, Moreno (2015) expuso directamente a brisa marina a 200m de la zona costera.

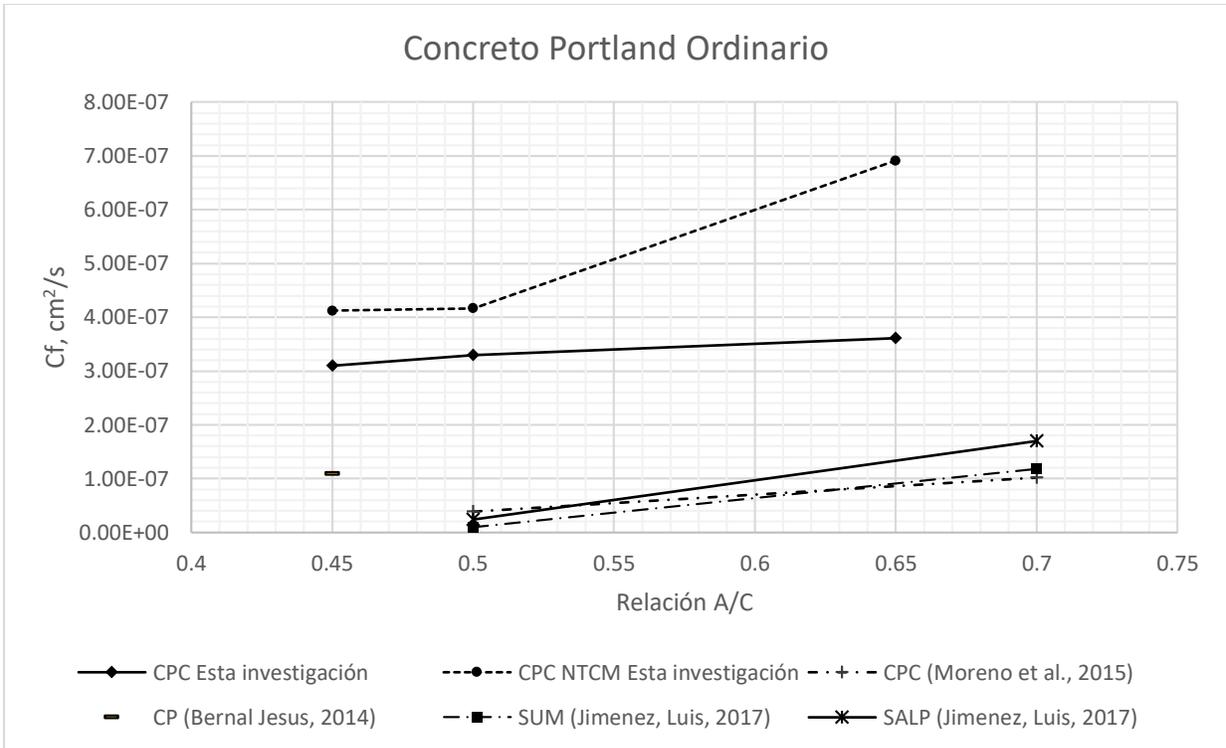


Figura 84. Comparativas concretos base CPO.

Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones

El concreto es un material altamente heterogéneo que sus características especiales son brindadas por diversos factores que tanto pueden beneficiar como pueden perjudicar el desempeño físico, mecánico y de durabilidad, tras el ensayo de dos tipos de cementantes, tres relaciones de agua-cemento y dos porcentajes de adiciones de NTCM, se reprodujeron 12 tipos de concretos que fueron sometidos a las mismas pruebas.

Retomando la hipótesis planteada al inicio de este trabajo se planteó que las muestras de concreto fabricadas con cemento Portland puzolánico y nanotubos de carbono multipared serían capaces de mejorar la resistencia a la penetración de cloruros en comparación de concretos elaborados con cemento Portland compuesto utilizados con fines estructurales debido a su refuerzo nano estructural, que junto con la puzolana volvían la microestructura más densa retardando el paso del ion cloruro a través de él; las preguntas de investigación derivadas de la hipótesis se referían a la diferenciación de concretos ensayados para poder determinar si se podrían sustituir ante el ingreso del ion cloruro como agente agresivo predominante en zona costera. La hipótesis se cumple parcialmente para una relación agua-cemento de 0.50, sin embargo la adición de NTCM no siempre resulta favorable ya que tiende a cambiar las características físicas del concreto, dichas observaciones son las siguientes:

- El concreto con una mejor trabajabilidad en estado fresco fue el elaborado con CPC, seguido por el CPP que debido a su actividad puzolánica demanda más agua y hace la mezcla más densa, los adicionados con nanotubos de carbono multipared tanto el CPP NTCM y el CPC NTCM resultaron con menor trabajabilidad la mezcla se tornó muy espesa y difícil de colar con revenimientos menores para la relación 0.45.
- Los mejores resultados de compresión a la edad de 28 días son los pertenecientes al CPP tanto para la relación 0.65 y 0.45, para la relación 0.50 el CPC fue el de mejor desempeño, los adicionados con NTCM resultaron con propiedades menores ya que se observó que el concreto no tenían una consistencia sólida puesto que la zona de interfase entre la pasta de cemento y el agregado se veía comprometida por adherencia, es decir la nanoestructura de los nanotubos de carbono no lograron

anclarse por completo al agregado calizo debido a que se aglomeraron en la pasta de cemento, sin embargo no se alejaron mucho de la curva marcada por lo esperado por la ACI, todas las familias mostraron una curva ascendente conforme la relación a/c era más baja.

- En sus propiedades elásticas se asimilaron al comportamiento de la resistencia a la compresión intercalando características de las probetas entre las relaciones de 0.45 y 0.50.
- Sus propiedades elásticas y mecánicas resultaron cercanas a la curva prevista por la fórmula de la ACI 318, la adición de NTCM tiene influencia significativa en dichas propiedades disminuyendo en ambos casos.
- Respecto a los índices de durabilidad, según la RED DURAR para porosidad efectiva los concretos a base de CPP 0.50, CPP 0.50 NTC, CPC 0.50 NTC, CPP 0.45 NTC y el CPC 0.45 NTC, resultaron adecuados.
- Sin embargo, respecto a la sorptividad de los concretos ensayados todas las familias de concreto estuvieron por encima del criterio establecido por la RED DURAR del CYTED ya que estuvieron por encima de los $3 \text{ mm/h}^{0.5}$, en comparativa el concreto CPC NTCM resulto con mejor desempeño para una relación 0.45 y el concreto a base de CPP resulto mejor para 0.50 y 0.65 a/c.
- Con respecto a la penetración del Ion Cloruro todas las familias sobrepasaron los limites planteados, debido a que su coeficiente de migración estuvo por encima de los $10.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, en comparativa el concreto CPC resulto con mejor desempeño para una relación 0.45 y 0.65 y el concreto a base de CPP NTC resultó mejor para 0.50 a/c.
- Se tomó en cuenta la relación sorptividad -penetración ion cloruro ya que ambos son índices de durabilidad para determinar que para una relación 0.45 y 0.65 el mejor desempeño es para un concreto a base de CPC y el concreto a base de cemento portland puzolánico con adición de NTCM en una relación 0.50 resultó con mayor desempeño siendo este el concreto con mayor resistencia ante la penetración del ion cloruro ante agentes agresivos de todos los concretos ensayados.

Recomendaciones:

El panorama sobre la investigación de la durabilidad en estructuras a base de concreto armado en zona costera es muy amplio aun, los agregados calizos característicos de la región pueden dar pautas a la implementación de adiciones que aprovechen sus características especiales, la implementación de nuevos cementantes es fundamental para alargar la vida útil de un elemento, para próximas investigaciones que con fines similares se recomienda:

- El uso de plastificante para descartar problemas de trabajabilidad por su mal desempeño en relaciones a/c menores con adición de NTCM.
- Implementar otro método de dispersión de nanotubos de carbono multipared, para evitar la aglomeración en la pasta cementante.
- La síntesis de NTCM y comparación contra los comerciales.
- Reducción de la escala de las probetas de estudio.
- Estudio y comparación de probetas elaboradas en este estudio expuestas directamente a zona costera en sus tres niveles (inmersión, tilde zone y salpicadura).
- Comparativas de otros métodos de evaluación para la obtención del coeficiente de difusión del ion cloruro (método de titulación, ASTM C1202, predicción matemática).
- Mejoras a la celda de electro migración Nordtest NTBuild 492, respecto al material del cátodo y ánodo, ya que su corrosión puede afectar el procesamiento de datos.
- Se recomienda debido al tamaño del material hacer una microscopia de transmisión electrónica para obtener información morfológica, cristalográfica y de su composición química de su nanoestructura.

Se recomienda seguir la línea de investigación de materiales a una escala nano para el reforzamiento de la estructura del concreto ya que este estudio tuvo su nivel de alcance a un nivel **micro**.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. ASTM C 29/C29 M. (2003). Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate. American Concrete Institute.
2. ASTM C 31/C 31M - 03. (2003). Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field. American Concrete Institute.
3. ASTM C33 -08. (2008). Standard Specification for Concrete Aggregates. American Concrete Institute.
4. ASTM C 39/C 39M - 05. (2005). Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens¹. American Concrete Institute.
5. ASTM C127 01. (2001). Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate. American Concrete Institute.
6. ASTM C 128 - 03. (2003). Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate. American Concrete Institute.
7. ASTM C131-06. (2006). Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine. American Concrete Institute.
8. ASTM C143-C143-08. (2008). Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete. American Concrete Institute.
9. ASTM C 183- C138M -09. (2009). Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete. American Concrete Institute.
10. ASTM C 192 - C 192M - 06. (2006). Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory. American Concrete Institute.
11. ASTM C 231 - 09. (2009). Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method. American Concrete Institute.
12. ASTM C469-02. (2002). Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression. American Concrete Institute.
13. ASTM C 642 - 97. (1997). Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete. American Concrete Institute.
14. ASTM C 702 - 98. (1998). Standard Practice for Reducing Samples of Aggregate to Testing Size. American Concrete Institute.
15. ASTM D 75-97. (1997). Standard Practice for Sampling Aggregates. American Concrete Institute.
16. Andrade, C.,(2013). Especificaciones de cálculo de la vida útil y estado límite de corrosión. ALCONPAT Internacional, 1(2), 93–101.

17. ASTM C 1585 Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes
18. Bernal Camacho, Jesús (2014) Evaluación de parámetros que influyen en el transporte de cloruros en hormigón parcialmente saturado, Tesis Doctoral, Departamento de ingeniería civil: construcción, Escuela técnica superior de ingenieros de caminos, canales y puertos, Madrid, España.
19. Carcaño, R. G. S., Moreno, É. I., & Borges, P. C. (2005). Durabilidad en la estructura de concreto de vivienda en zona costera. artículo de divulgación, Ingeniería, 9–1.
20. Castellano, C. C., Bonavetti, V. L., & Irassar, E. F. (2013). Cementos mezclas: influencia del tamaño de las partículas de escoria. Concreto y cemento. Investigación y desarrollo, 4(2), 2–14.
21. Castillo, R. (2011). Estudio de la adición de arcillas calcinadas en la durabilidad de concretos Study of the addition of calcined clays in the durability of concrete.
22. Chaipanich, A., Nochaiya, T., Wongkeo, W., & Torkittikul, P. (2010). Compressive strength and microstructure of carbon nanotubes–fly ash cement composites. Materials Science and Engineering: A, 527(4-5), 1063–1067.
23. Correa, E., Peñaranda, S., Castaño, J., & Echeverría, F. (2010). Concrete deterioration in Colombian urban atmospheres. Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia, (52), 41–46.
24. Fagerlund, G. (1986) On the capillarity of concrete, Nordic Concrete Research, No. 1, Oslo, Noruega, Paper No. 6.
25. Gómez-Zamorano, L. Y., Iñiguez-Sánchez, C. A., & Lothenbach, B. (2015). Microestructura y propiedades mecánicas de cementos compuestos: Efecto de la reactividad de adiciones puzolánicas e hidráulicas. Revista ALCONPAT, 5(1), 18–30.
26. Gonzalez Díaz, Javier (2014) Modelos de penetración del ión cloruro orientados a la predicción de la vida útil de las estructuras de concreto, Tesis de Maestría en Ingeniería opción estructuras, Facultad de Ingeniería, departamento de Ingeniería civil y Agrícola, Universidad Nacional de Colombia.
27. González Rodríguez, L. M. (1999). Penetración de cloruros en concretos protegidos con un aditivo inhibidor de la corrosión. Universidad Autónoma de Yucatan, Yucatán, México.
28. Hamilton III, H. R. (2007). Permeability of concrete-comparison of conductivity and diffusion methods. FDOT.
29. Howland, J. J. y A. R. Martín (2012) Investigación de la absorción capilar de hormigones con áridos calizos cubanos, Revista cubana de Ingeniería, Vol. III, No. 2, pp. 17-24, ISSN 2223-1781.

30. Rubén H. G., Juan Carlos G. A, Francisco J. M. L. e Irene E.M. (2014). Propuesta metodológica mediante diseños Box-Behnken para mejorar el rendimiento del análisis conjunto en estudios experimentales de mercado, *Revista Española de Investigación de Marketing ESCI*, Volume 18, Issue 1, pp. 57-66.
31. IMT. (2006). Caracterización de un sistema de refuerzo-protección en elementos de concreto reforzado dañados por corrosión, utilizando compuestos base fibras de carbón. SCT.
32. IMT. (2008). Durabilidad de la infraestructura de concreto reforzado expuesta a diferentes ambientes urbanos de México. SCT.
33. Jain, N. (2012). Effect of nonpozzolanic and pozzolanic mineral admixtures on the hydration behavior of ordinary Portland cement. *Construction and Building Materials*, 27(1), 39–44.
34. Jiménez, Luis (2017), *Concreto con agregados reciclados: una opción durable y sustentable*, Editorial Academica Española, España.
35. Kim, H.-K. (2015). Chloride penetration monitoring in reinforced concrete structure using carbon nanotube/cement composite. *Construction and Building Materials*, 96, 29–36.
36. Kim, H. K., Nam, I. W., & Lee, H. K. (2014). Enhanced effect of carbon nanotube on mechanical and electrical properties of cement composites by incorporation of silica fume. *Composite Structures*, 107, 60–69.
37. Li, G. Y., Wang, P. M., & Zhao, X. (2005). Mechanical behavior and microstructure of cement composites incorporating surface-treated multi-walled carbon nanotubes. *Carbon*, 43(6), 1239–1245.
38. López, M., & Castro, J. T. (2010). Efecto de las puzolanas naturales en la porosidad y conectividad de poros del concreto con el tiempo. *Revista ingeniería de construcción*, 25(3), 419–431.
39. Merida, A., & Kharchi, F. (2015). Pozzolan Concrete Durability on Sulphate Attack. *Procedia Engineering*, 114, 832–837.
40. Mendiola Carrillo, J. A. (2010, 2011). *Cemento Portland puzolánico-influencia del tipo de cemento en la cantidad de agua del mezclado*. Universidad de Guayaquil, Facultad de ciencias matematicas y fisicas, escuela de ingenieria civil., Guayaquil-Ecuador.
41. Moreno, E. I., Solís-Carcaño, R. G., Varela-Rivera, J., Pacho-Monforte, J. C., & Cua-Cuevas, R. A. (2015). Diffusion of Chlorides in Pozzolanic Concrete made with High-absorption Aggregates Exposed under Tropical Marine Environment. *INTERNATIONAL JOURNAL OF ELECTROCHEMICAL SCIENCE*, 10(8), 6444–6453.
42. Muciño, A. (2009). Concreto nanotecnológico. *Razón y palabra*, (68), 2.

43. Musso, S., Tulliani, J.-M., Ferro, G., & Tagliaferro, A. (2009). Influence of carbon nanotubes structure on the mechanical behavior of cement composites. *Composites Science and Technology*, 69(11-12), 1985–1990.
44. Nam, I. W., Kim, H. K., & Lee, H. K. (2012). Influence of silica fume additions on electromagnetic interference shielding effectiveness of multi-walled carbon nanotube/cement composites. *Construction and Building Materials*, 30, 480–487.
45. Neville, A. M. (1999). *Tecnología del Concreto* (1° ed.). Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C.
46. NT BUILD 492 (1999). Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments.
47. Nochaiya, T., & Chaipanich, A. (2011). Behavior of multi-walled carbon nanotubes on the porosity and microstructure of cement-based materials. *Applied Surface Science*, 257(6), 1941–1945.
48. O'Reilly Díaz, V. A., Bancrofft Hernández, R. A., & Ruiz Gutiérrez, L. (2010). Las tecnologías del concreto en su ciclo de vida. *Concreto y cemento. Investigación y desarrollo*, 1(2), 42–47.
49. Real, L. V., Oliveira, D. R. B., Soares, T., & Medeiros, M. H. F. (2014). Método colorimétrico por aspersión de nitrato de plata para la evaluación de la penetración de cloruros en concreto: estado del arte. *Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción*, 5(2), 151–161.
50. Red DURAR (2000) Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado, CYTED, 208pp.
51. Rivera Uc, J. A. (1993). *Análisis de la difusión de los cloruros en el concreto simple*. Universidad Autónoma de Yucatan, Yucatán, México.
52. SCT. (2002). *CMT. Características de los materiales*.
53. Solís-Carcaño, R., Moreno, É. I., (2008). Evaluation of concrete made with crushed limestone aggregate based on ultrasonic pulse velocity. *Construction and Building Materials. Elsevier*, 22, 1225–1231.
54. Solís-Carcaño, R., Moreno, É. I., & Vázquez-Rojas, C. (2011). Diferencias en la resistencia de concretos sujetos a curados húmedos y al ambiente en clima cálido subhúmedo. *Concreto y cemento. Investigación y desarrollo*, 3(1), 25–35.
55. Spiesz, P., Ballari, M. M., & Brouwers, H. J. H. (2012). RCM: A new model accounting for the non-linear chloride binding isotherm and the non-equilibrium conditions between the free- and bound-chloride concentrations. *Construction and Building Materials*, 27(1), 293–304.

56. Spiesz, P., & Brouwers, H. J. H. (2012). Influence of the applied voltage on the Rapid Chloride Migration (RCM) test. *Cement and Concrete Research*, 42(8), 1072–1082.
57. Tang Lupin. (1999). Concrete, mortar and cement-based repair materials: chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments. Nordic Council of Ministers.
58. Uzal, B. (2013). Properties of concrete with high-volume pozzolans. En *Eco-Efficient Concrete* (pp. 138–152). Elsevier.
59. Vega Klein, Tomás (2015) Permeabilidad a cloruros en hormigones marítimos, evaluación comparativa de métodos Nordtest NT Build 492 y ASTM C 1202, Tesis de Licenciatura, Facultad de ciencias físicas y matemáticas, departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile.
60. Videla, C., Covarrubias, J. P., & Pascual, J. M. (2012). Comportamiento de concretos Fabricados con Distintas Clases de Cemento ante Climas Extremos. *Revista Ingeniería de Construcción*, (14), 32–46.
61. O'Reilly Díaz. (2008). *Métodos para dosificar concretos de elevados desempeños* (IMCYC, Vol. 2).
62. Wang, H.-L., Dai, J.-G., Sun, X.-Y., & Zhang, X.-L. (2016). Characteristics of concrete cracks and their influence on chloride penetration. *Construction and Building Materials*, 107, 216–225.
63. Wu, J., Li, H., Wang, Z., & Liu, J. (2016). Transport model of chloride ions in concrete under loads and drying-wetting cycles. *Construction and Building Materials*, 112, 733–738.
64. Ye, H., Jin, X., Fu, C., Jin, N., Xu, Y., & Huang, T. (2016). Chloride penetration in concrete exposed to cyclic drying-wetting and carbonation. *Construction and Building Materials*, 112, 457–463.
65. Yildirim, H., Ilica, T., & Sengul, O. (2011). Effect of cement type on the resistance of concrete against chloride penetration. *Construction and Building Materials*, 25(3), 1282–1288.

APENDICE

Apéndice 1.- Propiedades índices del agregado grueso y agregado fino.

1. Propiedades índices del agregado grueso y agregado fino.

1.1.- Tabla de peso volumétrico seco y suelto (PVSS) de la grava, según la norma ASTM C29.

| PVSS | | | | |
|---------|----------------|--------------------------|----------------------------|---------------------------|
| Muestra | P. Recip. (Kg) | P. Muestra + recip. (kg) | Factor (1/m ³) | PVSS (kg/m ³) |
| 1 | 3.947 | 10.034 | 205.7 | 1252.10 |
| 2 | 3.947 | 10.065 | 205.7 | 1258.47 |
| 3 | 3.947 | 10.075 | 205.7 | 1260.53 |
| 4 | 3.947 | 10.011 | 205.7 | 1247.36 |
| | | | \bar{X} | 1254.62 |

1.2 Peso volumétrico seco compacto (PVSC) de agregado grueso, ASTM C29.

| PVSC | | | | |
|---------|----------------|--------------------------|----------------------------|---------------------------|
| Muestra | P. Recip. (Kg) | P. Muestra + recip. (kg) | Factor (1/m ³) | PVSC (kg/m ³) |
| 1 | 3.947 | 10.502 | 205.7 | 1348.36 |
| 2 | 3.947 | 10.770 | 205.7 | 1403.49 |
| 3 | 3.947 | 10.778 | 205.7 | 1405.14 |
| 4 | 3.947 | 10.790 | 205.7 | 1407.61 |
| | | | \bar{X} | 1391.15 |

1.3 Gravedad específica (G.E.) en estado SSS y absorción de agregado grueso, ASTM C127.

| G.E. y Absorción | | | | | |
|------------------|------------|----------|-------------|-------------|--------------|
| Muestra | P. Sum, kg | PSSS, kg | G.E. SSS | P. Seco, kg | Absorción, % |
| 1 | 1.842 | 3.090 | 2.48 | 2.997 | 3.10 |
| 2 | 1.843 | 3.094 | 2.47 | 2.991 | 3.44 |
| \bar{X} | | | 2.47 | | 3.27 |

1.4 Desgaste de agregado grueso (máquina de los ángeles), ASTM C131.

| % Desgaste | | | |
|------------|----------|---------------------|--------------|
| Muestra | Peso, kg | Peso desgastado, kg | % desgaste |
| 1 | 5000 | 1230 | 24.60 |
| 2 | 5000 | 1225 | 24.50 |
| \bar{X} | | | 24.55 |

1.5 Granulometría agregado grueso, ASTM C33.

Muestra: 3000 gr.

| Tamiz N° | Abertura de Tamiz | P. retenido (gr) | Retenido % | Acumulado % | Pasa % | Mín. | Máx. |
|----------|-------------------|------------------|------------|-------------|---------|------|------|
| 1" | 25.00 mm | 0 | 0.00% | 0.00% | 100.00% | 100% | 100% |

| | | | | | | | |
|-------|----------|------|--------|--------|--------|-----|------|
| 3/4" | 19.00 mm | 162 | 5.38% | 5.38% | 94.62% | 90% | 100% |
| 3/8" | 9.50 mm | 2148 | 71.59% | 76.98% | 23.03% | 20% | 55% |
| #4 | 4.75 mm | 662 | 22.07% | 99.04% | 0.96% | 0% | 10% |
| #8 | 2.36 mm | 12 | 0.41% | 99.45% | 0.55% | 0% | 5% |
| Fondo | | 16 | 0.53% | 99.98% | 0.03% | | |
| Total | | 2999 | 99.98% | | | | |

1.6 Peso volumétrico seco y suelto (PVSS) de agregado fino, ASTM C29.

| PVSS | | | | |
|---------|----------------|--------------------------|----------------------------|---------------------------|
| Muestra | P. Recip. (Kg) | P. Muestra + recip. (kg) | Factor (1/m ³) | PVSS (kg/m ³) |
| 1 | 3.946 | 11.665 | 205.7 | 1587.80 |
| 2 | 3.946 | 11.525 | 205.7 | 1559.00 |
| 3 | 3.946 | 11.549 | 205.7 | 1563.94 |
| | | | \bar{X} | 1570.25 |

1.7 Peso volumétrico seco compacto (PVSC) de agregado fino, ASTM C29.

| PVSC | | | | |
|---------|----------------|--------------------------|----------------------------|---------------------------|
| Muestra | P. Recip. (Kg) | P. Muestra + recip. (kg) | Factor (1/m ³) | PVSC (kg/m ³) |
| 1 | 3.946 | 12.340 | 205.7 | 1726.65 |
| 2 | 3.946 | 12.295 | 205.7 | 1717.39 |
| 3 | 3.946 | 12.267 | 205.7 | 1711.63 |
| | | | \bar{X} | 1718.55 |

1.8 Gravedad específica (G.E.) en estado SSS y absorción de agregado grueso, ASTM C128.

| G.E. y absorción | | | | | | |
|------------------|-----|-----|------|------|-------------|--------------|
| Muestra | A | S | B | C | G.E. SSS | Absorción, % |
| 1 | 486 | 500 | 1252 | 1563 | 2.65 | 2.88 |
| 2 | 486 | 500 | 1252 | 1562 | 2.63 | 2.88 |
| \bar{X} | | | | | 2.64 | 2.88 |

$$G.E._{SSS} = \frac{S}{B + S - C}$$

A: Masa de la muestra de ensayo seca al horno, gr.

S: Masa de la muestra de ensayo, saturada superficialmente seca, gr.

B: Masa del picnómetro con agua hasta la marca de calibración, gr.

C: Masa del picnómetro con muestra de ensayo y agua hasta la marca de calibración, gr.

1.9 Granulometría agregado fino, ASTM C33.

Muestra: 500 gr.

| Tamiz N° | Peso retenido (gr) | Retenido % | Acumulado % | Pasa % | Mín. | Máx. | Abertura malla |
|----------|--------------------|------------|-------------|---------|------|------|----------------|
| 3/8 " | 0 | 0.00% | 0.00% | 100.00% | 100% | 100% | 9.500 mm |

| | | | | | | | |
|-------|--------|--------|--------|--------|-----|------|----------|
| #4 | 1 | 0.25% | 0.25% | 99.75% | 95% | 100% | 4.750 mm |
| #8 | 72 | 14.45% | 14.70% | 85.30% | 80% | 100% | 2.360 mm |
| #16 | 121 | 24.20% | 38.90% | 61.10% | 50% | 85% | 1.180 mm |
| #30 | 89 | 17.80% | 56.70% | 43.30% | 25% | 60% | 0.600 mm |
| #50 | 74 | 14.70% | 71.40% | 28.60% | 5% | 30% | 0.300 mm |
| #100 | 54 | 10.70% | 82.10% | 17.90% | 0% | 10% | 0.150 mm |
| #200 | 31 | 6.20% | 88.30% | 11.70% | | | 0.075 mm |
| Fondo | 14 | 2.75% | 91.05% | 8.95% | | | |
| Total | 455.25 | 91.05% | | | | | |

Módulo de finura: 2.64

Apéndice 2.- Dosificación de mezclas de concreto.

Características de diseño de mezclas:

Método: ACI diseño de mezclas por volumen
 Tipo de cemento: Cemento Portland Compuesto (CPC)
 Relación A/C: 0.45
 Aire atrapado: 2%
 80% del agua total para lograr el estado SSS de los agregados.
 20% del agua total para mediar la mezcla.
 Tamaño máximo de agregado: ¾"
 Revenimiento: 10 cm ± 2.5cm

Dosificación de materiales sin corrección, kg/m³.

| MATERIALES | % NTC por peso de cemento | |
|---------------------|---------------------------|--------------|
| | 0 | 0.5 |
| Agua | 205 | 205 |
| Cemento CPC | 455.56 | 455.56 |
| Agregado Grueso | 884.77 | 884.77 |
| Agregado Fino | 718.08 | 718.08 |
| NTC multipared | 0 | 2.27 |
| Familia de concreto | CPC 0.45 | CPC 0.45 NTC |

Dosificación de materiales corregida por humedad, kg/m³.

| MATERIALES | % NTC por peso de cemento | |
|---------------------|---------------------------|--------------|
| | 0 | 0.5 |
| Agua de mezclado | 254.61 | 254.61 |
| Agua absorbida | 49.61 | 49.61 |
| Cemento CPC | 455.56 | 455.56 |
| Agregado Grueso | 885.77 | 885.77 |
| Agregado Fino | 718.08 | 718.08 |
| NTC multipared | 0 | 2.27 |
| Familia de concreto | CPC 0.45 | CPC 0.45 NTC |

Cantidad por amasadas 79 litros, kg.

| MATERIALES | % NTC por peso de cemento | |
|---------------------|---------------------------|--------------|
| | 0 | 0.5 |
| Amasada (litros) | 79 | 79 |
| Agua | 20.11 | 20.11 |
| Cemento CPC | 35.99 | 35.99 |
| Agregado Grueso | 69.90 | 69.90 |
| Agregado Fino | 56.73 | 56.73 |
| NTC multipared | 0 | 0.179 |
| Familia de concreto | CPC 0.45 | CPC 0.45 NTC |

Características de diseño de mezclas:

Método: ACI diseño de mezclas por volumen
Tipo de cemento: Cemento Portland Puzolanico (CPP)
Relación A/C: 0.45
Aire atrapado: 2%
80% del agua total para lograr el estado SSS de los agregados.
20% del agua total para mediar la mezcla.
Tamaño máximo de agregado: ¾"
Revenimiento: 10 cm ± 2.5cm

Dosificación de materiales sin corrección, kg/m³.

| MATERIALES | % NTC por peso de cemento | |
|---------------------|---------------------------|--------------|
| | 0 | 0.5 |
| Agua | 205 | 205 |
| Cemento CPP | 455.56 | 455.56 |
| Agregado Grueso | 884.77 | 884.77 |
| Agregado Fino | 718.08 | 718.08 |
| NTC multipared | 0 | 2.27 |
| Familia de concreto | CPP 0.45 | CPP 0.45 NTC |

Dosificación de materiales corregida por humedad, kg/m³.

| MATERIALES | % NTC por peso de cemento | |
|---------------------|---------------------------|--------------|
| | 0 | 0.5 |
| Agua de mezclado | 254.61 | 254.61 |
| Agua absorbida | 49.61 | 49.61 |
| Cemento CPP | 455.56 | 455.56 |
| Agregado Grueso | 885.77 | 885.77 |
| Agregado Fino | 718.08 | 718.08 |
| NTC multipared | 0 | 2.27 |
| Familia de concreto | CPP 0.45 | CPP 0.45 NTC |

Cantidad por amasadas 78 litros, kg.

| MATERIALES | % NTC por peso de cemento | |
|---------------------|---------------------------|--------------|
| | 0 | 0.5 |
| Amasada (litros) | 78 | 78 |
| Agua | 19.86 | 19.86 |
| Cemento CPP | 35.53 | 35.53 |
| Agregado Grueso | 69.01 | 69.01 |
| Agregado Fino | 56.01 | 56.01 |
| NTC multipared | 0 | 0.177 |
| Familia de concreto | CPP 0.45 | CPP 0.45 NTC |

Características de diseño de mezclas:

Método: ACI diseño de mezclas por volumen
Tipo de cemento: Cemento Portland Compuesto (CPC)
Relación A/C: 0.5
Aire atrapado: 2%
80% del agua total para lograr el estado SSS de los agregados.
20% del agua total para mediar la mezcla.
Tamaño máximo de agregado: ¾"
Revenimiento: 10 cm ± 2.5cm

Dosificación de materiales sin corrección, kg/m³.

| MATERIALES | % NTC por peso de cemento | |
|---------------------|---------------------------|-------------|
| | 0 | 0.5 |
| Agua | 205 | 205 |
| Cemento CPC | 410 | 410 |
| Agregado Grueso | 884.77 | 884.77 |
| Agregado Fino | 757.68 | 757.68 |
| NTC multipared | 0 | 2.05 |
| Familia de concreto | CPC 0.5 | CPC 0.5 NTC |

Dosificación de materiales corregida por humedad, kg/m³.

| MATERIALES | % NTC por peso de cemento | |
|---------------------|---------------------------|-------------|
| | 0 | 0.5 |
| Agua de mezclado | 255.75 | 255.75 |
| Agua absorbida | 50.75 | 50.75 |
| Cemento CPC | 410.00 | 410.00 |
| Agregado Grueso | 884.77 | 884.77 |
| Agregado Fino | 757.68 | 757.68 |
| NTC multipared | 0 | 2.05 |
| Familia de concreto | CPC 0.5 | CPC 0.5 NTC |

Cantidad por amasadas 79 litros, kg.

| MATERIALES | % NTC por peso de cemento | |
|---------------------|---------------------------|-------------|
| | 0 | 0.5 |
| Amasada (litros) | 79 | 79 |
| Agua | 20.20 | 20.20 |
| Cemento CPC | 32.39 | 32.39 |
| Agregado Grueso | 69.90 | 69.90 |
| Agregado Fino | 59.86 | 59.86 |
| NTC multipared | 0 | 0.161 |
| Familia de concreto | CPC 0.5 | CPC 0.5 NTC |

Características de diseño de mezclas:

Método: ACI diseño de mezclas por volumen
Tipo de cemento: Cemento Portland Puzolanico (CPP)
Relación A/C: 0.5
Aire atrapado: 2%
80% del agua total para lograr el estado SSS de los agregados.
20% del agua total para mediar la mezcla.
Tamaño máximo de agregado: ¾”
Revenimiento: 10 cm ± 2.5cm

Dosificación de materiales sin corrección, kg/m³.

| MATERIALES | % NTC por peso de cemento | |
|---------------------|---------------------------|-------------|
| | 0 | 0.5 |
| Agua | 205 | 205 |
| Cemento CPP | 410 | 410 |
| Agregado Grueso | 884.77 | 884.77 |
| Agregado Fino | 757.68 | 757.68 |
| NTC multipared | 0 | 2.05 |
| Familia de concreto | CPP 0.5 | CPP 0.5 NTC |

Dosificación de materiales corregida por humedad, kg/m³.

| MATERIALES | % NTC por peso de cemento | |
|---------------------|---------------------------|-------------|
| | 0 | 0.5 |
| Agua de mezclado | 255.75 | 255.75 |
| Agua absorbida | 50.75 | 50.75 |
| Cemento CPP | 410.00 | 410.00 |
| Agregado Grueso | 884.77 | 884.77 |
| Agregado Fino | 757.68 | 757.68 |
| NTC multipared | 0 | 2.05 |
| Familia de concreto | CPP 0.5 | CPP 0.5 NTC |

Cantidad por amasadas 85 litros, kg.

| MATERIALES | % NTC por peso de cemento | |
|---------------------|---------------------------|-------------|
| | 0 | 0.5 |
| Amasada (litros) | 85 | 85 |
| Agua | 21.47 | 21.47 |
| Cemento CPP | 34.85 | 34.85 |
| Agregado Grueso | 75.21 | 75.21 |
| Agregado Fino | 64.40 | 64.40 |
| NTC multipared | 0 | 0.174 |
| Familia de concreto | CPP 0.5 | CPP 0.5 NTC |

Características de diseño de mezclas:

Método: ACI diseño de mezclas por volumen
Tipo de cemento: Cemento Portland Compuesto (CPC)
Relación A/C: 0.65
Aire atrapado: 2%
80% del agua total para lograr el estado SSS de los agregados.
20% del agua total para mediar la mezcla.
Tamaño máximo de agregado: ¾"
Revenimiento: 10 cm ± 2.5cm

Dosificación de materiales sin corrección, kg/m³.

| MATERIALES | % NTC por peso de cemento | |
|---------------------|---------------------------|--------------|
| | 0 | 0.5 |
| Agua | 205 | 205 |
| Cemento CPC | 315.38 | 315.38 |
| Agregado Grueso | 884.77 | 884.77 |
| Agregado Fino | 836.88 | 836.88 |
| NTC multipared | 0 | 1.57 |
| Familia de concreto | CPC 0.65 | CPC 0.65 NTC |

Dosificación de materiales corregida por humedad, kg/m³.

| MATERIALES | % NTC por peso de cemento | |
|---------------------|---------------------------|--------------|
| | 0 | 0.5 |
| Agua de mezclado | 258.03 | 258.03 |
| Agua absorbida | 53.03 | 53.03 |
| Cemento CPC | 315.38 | 315.38 |
| Agregado Grueso | 884.77 | 884.77 |
| Agregado Fino | 836.88 | 836.88 |
| NTC multipared | 0 | 1.57 |
| Familia de concreto | CPC 0.65 | CPC 0.65 NTC |

Cantidad por amasadas 79 litros, kg.

| MATERIALES | % NTC por peso de cemento | |
|---------------------|---------------------------|--------------|
| | 0 | 0.5 |
| Amasada (litros) | 78 | 78 |
| Agua | 20.38 | 20.38 |
| Cemento CPC | 24.92 | 24.92 |
| Agregado Grueso | 69.90 | 69.90 |
| Agregado Fino | 66.11 | 66.11 |
| NTC multipared | 0 | 0.124 |
| Familia de concreto | CPC 0.65 | CPC 0.65 NTC |

Características de diseño de mezclas:

Método: ACI diseño de mezclas por volumen
Tipo de cemento: Cemento Portland Puzolanico (CPP)
Relación A/C: 0.65
Aire atrapado: 2%
80% del agua total para lograr el estado SSS de los agregados.
20% del agua total para mediar la mezcla.
Tamaño máximo de agregado: ¾”
Revenimiento: 10 cm ± 2.5cm

Dosificación de materiales sin corrección, kg/m³.

| MATERIALES | % NTC por peso de cemento | |
|---------------------|---------------------------|--------------|
| | 0 | 0.5 |
| Agua | 205 | 205 |
| Cemento CPP | 315.38 | 315.38 |
| Agregado Grueso | 884.77 | 884.77 |
| Agregado Fino | 836.88 | 836.88 |
| NTC multipared | 0 | 1.57 |
| Familia de concreto | CPP 0.65 | CPP 0.65 NTC |

Dosificación de materiales corregida por humedad, kg/m³.

| MATERIALES | % NTC por peso de cemento | |
|---------------------|---------------------------|--------------|
| | 0 | 0.5 |
| Agua de mezclado | 258.03 | 258.03 |
| Agua absorbida | 53.03 | 53.03 |
| Cemento CPP | 315.38 | 315.38 |
| Agregado Grueso | 884.77 | 884.77 |
| Agregado Fino | 836.88 | 836.88 |
| NTC multipared | 0 | 1.57 |
| Familia de concreto | CPP 0.65 | CPP 0.65 NTC |

Cantidad por amasadas 78 litros, kg.

| MATERIALES | % NTC por peso de cemento | |
|---------------------|---------------------------|--------------|
| | 0 | 0.5 |
| Amasada (litros) | 78 | 78 |
| Agua | 19.95 | 19.95 |
| Cemento CPP | 24.60 | 24.60 |
| Agregado Grueso | 69.18 | 69.18 |
| Agregado Fino | 65.28 | 65.28 |
| NTC multipared | 0 | 0.123 |
| Familia de concreto | CPP 0.65 | CPP 0.65 NTC |

Apéndice 3.- porosidad densidad y absorción de los concretos.

Tabla 3.1.- Tabla de pesos presentados en seco, SSS, sumergido, densidad aparente y absorción.

Porosidad, densidad y absorción de los concretos.

| MEZCLA | NUMERO DE ESPÉCIMEN | PESO SATURADO G | PESO SECO LA HORNO | PESO HERVIDO G | PESO SUMERGIDO G | POROSIDAD % | DENSIDAD APARENTE | ABSORCIÓN % D I |
|--------------|---------------------|-----------------|--------------------|----------------|------------------|-------------|-------------------|-----------------|
| CPP 0.65 | 1 | 3.593 | 3.235 | 3.564 | 1.999 | 21.022 | 2.029 | 11.066 |
| | 2 | 3.570 | 3.210 | 3.549 | 1.990 | 21.745 | 2.032 | 11.215 |
| | 3 | 3.582 | 3.225 | 3.562 | 2.000 | 21.575 | 2.039 | 11.070 |
| | PROMEDIO | 3.582 | 3.223 | 3.558 | 1.996 | 21.447 | 2.033 | 11.117 |
| CPC 0.65 | 1 | 3.650 | 3.330 | 3.630 | 2.065 | 19.169 | 2.101 | 9.610 |
| | 2 | 3.615 | 3.300 | 3.590 | 2.040 | 18.710 | 2.095 | 9.545 |
| | 3 | 3.630 | 3.200 | 3.610 | 2.055 | 26.367 | 2.032 | 13.438 |
| | PROMEDIO | 3.632 | 3.277 | 3.610 | 2.053 | 21.415 | 2.076 | 10.864 |
| CPP 0.65 NTC | 1 | 3.580 | 3.231 | 3.563 | 2.007 | 21.337 | 2.054 | 10.802 |
| | 2 | 3.589 | 3.247 | 3.575 | 2.019 | 21.080 | 2.068 | 10.533 |
| | 3 | 3.573 | 3.224 | 3.559 | 2.005 | 21.557 | 2.056 | 10.825 |
| | PROMEDIO | 3.581 | 3.234 | 3.566 | 2.010 | 21.325 | 2.059 | 10.720 |
| CPC 0.65 NTC | 1 | 3.627 | 3.314 | 3.607 | 2.044 | 18.938 | 2.092 | 9.544 |
| | 2 | 3.633 | 3.321 | 3.611 | 2.044 | 18.507 | 2.090 | 9.395 |
| | 3 | 3.618 | 3.305 | 3.598 | 2.030 | 18.686 | 2.081 | 9.470 |
| | PROMEDIO | 3.626 | 3.313 | 3.605 | 2.039 | 18.710 | 2.088 | 9.470 |
| CPP 0.5 | 1 | 3.586 | 3.240 | 3.573 | 1.992 | 21.063 | 2.033 | 10.679 |
| | 2 | 3.557 | 3.215 | 3.543 | 1.979 | 20.972 | 2.037 | 10.638 |
| | 3 | 3.564 | 3.220 | 3.551 | 1.982 | 21.096 | 2.035 | 10.683 |
| | PROMEDIO | 3.569 | 3.225 | 3.556 | 1.984 | 21.044 | 2.035 | 10.667 |
| CPC 0.5 | 1 | 3.615 | 3.315 | 3.595 | 2.040 | 18.006 | 2.105 | 9.050 |
| | 2 | 3.600 | 3.300 | 3.580 | 2.060 | 18.065 | 2.102 | 9.091 |
| | 3 | 3.620 | 3.315 | 3.595 | 2.070 | 17.949 | 2.091 | 9.201 |
| | PROMEDIO | 3.612 | 3.310 | 3.590 | 2.057 | 18.007 | 2.099 | 9.114 |
| CPP 0.5 NTC | 1 | 3.575 | 3.245 | 3.563 | 1.986 | 21.179 | 2.032 | 10.715 |
| | 2 | 3.561 | 3.222 | 3.551 | 1.988 | 21.177 | 2.047 | 10.590 |
| | 3 | 3.577 | 3.233 | 3.565 | 1.992 | 21.360 | 2.037 | 10.777 |
| | PROMEDIO | 3.571 | 3.233 | 3.560 | 1.989 | 21.239 | 2.039 | 10.694 |
| CPC 0.5 NTC | 1 | 3.633 | 3.332 | 3.616 | 2.044 | 18.066 | 2.097 | 9.034 |
| | 2 | 3.645 | 3.346 | 3.629 | 2.055 | 17.980 | 2.104 | 8.936 |
| | 3 | 3.639 | 3.332 | 3.621 | 2.049 | 18.384 | 2.096 | 9.214 |
| | PROMEDIO | 3.639 | 3.337 | 3.622 | 2.049 | 18.143 | 2.099 | 9.061 |
| CPP 0.45 | 1 | 3.565 | 3.230 | 3.555 | 1.985 | 20.701 | 2.044 | 10.372 |
| | 2 | 3.600 | 3.250 | 3.585 | 2.005 | 21.203 | 2.038 | 10.769 |

| | | | | | | | | |
|--------------------|----------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|--------|
| | 3 | 3.550 | 3.210 | 3.535 | 1.975 | 20.833 | 2.038 | 10.592 |
| | PROMEDIO | 3.572 | 3.230 | 3.558 | 1.988 | 20.912 | 2.040 | 10.578 |
| CPC 0.45 | 1 | 3.650 | 3.350 | 3.630 | 2.060 | 17.834 | 2.107 | 8.955 |
| | 2 | 3.630 | 3.335 | 3.610 | 2.050 | 17.628 | 2.111 | 8.846 |
| | 3 | 3.630 | 3.340 | 3.615 | 2.045 | 17.516 | 2.107 | 8.683 |
| | PROMEDIO | 3.637 | 3.342 | 3.618 | 2.052 | 17.660 | 2.108 | 8.828 |
| CPP 0.45 NTC | 1 | 3.571 | 3.215 | 3.556 | 1.986 | 21.720 | 2.028 | 11.073 |
| | 2 | 3.570 | 3.204 | 3.551 | 1.919 | 22.074 | 2.014 | 11.423 |
| | 3 | 3.564 | 3.203 | 3.545 | 1.976 | 21.797 | 2.017 | 11.271 |
| | PROMEDIO | 3.568 | 3.207 | 3.551 | 1.960 | 21.864 | 2.020 | 11.256 |
| CPC 0.45 NTC | 1 | 3.625 | 3.326 | 3.609 | 2.038 | 18.014 | 2.096 | 8.990 |
| | 2 | 3.604 | 3.295 | 3.586 | 2.016 | 18.535 | 2.075 | 9.378 |
| | 3 | 3.606 | 3.297 | 3.588 | 2.021 | 18.571 | 2.080 | 9.372 |
| | PROMEDIO | 3.612 | 3.306 | 3.594 | 2.025 | 18.373 | 2.084 | 9.247 |

Apéndice 4.- Resistencia a la compresión.

Tabla 4.1.- Resistencia a compresión a los 28 días

| MEZCLA | N° de espécimen | DIAMETRO (CM) | ALTURA (CM) | PESO (KG) | CARGA DE RUPTURA (KG) | RESISTENCIA F'c (KG/CM2) |
|-------------------|-----------------|---------------|-------------|-----------|-----------------------|--------------------------|
| CPP 0.65 | 1 | 14.9 | 30 | 11.923 | 42060 | 241.22 |
| | 2 | 14.9 | 30 | 11.853 | 48130 | 276.03 |
| | 3 | 15 | 30 | 11.992 | 47180 | 266.98 |
| | 4 | 14.9 | 30 | 11.883 | 46880 | 268.86 |
| | 5 | 14.9 | 30 | 11.903 | 50210 | 287.96 |
| | | | | | \bar{X} | 268.21 |
| CPP 0.65 NTC 0.5% | 1 | 14.975 | 30 | 11.990 | 40080 | 227.56 |
| | 2 | 14.950 | 30 | 12.000 | 42260 | 240.74 |
| | 3 | 14.950 | 30 | 12.020 | 42000 | 239.26 |
| | 4 | 14.925 | 30 | 11.940 | 35060 | 200.40 |
| | 5 | 14.925 | 30 | 12.105 | 36010 | 205.83 |
| | | | | | \bar{X} | 227.56 |
| CPC 0.65 | 1 | 14.9750 | 30 | 12.110 | 47140 | 267.65 |
| | 2 | 15.2750 | 30 | 12.170 | 39020 | 212.93 |
| | 3 | 14.9500 | 30 | 12.115 | 50350 | 286.83 |
| | 4 | 14.9750 | 30 | 12.100 | 42040 | 238.69 |
| | 5 | 15.0750 | 30 | 12.105 | 47650 | 266.97 |
| | | | | | \bar{X} | 254.61 |
| CPC 0.65 NTC 0.5% | 1 | 14.932 | 30 | 12.080 | 37180 | 212.32 |
| | 2 | 14.925 | 30 | 12.125 | 36280 | 207.37 |
| | 3 | 14.925 | 30 | 12.240 | 36150 | 206.63 |
| | 4 | 14.925 | 30 | 12.115 | 40930 | 233.95 |
| | 5 | 14.925 | 30 | 12.060 | 40760 | 232.98 |
| | | | | | \bar{X} | 218.65 |
| CPP 0.5 | 1 | 14.98 | 30 | 11.934 | 64090 | 363.64 |
| | 2 | 14.95 | 30 | 11.952 | 58350 | 332.41 |
| | 3 | 14.91 | 30 | 11.903 | 64320 | 368.38 |
| | 4 | 15.00 | 30 | 11.939 | 62210 | 352.04 |
| | 5 | 14.96 | 30 | 11.916 | 66320 | 377.30 |
| | | | | | \bar{X} | 358.75 |
| Falla eléctrica | 1 | 14.910 | 30 | 11.930 | 46370 | 265.58 |
| CPP 0.5 NTC 0.5% | 2 | 14.975 | 30 | 11.950 | 56830 | 322.67 |
| | 3 | 14.975 | 30 | 11.960 | 52640 | 298.88 |
| | 4 | 14.955 | 30 | 11.965 | 56920 | 324.04 |
| | 5 | 14.950 | 30 | 12.000 | 58640 | 334.06 |

| | | | | | | |
|------------------------------|----------|--------|----|--------|-----------|---------------|
| | | | | | \bar{X} | 319.91 |
| <i>CPC 0.50</i> | 1 | 14.975 | 30 | 12.060 | 65990 | 374.67 |
| | 2 | 14.975 | 30 | 12.240 | 68270 | 387.62 |
| | 3 | 14.925 | 30 | 12.145 | 60230 | 344.27 |
| | 4 | 14.92 | 30 | 12.075 | 69380 | 396.83 |
| | 5 | 14.975 | 30 | 12.135 | 67110 | 381.03 |
| | | | | | \bar{X} | 376.88 |
| <i>CPC 0.5 NTC 0.5%</i> | 1 | 15.010 | 30 | 12.190 | 53380 | 301.67 |
| | 2 | 14.96 | 30 | 12.180 | 53050 | 301.81 |
| | 3 | 14.880 | 30 | 12.045 | 54530 | 313.57 |
| | 4 | 14.975 | 30 | 12.150 | 62220 | 353.27 |
| | 5 | 14.937 | 30 | 12.135 | 57496 | 328.11 |
| | | | | | \bar{X} | 319.69 |
| <i>CPP 0.45</i> | 1 | 15.00 | 30 | 11.960 | 78770 | 445.75 |
| | 2 | 14.95 | 30 | 12.045 | 75580 | 430.56 |
| | 3 | 15.00 | 30 | 11.995 | 74250 | 420.17 |
| | 4 | 14.95 | 30 | 11.980 | 64980 | 370.18 |
| | 5 | 14.98 | 30 | 11.940 | 75440 | 428.04 |
| | | | | | \bar{X} | 418.94 |
| <i>CPP 0.45 NTC 0.5%</i> | 1 | 15.025 | 30 | 11.940 | 66660 | 375.96 |
| | 2 | 14.960 | 30 | 11.910 | 67430 | 383.62 |
| | 3 | 14.970 | 30 | 11.865 | 53930 | 306.41 |
| | 4 | 15.025 | 30 | 11.995 | 59660 | 336.48 |
| | 5 | 15.000 | 30 | 11.970 | 57510 | 325.44 |
| | | | | | \bar{X} | 345.58 |
| <i>CPC 0.45</i> | 1 | 14.975 | 30 | 12.170 | 69940 | 397.10 |
| | 2 | 14.975 | 30 | 12.19 | 61870 | 351.28 |
| | 3 | 15.020 | 30 | 12.195 | 68290 | 385.41 |
| | 4 | 15.025 | 30 | 12.145 | 79210 | 446.75 |
| | 5 | 15.025 | 30 | 12.150 | 83700 | 472.07 |
| | | | | | \bar{X} | 410.52 |
| <i>CPC 0.45 NTC 0.5%</i> | 1 | 15.000 | 30 | 12.130 | 56800 | 321.42 |
| | 2 | 15.037 | 30 | 12.060 | 63730 | 358.87 |
| | 3 | 15.050 | 30 | 12.105 | 60530 | 340.26 |
| | 4 | 14.930 | 30 | 12.095 | 63920 | 365.11 |
| | 5 | 14.920 | 30 | 11.995 | 62030 | 354.79 |
| | | | | | \bar{X} | 348.09 |

Apéndice 5.- Módulo de elasticidad. –

| Mezcla | No. Espécimen | Carga 40% (kg) | Esfuerzo 40% (kg/cm2) | Deformación mm | ME Kg/cm2 |
|-------------------|---------------|----------------|-----------------------|-----------------------------|-------------------|
| CPP 0.65 | 1 | 19004.64 | 107.86 | 0.050 | 313,868.17 |
| | 2 | 19004.64 | 107.74 | 0.053 | 293,133.71 |
| | 3 | 19004.64 | 107.86 | 0.062 | 251,278.12 |
| | | | | \bar{X} | 286,093.33 |
| CPC 0.65 | 1 | 18871.04 | 107.12 | 0.060 | 249,959.69 |
| | 2 | 18695.32 | 106.64 | 0.058 | 269,435.34 |
| | 3 | 18123.75 | 107.30 | 0.062 | 239,492.20 |
| | | | | \bar{X} | 252,962.41 |
| CPP 0.65 NTC 0.5% | 1 | 15952.61 | 91.29 | 0.047 | 269,199.06 |
| | 2 | 15950.47 | 91.19 | 0.044 | 281,789.52 |
| | 3 | 15765.21 | 91.11 | 0.053 | 231,636.41 |
| | | | | \bar{X} | 260,875.00 |
| CPC 0.65 NTC 0.5% | 1 | 15301.33 | 87.80 | 0.047 | 266,886.84 |
| | 2 | 15455.49 | 87.49 | 0.052 | 240,549.10 |
| | 3 | 15455.49 | 87.49 | 0.045 | 264,522.57 |
| | | | | \bar{X} | 257,319.50 |
| CPP 0.50 | 1 | 25704.26 | 145.77 | 0.059 | 366,715.85 |
| | 2 | 25533.18 | 145.78 | 0.068 | 317,079.12 |
| | 3 | 25704.26 | 145.43 | 0.068 | 319,634.00 |
| | | | | \bar{X} | 334,476.32 |
| CPC 0.50 | 1 | 27023.34 | 152.45 | 0.061 | 363,183.45 |
| | 2 | 26664.83 | 152.90 | 0.071 | 311,103.96 |
| | 3 | 26843.78 | 152.67 | 0.074 | 298,795.87 |
| | | | | \bar{X} | 324,361.09 |
| CPP 0.50 NTC 0.5% | 1 | 22552.93 | 129.50 | 0.071 | 270,357.43 |
| | 2 | 22613.52 | 129.55 | 0.063 | 301,284.55 |
| | 3 | 22704.55 | 129.32 | 0.056 | 310,764.77 |
| | | | | \bar{X} | 294,135.58 |
| CPC 0.50 NTC 0.5% | 1 | 22476.97 | 127.89 | 0.058 | 319,507.98 |
| | 2 | 22748.22 | 128.22 | 0.068 | 271,897.46 |
| | 3 | 22522.06 | 128.77 | 0.059 | 312,092.91 |
| | | | | \bar{X} | 301,166.12 |

Apéndice 6.- Absorción capilar. –

CEDULA PRUEBA ABSORCIÓN CAPILAR
 ACTM C 1585, METODO FAGERLUND

| | | | | Esp. 1 | | | Esp. 2 | | |
|------------------------------------|--------|------------------|------------|--------|------|--------|--------|------|--------|
| PROBETA | | | | A1.3 | | | A2.4 | | |
| Diámetro (mm) | | | | 100.00 | | | 100.00 | | |
| Radio (mm) | | | | 50.00 | | | 50.00 | | |
| Altura (mm) | | | | 46.2 | | | 48 | | |
| Área (mm²) | | | | 7854 | | | 7854 | | |
| Peso antes de sellado (g) | | | | 776 | | | 825 | | |
| Peso después de sellado (g) | | | | 780 | | | 829 | | |
| Día | S | S ^{0.5} | Tolerancia | Masa | D | I | Masa | D | I |
| 1 | 0 | 0.0 | Inicio | 780.0 | 0.0 | 0.0000 | 829.0 | 0.0 | 0.0000 |
| 1 | 60 | 7.7 | 2s | 784.0 | 4.0 | 0.5096 | 832.0 | 3.0 | 0.3822 |
| 1 | 300 | 17.3 | 10s | 786.0 | 6.0 | 0.7643 | 834.0 | 5.0 | 0.6369 |
| 1 | 600 | 24.5 | 2m | 786.0 | 6.0 | 0.7643 | 835.0 | 6.0 | 0.7643 |
| 1 | 1200 | 34.6 | 2m | 787.0 | 7.0 | 0.8917 | 836.0 | 7.0 | 0.8917 |
| 1 | 1800 | 42.4 | 2m | 788.0 | 8.0 | 1.0191 | 837.0 | 8.0 | 1.0191 |
| 1 | 3600 | 60.0 | 2m | 790.0 | 10.0 | 1.2739 | 839.0 | 10.0 | 1.2739 |
| 1 | 7200 | 84.9 | 5m | 792.0 | 12.0 | 1.5287 | 841.0 | 12.0 | 1.5287 |
| 1 | 10800 | 103.9 | 5m | 795.0 | 15.0 | 1.9108 | 843.0 | 14.0 | 1.7834 |
| 1 | 14400 | 120.0 | 5m | 796.0 | 16.0 | 2.0382 | 844.0 | 15.0 | 1.9108 |
| 1 | 18000 | 134.2 | 5m | 797.0 | 17.0 | 2.1656 | 846.0 | 17.0 | 2.1656 |
| 1 | 21600 | 147.0 | 5m | 799.0 | 19.0 | 2.4204 | 846.0 | 17.0 | 2.1656 |
| 1 | 92220 | 303.7 | 2h | 814.0 | 34.0 | 4.3312 | 858.0 | 29.0 | 3.6943 |
| 2 | 193200 | 439.5 | 2h | 821.0 | 41.0 | 5.2229 | 866.0 | 37.0 | 4.7134 |
| 3 | 268500 | 518.2 | 2h | 821.0 | 41.0 | 5.2229 | 868.0 | 39.0 | 4.9682 |
| 5 | 432000 | 657.3 | 2h | 822.0 | 42.0 | 5.3503 | 869.0 | 40.0 | 5.0955 |
| 6 | 527580 | 726.3 | 2h | 823.0 | 43.0 | 5.4777 | 869.0 | 40.0 | 5.0955 |
| 7 | 622200 | 788.8 | 2h | 823.0 | 43.0 | 5.4777 | 870.0 | 41.0 | 5.2229 |
| 8 | 691200 | 831.4 | 2h | 823.0 | 43.0 | 5.4777 | 870.0 | 41.0 | 5.2229 |

| | |
|---------------|-----------------|
| FAMILIA | CPP 0.65 |
| TIEMPO CURADO | 28 DIAS |
| RELACIÓN | 0.65 |
| FECHA | 21/01/2017 |
| FOLIO | RL001 |

| Esp. | Probeta | T | T ^{0.5} | Wo | Wt | A | m | k | εe | S |
|-----------|---------|--------------|------------------|--------------|--------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------|--------------|
| 1 | A1.3 | 52900 | 230 | 780.0 | 823.0 | 7.85E-03 | 2.48E+07 | 2.38E-02 | 11.86% | 12.05 |
| 2 | A2.4 | 57600 | 240 | 829.0 | 870.0 | 7.85E-03 | 2.50E+07 | 2.18E-02 | 10.88% | 12.00 |
| \bar{X} | | 55250 | 235 | 804.5 | 846.5 | 7.85E-03 | 2.49E+07 | 2.28E-02 | 11.37% | 12.03 |

CEDULA PRUEBA ABSORCIÓN CAPILAR
ACTM C 1585, METODO FAGERLUND

| | | | | Esp. 1 | | | Esp. 2 | | |
|------------------------------------|--------|------------------|------------|--------|------|--------|--------|------|--------|
| PROBETA | | | | B1.2 | | | B2.3 | | |
| Diámetro (mm) | | | | 100.00 | | | 100.00 | | |
| Radio (mm) | | | | 50.00 | | | 50.00 | | |
| Altura (mm) | | | | 50 | | | 50 | | |
| Área (mm²) | | | | 7854 | | | 7854 | | |
| Peso antes de sellado (g) | | | | 846 | | | 848 | | |
| Peso después de sellado (g) | | | | 852 | | | 853 | | |
| Día | S | S ^{0.5} | Tolerancia | Masa | D | I | Masa | D | I |
| 1 | 0 | 0.0 | Inicio | 852.0 | 0.0 | 0.0000 | 853.0 | 0.0 | 0.0000 |
| 1 | 60 | 7.7 | 2s | 854.0 | 2.0 | 0.2548 | 855.0 | 2.0 | 0.2548 |
| 1 | 300 | 17.3 | 10s | 855.0 | 3.0 | 0.3822 | 857.0 | 4.0 | 0.5096 |
| 1 | 600 | 24.5 | 2m | 856.0 | 4.0 | 0.5096 | 857.0 | 4.0 | 0.5096 |
| 1 | 1200 | 34.6 | 2m | 856.0 | 4.0 | 0.5096 | 858.0 | 5.0 | 0.6369 |
| 1 | 1800 | 42.4 | 2m | 857.0 | 5.0 | 0.6369 | 859.0 | 6.0 | 0.7643 |
| 1 | 3600 | 60.0 | 2m | 858.0 | 6.0 | 0.7643 | 860.0 | 7.0 | 0.8917 |
| 1 | 7200 | 84.9 | 5m | 859.0 | 7.0 | 0.8917 | 861.0 | 8.0 | 1.0191 |
| 1 | 10800 | 103.9 | 5m | 860.0 | 8.0 | 1.0191 | 862.0 | 9.0 | 1.1465 |
| 1 | 14400 | 120.0 | 5m | 861.0 | 9.0 | 1.1465 | 863.0 | 10.0 | 1.2739 |
| 1 | 18000 | 134.2 | 5m | 862.0 | 10.0 | 1.2739 | 863.0 | 10.0 | 1.2739 |
| 1 | 21600 | 147.0 | 5m | 863.0 | 11.0 | 1.4013 | 864.0 | 11.0 | 1.4013 |
| 1 | 92220 | 303.7 | 2h | 872.0 | 20.0 | 2.5478 | 871.0 | 18.0 | 2.2930 |
| 2 | 193200 | 439.5 | 2h | 879.0 | 27.0 | 3.4395 | 878.0 | 25.0 | 3.1847 |
| 3 | 268500 | 518.2 | 2h | 882.0 | 30.0 | 3.8217 | 880.0 | 27.0 | 3.4395 |
| 5 | 432000 | 657.3 | 2h | 886.0 | 34.0 | 4.3312 | 884.0 | 31.0 | 3.9490 |
| 6 | 527580 | 726.3 | 2h | 887.0 | 35.0 | 4.4586 | 885.0 | 32.0 | 4.0764 |
| 7 | 622200 | 788.8 | 2h | 888.0 | 36.0 | 4.5860 | 886.0 | 33.0 | 4.2038 |
| 8 | 691200 | 831.4 | 2h | 888.0 | 36.0 | 4.5860 | 887.0 | 34.0 | 4.3312 |

| | |
|---------------|-----------------|
| FAMILIA | CPP 0.50 |
| TIEMPO CURADO | 28 DIAS |
| RELACIÓN | 0.5 |
| FECHA | 27/01/2017 |
| FOLIO | RL002 |

| Esp. | Probeta | T | T ^{0.5} | Wo | Wt | A | m | k | εe | S |
|-----------|---------|--------|------------------|-------|-------|----------|----------|----------|-------|------|
| 1 | B1.2 | 90000 | 300 | 852.0 | 888.0 | 7.85E-03 | 3.60E+07 | 1.53E-02 | 9.17% | 10.0 |
| 2 | B2.3 | 108900 | 330 | 853.0 | 887.0 | 7.85E-03 | 4.36E+07 | 1.31E-02 | 8.66% | 9.1 |
| \bar{X} | | 99450 | 315 | 852.5 | 887.5 | 7.85E-03 | 3.98E+07 | 1.42E-02 | 8.92% | 9.6 |

CEDULA PRUEBA ABSORCIÓN CAPILAR
ACTM C 1585, METODO FAGERLUND

| | | | | Esp. 1 | | | Esp. 2 | | |
|------------------------------------|--------|------------------|------------|--------|------|--------|--------|------|--------|
| PROBETA | | | | C1.3 | | | C2.3 | | |
| Diámetro (mm) | | | | 100.00 | | | 100.00 | | |
| Radio (mm) | | | | 50.00 | | | 50.00 | | |
| Altura (mm) | | | | 48.75 | | | 46.5 | | |
| Área (mm²) | | | | 7854 | | | 7854 | | |
| Peso antes de sellado (g) | | | | 800 | | | 787 | | |
| Peso después de sellado (g) | | | | 805 | | | 791 | | |
| Día | S | S ^{0.5} | Tolerancia | Masa | D | I | Masa | D | I |
| 1 | 0 | 0.0 | Inicio | 805.0 | 0.0 | 0.0000 | 791.0 | 0.0 | 0.0000 |
| 1 | 60 | 7.7 | 2s | 808.0 | 3.0 | 0.3822 | 794.0 | 3.0 | 0.3822 |
| 1 | 300 | 17.3 | 10s | 811.0 | 6.0 | 0.7643 | 795.0 | 4.0 | 0.5096 |
| 1 | 600 | 24.5 | 2m | 813.0 | 8.0 | 1.0191 | 795.0 | 4.0 | 0.5096 |
| 1 | 1200 | 34.6 | 2m | 816.0 | 11.0 | 1.4013 | 797.0 | 6.0 | 0.7643 |
| 1 | 1800 | 42.4 | 2m | 818.0 | 13.0 | 1.6561 | 797.0 | 6.0 | 0.7643 |
| 1 | 3600 | 60.0 | 2m | 824.0 | 19.0 | 2.4204 | 799.0 | 8.0 | 1.0191 |
| 1 | 7200 | 84.9 | 5m | 831.0 | 26.0 | 3.3121 | 800.0 | 9.0 | 1.1465 |
| 1 | 10800 | 103.9 | 5m | 836.0 | 31.0 | 3.9490 | 800.0 | 9.0 | 1.1465 |
| 1 | 14400 | 120.0 | 5m | 841.0 | 36.0 | 4.5860 | 802.0 | 11.0 | 1.4013 |
| 1 | 18000 | 134.2 | 5m | 845.0 | 40.0 | 5.0955 | 802.0 | 11.0 | 1.4013 |
| 1 | 21600 | 147.0 | 5m | 849.0 | 44.0 | 5.6051 | 803.0 | 12.0 | 1.5287 |
| 1 | 92220 | 303.7 | 2h | 862.0 | 57.0 | 7.2611 | 811.0 | 20.0 | 2.5478 |
| 2 | 193200 | 439.5 | 2h | 863.0 | 58.0 | 7.3885 | 817.0 | 26.0 | 3.3121 |
| 3 | 268500 | 518.2 | 2h | 863.0 | 58.0 | 7.3885 | 820.0 | 29.0 | 3.6943 |
| 5 | 432000 | 657.3 | 2h | 863.0 | 58.0 | 7.3885 | 823.0 | 32.0 | 4.0764 |
| 6 | 527580 | 726.3 | 2h | 864.0 | 59.0 | 7.5159 | 825.0 | 34.0 | 4.3312 |
| 7 | 622200 | 788.8 | 2h | 864.0 | 59.0 | 7.5159 | 825.0 | 34.0 | 4.3312 |
| 8 | 691200 | 831.4 | 2h | 865.0 | 60.0 | 7.6433 | 825.0 | 34.0 | 4.3312 |

| | |
|---------------|-----------------|
| FAMILIA | CPP 0.45 |
| TIEMPO CURADO | 28 DIAS |
| RELACIÓN | 0.45 |
| FECHA | 06/01/2017 |
| FOLIO | RL003 |

| Esp. | Probeta | T | T ^{0.5} | Wo | Wt | A | m | k | εe | S |
|-----------|---------|--------|------------------|-------|-------|----------|----------|----------|--------|------|
| 1 | C1.3 | 40000 | 200 | 805.0 | 865.0 | 7.85E-03 | 1.68E+07 | 3.82E-02 | 15.68% | 14.6 |
| 2 | C2.3 | 115600 | 340 | 791.0 | 825.0 | 7.85E-03 | 5.35E+07 | 1.27E-02 | 9.31% | 8.2 |
| \bar{X} | | 77800 | 270 | 798.0 | 845.0 | 7.85E-03 | 3.52E+07 | 2.55E-02 | 12.50% | 11.4 |

CEDULA PRUEBA ABSORCIÓN CAPILAR
ACTM C 1585, METODO FAGERLUND

| | | | | Esp. 1 | | | Esp. 2 | | |
|------------------------------------|--------|------------------|------------|--------|------|--------|--------|------|--------|
| PROBETA | | | | D1.3 | | | D2.3 | | |
| Diámetro (mm) | | | | 100.00 | | | 100.00 | | |
| Radio (mm) | | | | 50.00 | | | 50.00 | | |
| Altura (mm) | | | | 49 | | | 48.5 | | |
| Área (mm²) | | | | 7854 | | | 7854 | | |
| Peso antes de sellado (g) | | | | 834 | | | 824 | | |
| Peso después de sellado (g) | | | | 839 | | | 828 | | |
| Día | S | S ^{0.5} | Tolerancia | Masa | D | I | Masa | D | I |
| 1 | 0 | 0.0 | Inicio | 839.0 | 0.0 | 0.0000 | 828.0 | 0.0 | 0.0000 |
| 1 | 60 | 7.7 | 2s | 841.0 | 2.0 | 0.2548 | 831.0 | 3.0 | 0.3822 |
| 1 | 300 | 17.3 | 10s | 844.0 | 5.0 | 0.6369 | 833.0 | 5.0 | 0.6369 |
| 1 | 600 | 24.5 | 2m | 845.0 | 6.0 | 0.7643 | 833.0 | 5.0 | 0.6369 |
| 1 | 1200 | 34.6 | 2m | 846.0 | 7.0 | 0.8917 | 835.0 | 7.0 | 0.8917 |
| 1 | 1800 | 42.4 | 2m | 847.0 | 8.0 | 1.0191 | 836.0 | 8.0 | 1.0191 |
| 1 | 3600 | 60.0 | 2m | 850.0 | 11.0 | 1.4013 | 838.0 | 10.0 | 1.2739 |
| 1 | 7200 | 84.9 | 5m | 853.0 | 14.0 | 1.7834 | 841.0 | 13.0 | 1.6561 |
| 1 | 10800 | 103.9 | 5m | 856.0 | 17.0 | 2.1656 | 843.0 | 15.0 | 1.9108 |
| 1 | 14400 | 120.0 | 5m | 857.0 | 18.0 | 2.2930 | 844.0 | 16.0 | 2.0382 |
| 1 | 18000 | 134.2 | 5m | 859.0 | 20.0 | 2.5478 | 846.0 | 18.0 | 2.2930 |
| 1 | 21600 | 147.0 | 5m | 860.0 | 21.0 | 2.6752 | 847.0 | 19.0 | 2.4204 |
| 1 | 92220 | 303.7 | 2h | 876.0 | 37.0 | 4.7134 | 862.0 | 34.0 | 4.3312 |
| 2 | 193200 | 439.5 | 2h | 881.0 | 42.0 | 5.3503 | 868.0 | 40.0 | 5.0955 |
| 3 | 268500 | 518.2 | 2h | 882.0 | 43.0 | 5.4777 | 869.0 | 41.0 | 5.2229 |
| 5 | 432000 | 657.3 | 2h | 883.0 | 44.0 | 5.6051 | 870.0 | 42.0 | 5.3503 |
| 6 | 527580 | 726.3 | 2h | 883.0 | 44.0 | 5.6051 | 871.0 | 43.0 | 5.4777 |
| 7 | 622200 | 788.8 | 2h | 883.0 | 44.0 | 5.6051 | 871.0 | 43.0 | 5.4777 |
| 8 | 691200 | 831.4 | 2h | 883.0 | 44.0 | 5.6051 | 871.0 | 43.0 | 5.4777 |

| | |
|---------------|-----------------|
| FAMILIA | CPC 0.65 |
| TIEMPO CURADO | 28 DIAS |
| RELACIÓN | 0.65 |
| FECHA | 21/02/2017 |
| FOLIO | RL004 |

| Esp. | Probeta | T | T ^{0.5} | W ₀ | W _t | A | m | k | ε _e | S |
|-----------|---------|-------|------------------|----------------|----------------|----------|----------|----------|----------------|------|
| 1 | D1.3 | 48400 | 220 | 839.0 | 883.0 | 7.85E-03 | 2.02E+07 | 2.55E-02 | 11.44% | 13.3 |
| 2 | D2.3 | 52900 | 230 | 828.0 | 871.0 | 7.85E-03 | 2.25E+07 | 2.38E-02 | 11.29% | 12.6 |
| \bar{X} | | 50650 | 225 | 833.5 | 877.0 | 7.85E-03 | 2.14E+07 | 2.47E-02 | 11.37% | 13.0 |

CEDULA PRUEBA ABSORCIÓN CAPILAR
ACTM C 1585, METODO FAGERLUND

| | | | | Esp. 1 | | | Esp. 2 | | |
|------------------------------------|--------|------------------|------------|--------|------|--------|--------|------|--------|
| PROBETA | | | | E1.3 | | | E2.3 | | |
| Diámetro (mm) | | | | 100.00 | | | 100.00 | | |
| Radio (mm) | | | | 50.00 | | | 50.00 | | |
| Altura (mm) | | | | 48.6 | | | 47 | | |
| Área (mm²) | | | | 7854 | | | 7854 | | |
| Peso antes de sellado (g) | | | | 809 | | | 813 | | |
| Peso después de sellado (g) | | | | 814 | | | 817 | | |
| Día | S | S ^{0.5} | Tolerancia | Masa | D | I | Masa | D | I |
| 1 | 0 | 0.0 | Inicio | 814.0 | 0.0 | 0.0000 | 817.0 | 0.0 | 0.0000 |
| 1 | 60 | 7.7 | 2s | 817.0 | 3.0 | 0.3822 | 819.0 | 2.0 | 0.2548 |
| 1 | 300 | 17.3 | 10s | 820.0 | 6.0 | 0.7643 | 820.0 | 3.0 | 0.3822 |
| 1 | 600 | 24.5 | 2m | 822.0 | 8.0 | 1.0191 | 821.0 | 4.0 | 0.5096 |
| 1 | 1200 | 34.6 | 2m | 824.0 | 10.0 | 1.2739 | 822.0 | 5.0 | 0.6369 |
| 1 | 1800 | 42.4 | 2m | 826.0 | 12.0 | 1.5287 | 822.0 | 5.0 | 0.6369 |
| 1 | 3600 | 60.0 | 2m | 830.0 | 16.0 | 2.0382 | 823.0 | 6.0 | 0.7643 |
| 1 | 7200 | 84.9 | 5m | 835.0 | 21.0 | 2.6752 | 825.0 | 8.0 | 1.0191 |
| 1 | 10800 | 103.9 | 5m | 839.0 | 25.0 | 3.1847 | 825.0 | 8.0 | 1.0191 |
| 1 | 14400 | 120.0 | 5m | 842.0 | 28.0 | 3.5669 | 826.0 | 9.0 | 1.1465 |
| 1 | 18000 | 134.2 | 5m | 845.0 | 31.0 | 3.9490 | 827.0 | 10.0 | 1.2739 |
| 1 | 21600 | 147.0 | 5m | 848.0 | 34.0 | 4.3312 | 828.0 | 11.0 | 1.4013 |
| 1 | 92220 | 303.7 | 2h | 863.0 | 49.0 | 6.2420 | 835.0 | 18.0 | 2.2930 |
| 2 | 193200 | 439.5 | 2h | 865.0 | 51.0 | 6.4968 | 840.0 | 23.0 | 2.9299 |
| 3 | 268500 | 518.2 | 2h | 865.0 | 51.0 | 6.4968 | 842.0 | 25.0 | 3.1847 |
| 5 | 432000 | 657.3 | 2h | 865.0 | 51.0 | 6.4968 | 845.0 | 28.0 | 3.5669 |
| 6 | 527580 | 726.3 | 2h | 866.0 | 52.0 | 6.6242 | 846.0 | 29.0 | 3.6943 |
| 7 | 622200 | 788.8 | 2h | 866.0 | 52.0 | 6.6242 | 847.0 | 30.0 | 3.8217 |
| 8 | 691200 | 831.4 | 2h | 866.0 | 52.0 | 6.6242 | 847.0 | 30.0 | 3.8217 |

| | |
|---------------|-------------------|
| FAMILIA | CPC 0.50 |
| TIEMPO CURADO | 28 DIAS |
| RELACIÓN | 0.5 |
| FECHA | 22/02/2017 |
| FOLIO | RL005 |

| Esp. | Probeta | T | T ^{0.5} | W ₀ | W _t | A | m | k | ε _e | S |
|-----------|---------|-------|------------------|----------------|----------------|----------|----------|----------|----------------|------|
| 1 | E1.3 | 42025 | 205 | 814.0 | 866.0 | 7.85E-03 | 1.78E+07 | 3.23E-02 | 13.63% | 14.2 |
| 2 | E2.3 | 75625 | 275 | 817.0 | 847.0 | 7.85E-03 | 3.42E+07 | 1.39E-02 | 8.13% | 10.3 |
| \bar{X} | | 58825 | 240 | 815.5 | 856.5 | 7.85E-03 | 2.60E+07 | 2.31E-02 | 10.88% | 12.3 |

CEDULA PRUEBA ABSORCIÓN CAPILAR
ACTM C 1585, METODO FAGERLUND

| | | | | Esp. 1 | | | Esp. 2 | | |
|------------------------------------|--------|------------------|------------|--------|------|--------|--------|------|--------|
| PROBETA | | | | F1.3 | | | F2.3 | | |
| Diámetro (mm) | | | | 100.00 | | | 100.00 | | |
| Radio (mm) | | | | 50.00 | | | 50.00 | | |
| Altura (mm) | | | | 48.5 | | | 47.75 | | |
| Área (mm²) | | | | 7854 | | | 7854 | | |
| Peso antes de sellado (g) | | | | 823 | | | 833 | | |
| Peso después de sellado (g) | | | | 828 | | | 838 | | |
| Día | S | S ^{0.5} | Tolerancia | Masa | D | I | Masa | D | I |
| 1 | 0 | 0.0 | Inicio | 828.0 | 0.0 | 0.0000 | 838.0 | 0.0 | 0.0000 |
| 1 | 60 | 7.7 | 2s | 830.0 | 2.0 | 0.2548 | 840.0 | 2.0 | 0.2548 |
| 1 | 300 | 17.3 | 10s | 833.0 | 5.0 | 0.6369 | 841.0 | 3.0 | 0.3822 |
| 1 | 600 | 24.5 | 2m | 835.0 | 7.0 | 0.8917 | 842.0 | 4.0 | 0.5096 |
| 1 | 1200 | 34.6 | 2m | 837.0 | 9.0 | 1.1465 | 843.0 | 5.0 | 0.6369 |
| 1 | 1800 | 42.4 | 2m | 840.0 | 12.0 | 1.5287 | 843.0 | 5.0 | 0.6369 |
| 1 | 3600 | 60.0 | 2m | 843.0 | 15.0 | 1.9108 | 844.0 | 6.0 | 0.7643 |
| 1 | 7200 | 84.9 | 5m | 849.0 | 21.0 | 2.6752 | 845.0 | 7.0 | 0.8917 |
| 1 | 10800 | 103.9 | 5m | 853.0 | 25.0 | 3.1847 | 846.0 | 8.0 | 1.0191 |
| 1 | 14400 | 120.0 | 5m | 856.0 | 28.0 | 3.5669 | 846.0 | 8.0 | 1.0191 |
| 1 | 18000 | 134.2 | 5m | 859.0 | 31.0 | 3.9490 | 847.0 | 9.0 | 1.1465 |
| 1 | 21600 | 147.0 | 5m | 861.0 | 33.0 | 4.2038 | 847.0 | 9.0 | 1.1465 |
| 1 | 92220 | 303.7 | 2h | 876.0 | 48.0 | 6.1146 | 855.0 | 17.0 | 2.1656 |
| 2 | 193200 | 439.5 | 2h | 877.0 | 49.0 | 6.2420 | 860.0 | 22.0 | 2.8025 |
| 3 | 268500 | 518.2 | 2h | 877.0 | 49.0 | 6.2420 | 862.0 | 24.0 | 3.0573 |
| 5 | 432000 | 657.3 | 2h | 878.0 | 50.0 | 6.3694 | 865.0 | 27.0 | 3.4395 |
| 6 | 527580 | 726.3 | 2h | 878.0 | 50.0 | 6.3694 | 866.0 | 28.0 | 3.5669 |
| 7 | 622200 | 788.8 | 2h | 879.0 | 51.0 | 6.4968 | 867.0 | 29.0 | 3.6943 |
| 8 | 691200 | 831.4 | 2h | 879.0 | 51.0 | 6.4968 | 867.0 | 29.0 | 3.6943 |

| | |
|---------------|-----------------|
| FAMILIA | CPC 0.45 |
| TIEMPO CURADO | 28 DIAS |
| RELACIÓN | 0.45 |
| FECHA | 24/02/2017 |
| FOLIO | RL006 |

| Esp. | Probeta | T | T ^{0.5} | W ₀ | W _t | A | m | k | ε _e | S |
|-----------|---------|-------|------------------|----------------|----------------|----------|----------|----------|----------------|------|
| 1 | F1.3 | 40000 | 200 | 828.0 | 879.0 | 7.85E-03 | 1.70E+07 | 3.25E-02 | 13.40% | 14.6 |
| 2 | F2.3 | 78400 | 280 | 838.0 | 867.0 | 7.85E-03 | 3.44E+07 | 1.32E-02 | 7.74% | 10.2 |
| \bar{X} | | 59200 | 240 | 833.0 | 873.0 | 7.85E-03 | 2.57E+07 | 2.29E-02 | 10.57% | 12.4 |

CEDULA PRUEBA ABSORCIÓN CAPILAR
ACTM C 1585, METODO FAGERLUND

| | | | | Esp. 1 | | | Esp. 2 | | |
|------------------------------------|--------|------------------|------------|--------|------|--------|--------|------|--------|
| PROBETA | | | | G1.2 | | | G2.3 | | |
| Diámetro (mm) | | | | 100.00 | | | 100.00 | | |
| Radio (mm) | | | | 50.00 | | | 50.00 | | |
| Altura (mm) | | | | 50 | | | 49.2 | | |
| Área (mm²) | | | | 7854 | | | 7854 | | |
| Peso antes de sellado (g) | | | | 840 | | | 836 | | |
| Peso después de sellado (g) | | | | 845 | | | 841 | | |
| Día | S | S ^{0.5} | Tolerancia | Masa | D | I | Masa | D | I |
| 1 | 0 | 0.0 | Inicio | 845.0 | 0.0 | 0.0000 | 841.0 | 0.0 | 0.0000 |
| 1 | 60 | 7.7 | 2s | 848.0 | 3.0 | 0.3822 | 844.0 | 3.0 | 0.3822 |
| 1 | 300 | 17.3 | 10s | 849.0 | 4.0 | 0.5096 | 846.0 | 5.0 | 0.6369 |
| 1 | 600 | 24.5 | 2m | 851.0 | 6.0 | 0.7643 | 846.0 | 5.0 | 0.6369 |
| 1 | 1200 | 34.6 | 2m | 852.0 | 7.0 | 0.8917 | 847.0 | 6.0 | 0.7643 |
| 1 | 1800 | 42.4 | 2m | 852.0 | 7.0 | 0.8917 | 848.0 | 7.0 | 0.8917 |
| 1 | 3600 | 60.0 | 2m | 855.0 | 10.0 | 1.2739 | 850.0 | 9.0 | 1.1465 |
| 1 | 7200 | 84.9 | 5m | 857.0 | 12.0 | 1.5287 | 853.0 | 12.0 | 1.5287 |
| 1 | 10800 | 103.9 | 5m | 859.0 | 14.0 | 1.7834 | 855.0 | 14.0 | 1.7834 |
| 1 | 14400 | 120.0 | 5m | 861.0 | 16.0 | 2.0382 | 856.0 | 15.0 | 1.9108 |
| 1 | 18000 | 134.2 | 5m | 862.0 | 17.0 | 2.1656 | 857.0 | 16.0 | 2.0382 |
| 1 | 21600 | 147.0 | 5m | 863.0 | 18.0 | 2.2930 | 859.0 | 18.0 | 2.2930 |
| 1 | 92220 | 303.7 | 2h | 877.0 | 32.0 | 4.0764 | 872.0 | 31.0 | 3.9490 |
| 2 | 193200 | 439.5 | 2h | 883.0 | 38.0 | 4.8408 | 879.0 | 38.0 | 4.8408 |
| 3 | 268500 | 518.2 | 2h | 886.0 | 41.0 | 5.2229 | 881.0 | 40.0 | 5.0955 |
| 5 | 432000 | 657.3 | 2h | 887.0 | 42.0 | 5.3503 | 882.0 | 41.0 | 5.2229 |
| 6 | 527580 | 726.3 | 2h | 887.0 | 42.0 | 5.3503 | 883.0 | 42.0 | 5.3503 |
| 7 | 622200 | 788.8 | 2h | 888.0 | 43.0 | 5.4777 | 883.0 | 42.0 | 5.3503 |
| 8 | 691200 | 831.4 | 2h | 888.0 | 43.0 | 5.4777 | 883.0 | 42.0 | 5.3503 |

| | |
|------------------|-------------------------|
| FAMILIA | CPP 0.65 NTC |
| TIEMPO CURADO | 28 días |
| RELACIÓN | 0.65 |
| FECHA | 06/03/2017 |
| FOLIO | RL007 |

| Esp. | Probeta | T | T ^{0.5} | W ₀ | W _t | A | m | k | ε _e | S |
|-----------|---------|-------|------------------|----------------|----------------|----------|----------|----------|----------------|------|
| 1 | G1.2 | 62500 | 250 | 845.0 | 888.0 | 7.85E-03 | 2.50E+07 | 2.19E-02 | 10.96% | 12.0 |
| 2 | G2.3 | 57600 | 240 | 841.0 | 883.0 | 7.85E-03 | 2.38E+07 | 2.23E-02 | 10.87% | 12.3 |
| \bar{X} | | 60050 | 245 | 843.0 | 885.5 | 7.85E-03 | 2.44E+07 | 2.21E-02 | 10.92% | 12.2 |

CEDULA PRUEBA ABSORCIÓN CAPILAR
ACTM C 1585, METODO FAGERLUND

| | | | | Esp. 1 | | | Esp. 2 | | |
|------------------------------------|--------|------------------|------------|--------|------|--------|--------|------|--------|
| PROBETA | | | | H1.2 | | | H2.2 | | |
| Diámetro (mm) | | | | 100.00 | | | 100.00 | | |
| Radio (mm) | | | | 50.00 | | | 50.00 | | |
| Altura (mm) | | | | 50 | | | 51.5 | | |
| Área (mm²) | | | | 7854 | | | 7854 | | |
| Peso antes de sellado (g) | | | | 838 | | | 861 | | |
| Peso después de sellado (g) | | | | 843 | | | 866 | | |
| Día | S | S ^{0.5} | Tolerancia | Masa | D | I | Masa | D | I |
| 1 | 0 | 0.0 | Inicio | 843.0 | 0.0 | 0.0000 | 866.0 | 0.0 | 0.0000 |
| 1 | 60 | 7.7 | 2s | 846.0 | 3.0 | 0.3822 | 869.0 | 3.0 | 0.3822 |
| 1 | 300 | 17.3 | 10s | 847.0 | 4.0 | 0.5096 | 870.0 | 4.0 | 0.5096 |
| 1 | 600 | 24.5 | 2m | 848.0 | 5.0 | 0.6369 | 871.0 | 5.0 | 0.6369 |
| 1 | 1200 | 34.6 | 2m | 848.0 | 5.0 | 0.6369 | 872.0 | 6.0 | 0.7643 |
| 1 | 1800 | 42.4 | 2m | 849.0 | 6.0 | 0.7643 | 873.0 | 7.0 | 0.8917 |
| 1 | 3600 | 60.0 | 2m | 851.0 | 8.0 | 1.0191 | 875.0 | 9.0 | 1.1465 |
| 1 | 7200 | 84.9 | 5m | 853.0 | 10.0 | 1.2739 | 878.0 | 12.0 | 1.5287 |
| 1 | 10800 | 103.9 | 5m | 855.0 | 12.0 | 1.5287 | 879.0 | 13.0 | 1.6561 |
| 1 | 14400 | 120.0 | 5m | 856.0 | 13.0 | 1.6561 | 881.0 | 15.0 | 1.9108 |
| 1 | 18000 | 134.2 | 5m | 857.0 | 14.0 | 1.7834 | 882.0 | 16.0 | 2.0382 |
| 1 | 21600 | 147.0 | 5m | 858.0 | 15.0 | 1.9108 | 884.0 | 18.0 | 2.2930 |
| 1 | 92220 | 303.7 | 2h | 872.0 | 29.0 | 3.6943 | 898.0 | 32.0 | 4.0764 |
| 2 | 193200 | 439.5 | 2h | 878.0 | 35.0 | 4.4586 | 903.0 | 37.0 | 4.7134 |
| 3 | 268500 | 518.2 | 2h | 880.0 | 37.0 | 4.7134 | 904.0 | 38.0 | 4.8408 |
| 5 | 432000 | 657.3 | 2h | 880.0 | 37.0 | 4.7134 | 905.0 | 39.0 | 4.9682 |
| 6 | 527580 | 726.3 | 2h | 881.0 | 38.0 | 4.8408 | 905.0 | 39.0 | 4.9682 |
| 7 | 622200 | 788.8 | 2h | 881.0 | 38.0 | 4.8408 | 906.0 | 40.0 | 5.0955 |
| 8 | 691200 | 831.4 | 2h | 881.0 | 38.0 | 4.8408 | 906.0 | 40.0 | 5.0955 |

| | |
|---------------|--------------|
| FAMILIA | CPP 0.50 NTC |
| TIEMPO CURADO | 28 DIAS |
| RELACIÓN | 0.5 |
| FECHA | 08/03/2017 |
| FOLIO | RL008 |

| Esp. | Probeta | T | T ^{0.5} | Wo | Wt | A | m | k | εe | S |
|-----------|---------|--------|------------------|-------|-------|----------|----------|----------|-------|------|
| 1 | H1.2 | 105625 | 325 | 843.0 | 881.0 | 7.85E-03 | 4.23E+07 | 1.49E-02 | 9.68% | 9.2 |
| 2 | H2.2 | 81225 | 285 | 866.0 | 906.0 | 7.85E-03 | 3.06E+07 | 1.79E-02 | 9.89% | 10.8 |
| \bar{X} | | 93425 | 305 | 854.5 | 893.5 | 7.85E-03 | 3.65E+07 | 1.64E-02 | 9.79% | 10.0 |

CEDULA PRUEBA ABSORCIÓN CAPILAR
ACTM C 1585, METODO FAGERLUND

| | | | | Esp. 1 | | | Esp. 2 | | |
|------------------------------------|--------|------------------|------------|--------|------|--------|--------|------|--------|
| PROBETA | | | | I1.2 | | | I2.3 | | |
| Diámetro (mm) | | | | 100.00 | | | 100.00 | | |
| Radio (mm) | | | | 50.00 | | | 50.00 | | |
| Altura (mm) | | | | 52.2 | | | 48.5 | | |
| Área (mm²) | | | | 7854 | | | 7854 | | |
| Peso antes de sellado (g) | | | | 884 | | | 823 | | |
| Peso después de sellado (g) | | | | 889 | | | 826 | | |
| Día | S | S ^{0.5} | Tolerancia | Masa | D | I | Masa | D | I |
| 1 | 0 | 0.0 | Inicio | 889.0 | 0.0 | 0.0000 | 826.0 | 0.0 | 0.0000 |
| 1 | 60 | 7.7 | 2s | 891.0 | 2.0 | 0.2548 | 828.0 | 2.0 | 0.2548 |
| 1 | 300 | 17.3 | 10s | 892.0 | 3.0 | 0.3822 | 830.0 | 4.0 | 0.5096 |
| 1 | 600 | 24.5 | 2m | 893.0 | 4.0 | 0.5096 | 830.0 | 4.0 | 0.5096 |
| 1 | 1200 | 34.6 | 2m | 894.0 | 5.0 | 0.6369 | 832.0 | 6.0 | 0.7643 |
| 1 | 1800 | 42.4 | 2m | 894.0 | 5.0 | 0.6369 | 832.0 | 6.0 | 0.7643 |
| 1 | 3600 | 60.0 | 2m | 896.0 | 7.0 | 0.8917 | 833.0 | 7.0 | 0.8917 |
| 1 | 7200 | 84.9 | 5m | 898.0 | 9.0 | 1.1465 | 835.0 | 9.0 | 1.1465 |
| 1 | 10800 | 103.9 | 5m | 899.0 | 10.0 | 1.2739 | 836.0 | 10.0 | 1.2739 |
| 1 | 14400 | 120.0 | 5m | 901.0 | 12.0 | 1.5287 | 837.0 | 11.0 | 1.4013 |
| 1 | 18000 | 134.2 | 5m | 901.0 | 12.0 | 1.5287 | 838.0 | 12.0 | 1.5287 |
| 1 | 21600 | 147.0 | 5m | 902.0 | 13.0 | 1.6561 | 838.0 | 12.0 | 1.5287 |
| 1 | 92220 | 303.7 | 2h | 912.0 | 23.0 | 2.9299 | 846.0 | 20.0 | 2.5478 |
| 2 | 193200 | 439.5 | 2h | 919.0 | 30.0 | 3.8217 | 851.0 | 25.0 | 3.1847 |
| 3 | 268500 | 518.2 | 2h | 922.0 | 33.0 | 4.2038 | 854.0 | 28.0 | 3.5669 |
| 5 | 432000 | 657.3 | 2h | 923.0 | 34.0 | 4.3312 | 856.0 | 30.0 | 3.8217 |
| 6 | 527580 | 726.3 | 2h | 924.0 | 35.0 | 4.4586 | 857.0 | 31.0 | 3.9490 |
| 7 | 622200 | 788.8 | 2h | 924.0 | 35.0 | 4.4586 | 858.0 | 32.0 | 4.0764 |
| 8 | 691200 | 831.4 | 2h | 924.0 | 35.0 | 4.4586 | 858.0 | 32.0 | 4.0764 |

| | |
|---------------|-----------------|
| FAMILIA | CPP 0.45 |
| TIEMPO CURADO | NTC |
| RELACIÓN | 28 DIAS |
| FECHA | 0.45 |
| FOLIO | 09/03/2017 |
| | RL009 |

| Esp. | Probeta | T | T ^{0.5} | Wo | Wt | A | m | k | εe | S |
|-----------|---------|-------|------------------|-------|-------|----------|----------|----------|-------|------|
| 1 | I1.2 | 96100 | 310 | 889.0 | 924.0 | 7.85E-03 | 3.53E+07 | 1.44E-02 | 8.54% | 10.1 |
| 2 | I2.3 | 84100 | 290 | 826.0 | 858.0 | 7.85E-03 | 3.58E+07 | 1.41E-02 | 8.41% | 10.0 |
| \bar{X} | | 90100 | 300 | 857.5 | 891.0 | 7.85E-03 | 3.56E+07 | 1.43E-02 | 8.48% | 10.1 |

CEDULA PRUEBA ABSORCIÓN CAPILAR
ACTM C 1585, METODO FAGERLUND

| | | | | Esp. 1 | | | Esp. 2 | | |
|------------------------------------|--------|------------------|------------|--------|------|--------|--------|------|--------|
| PROBETA | | | | J1.3 | | | J2.2 | | |
| Diámetro (mm) | | | | 100.00 | | | 100.00 | | |
| Radio (mm) | | | | 50.00 | | | 50.00 | | |
| Altura (mm) | | | | 49.4 | | | 51.75 | | |
| Área (mm²) | | | | 7854 | | | 7854 | | |
| Peso antes de sellado (g) | | | | 847 | | | 875 | | |
| Peso después de sellado (g) | | | | 852 | | | 879 | | |
| Día | S | S ^{0.5} | Tolerancia | Masa | D | I | Masa | D | I |
| 1 | 0 | 0.0 | Inicio | 852.0 | 0.0 | 0.0000 | 879.0 | 0.0 | 0.0000 |
| 1 | 60 | 7.7 | 2s | 854.0 | 2.0 | 0.2548 | 882.0 | 3.0 | 0.3822 |
| 1 | 300 | 17.3 | 10s | 855.0 | 3.0 | 0.3822 | 884.0 | 5.0 | 0.6369 |
| 1 | 600 | 24.5 | 2m | 857.0 | 5.0 | 0.6369 | 885.0 | 6.0 | 0.7643 |
| 1 | 1200 | 34.6 | 2m | 858.0 | 6.0 | 0.7643 | 887.0 | 8.0 | 1.0191 |
| 1 | 1800 | 42.4 | 2m | 859.0 | 7.0 | 0.8917 | 887.0 | 8.0 | 1.0191 |
| 1 | 3600 | 60.0 | 2m | 861.0 | 9.0 | 1.1465 | 890.0 | 11.0 | 1.4013 |
| 1 | 7200 | 84.9 | 5m | 864.0 | 12.0 | 1.5287 | 893.0 | 14.0 | 1.7834 |
| 1 | 10800 | 103.9 | 5m | 866.0 | 14.0 | 1.7834 | 895.0 | 16.0 | 2.0382 |
| 1 | 14400 | 120.0 | 5m | 867.0 | 15.0 | 1.9108 | 897.0 | 18.0 | 2.2930 |
| 1 | 18000 | 134.2 | 5m | 868.0 | 16.0 | 2.0382 | 898.0 | 19.0 | 2.4204 |
| 1 | 21600 | 147.0 | 5m | 870.0 | 18.0 | 2.2930 | 900.0 | 21.0 | 2.6752 |
| 1 | 92220 | 303.7 | 2h | 882.0 | 30.0 | 3.8217 | 916.0 | 37.0 | 4.7134 |
| 2 | 193200 | 439.5 | 2h | 888.0 | 36.0 | 4.5860 | 924.0 | 45.0 | 5.7325 |
| 3 | 268500 | 518.2 | 2h | 891.0 | 39.0 | 4.9682 | 925.0 | 46.0 | 5.8599 |
| 5 | 432000 | 657.3 | 2h | 892.0 | 40.0 | 5.0955 | 926.0 | 47.0 | 5.9873 |
| 6 | 527580 | 726.3 | 2h | 893.0 | 41.0 | 5.2229 | 927.0 | 48.0 | 6.1146 |
| 7 | 622200 | 788.8 | 2h | 894.0 | 42.0 | 5.3503 | 927.0 | 48.0 | 6.1146 |
| 8 | 691200 | 831.4 | 2h | 894.0 | 42.0 | 5.3503 | 927.0 | 48.0 | 6.1146 |

| | |
|---------------|-----------------|
| FAMILIA | CPC 0.65 |
| TIEMPO CURADO | NTC |
| RELACIÓN | 28 DIAS |
| FECHA | 0.65 |
| FOLIO | 14/03/2017 |
| | RL010 |

| Esp. | Probeta | T | T ^{0.5} | W ₀ | W _t | A | m | k | ε _e | S |
|-----------|---------|-------|------------------|----------------|----------------|----------|----------|----------|----------------|------|
| 1 | J1.3 | 44944 | 212 | 852.0 | 894.0 | 7.85E-03 | 1.84E+07 | 2.52E-02 | 10.83% | 14.0 |
| 2 | J2.2 | 58564 | 242 | 879.0 | 927.0 | 7.85E-03 | 2.19E+07 | 2.53E-02 | 11.82% | 12.8 |
| \bar{X} | | 51754 | 227 | 865.5 | 910.5 | 7.85E-03 | 2.02E+07 | 2.53E-02 | 11.33% | 13.4 |

CEDULA PRUEBA ABSORCIÓN CAPILAR
ACTM C 1585, METODO FAGERLUND

| | | | | Esp. 1 | | | Esp. 2 | | |
|------------------------------------|--------|------------------|------------|--------|------|--------|--------|------|--------|
| PROBETA | | | | K1.3 | | | K2.3 | | |
| Diámetro (mm) | | | | 100.00 | | | 100.00 | | |
| Radio (mm) | | | | 50.00 | | | 50.00 | | |
| Altura (mm) | | | | 48 | | | 49.75 | | |
| Área (mm²) | | | | 7854 | | | 7854 | | |
| Peso antes de sellado (g) | | | | 833 | | | 859 | | |
| Peso después de sellado (g) | | | | 837 | | | 863 | | |
| Día | S | S ^{0.5} | Tolerancia | Masa | D | I | Masa | D | I |
| 1 | 0 | 0.0 | Inicio | 837.0 | 0.0 | 0.0000 | 863.0 | 0.0 | 0.0000 |
| 1 | 60 | 7.7 | 2s | 840.0 | 3.0 | 0.3822 | 866.0 | 3.0 | 0.3822 |
| 1 | 300 | 17.3 | 10s | 841.0 | 4.0 | 0.5096 | 866.0 | 3.0 | 0.3822 |
| 1 | 600 | 24.5 | 2m | 841.0 | 4.0 | 0.5096 | 867.0 | 4.0 | 0.5096 |
| 1 | 1200 | 34.6 | 2m | 842.0 | 5.0 | 0.6369 | 868.0 | 5.0 | 0.6369 |
| 1 | 1800 | 42.4 | 2m | 842.0 | 5.0 | 0.6369 | 868.0 | 5.0 | 0.6369 |
| 1 | 3600 | 60.0 | 2m | 844.0 | 7.0 | 0.8917 | 870.0 | 7.0 | 0.8917 |
| 1 | 7200 | 84.9 | 5m | 845.0 | 8.0 | 1.0191 | 871.0 | 8.0 | 1.0191 |
| 1 | 10800 | 103.9 | 5m | 846.0 | 9.0 | 1.1465 | 872.0 | 9.0 | 1.1465 |
| 1 | 14400 | 120.0 | 5m | 847.0 | 10.0 | 1.2739 | 873.0 | 10.0 | 1.2739 |
| 1 | 18000 | 134.2 | 5m | 847.0 | 10.0 | 1.2739 | 873.0 | 10.0 | 1.2739 |
| 1 | 21600 | 147.0 | 5m | 848.0 | 11.0 | 1.4013 | 874.0 | 11.0 | 1.4013 |
| 1 | 92220 | 303.7 | 2h | 855.0 | 18.0 | 2.2930 | 881.0 | 18.0 | 2.2930 |
| 2 | 193200 | 439.5 | 2h | 860.0 | 23.0 | 2.9299 | 886.0 | 23.0 | 2.9299 |
| 3 | 268500 | 518.2 | 2h | 862.0 | 25.0 | 3.1847 | 888.0 | 25.0 | 3.1847 |
| 5 | 432000 | 657.3 | 2h | 865.0 | 28.0 | 3.5669 | 892.0 | 29.0 | 3.6943 |
| 6 | 527580 | 726.3 | 2h | 867.0 | 30.0 | 3.8217 | 893.0 | 30.0 | 3.8217 |
| 7 | 622200 | 788.8 | 2h | 868.0 | 31.0 | 3.9490 | 894.0 | 31.0 | 3.9490 |
| 8 | 691200 | 831.4 | 2h | 868.0 | 31.0 | 3.9490 | 894.0 | 31.0 | 3.9490 |

| | |
|---------------|-----------------|
| FAMILIA | CPC 0.50 |
| TIEMPO CURADO | NTC |
| RELACIÓN | 28 DIAS |
| FECHA | 0.5 |
| FOLIO | 22/03/2017 |
| | RL011 |

| Esp. | Probeta | T | T ^{0.5} | W ₀ | W _t | A | m | k | ε _e | S |
|-----------|---------|-------|------------------|----------------|----------------|----------|----------|----------|----------------|------|
| 1 | K1.3 | 72900 | 270 | 837.0 | 868.0 | 7.85E-03 | 3.16E+07 | 1.46E-02 | 8.23% | 10.7 |
| 2 | K2.3 | 72900 | 270 | 863.0 | 894.0 | 7.85E-03 | 2.95E+07 | 1.46E-02 | 7.94% | 11.0 |
| \bar{X} | | 72900 | 270 | 850.0 | 881.0 | 7.85E-03 | 3.06E+07 | 1.46E-02 | 8.09% | 10.9 |

CEDULA PRUEBA ABSORCIÓN CAPILAR
ACTM C 1585, METODO FAGERLUND

| | | | | Esp. 1 | | | Esp. 2 | | |
|------------------------------------|--------|------------------|------------|--------|------|--------|--------|------|--------|
| PROBETA | | | | L1.2 | | | L2.3 | | |
| Diámetro (mm) | | | | 100.00 | | | 100.00 | | |
| Radio (mm) | | | | 50.00 | | | 50.00 | | |
| Altura (mm) | | | | 51.75 | | | 50 | | |
| Área (mm²) | | | | 7854 | | | 7854 | | |
| Peso antes de sellado (g) | | | | 883 | | | 860 | | |
| Peso después de sellado (g) | | | | 887 | | | 864 | | |
| Día | S | S ^{0.5} | Tolerancia | Masa | D | I | Masa | D | I |
| 1 | 0 | 0.0 | Inicio | 887.0 | 0.0 | 0.0000 | 864.0 | 0.0 | 0.0000 |
| 1 | 60 | 7.7 | 2s | 890.0 | 3.0 | 0.3822 | 866.0 | 2.0 | 0.2548 |
| 1 | 300 | 17.3 | 10s | 890.0 | 3.0 | 0.3822 | 868.0 | 4.0 | 0.5096 |
| 1 | 600 | 24.5 | 2m | 891.0 | 4.0 | 0.5096 | 868.0 | 4.0 | 0.5096 |
| 1 | 1200 | 34.6 | 2m | 892.0 | 5.0 | 0.6369 | 869.0 | 5.0 | 0.6369 |
| 1 | 1800 | 42.4 | 2m | 892.0 | 5.0 | 0.6369 | 870.0 | 6.0 | 0.7643 |
| 1 | 3600 | 60.0 | 2m | 893.0 | 6.0 | 0.7643 | 870.0 | 6.0 | 0.7643 |
| 1 | 7200 | 84.9 | 5m | 895.0 | 8.0 | 1.0191 | 872.0 | 8.0 | 1.0191 |
| 1 | 10800 | 103.9 | 5m | 895.0 | 8.0 | 1.0191 | 873.0 | 9.0 | 1.1465 |
| 1 | 14400 | 120.0 | 5m | 896.0 | 9.0 | 1.1465 | 873.0 | 9.0 | 1.1465 |
| 1 | 18000 | 134.2 | 5m | 897.0 | 10.0 | 1.2739 | 874.0 | 10.0 | 1.2739 |
| 1 | 21600 | 147.0 | 5m | 897.0 | 10.0 | 1.2739 | 874.0 | 10.0 | 1.2739 |
| 1 | 92220 | 303.7 | 2h | 904.0 | 17.0 | 2.1656 | 881.0 | 17.0 | 2.1656 |
| 2 | 193200 | 439.5 | 2h | 909.0 | 22.0 | 2.8025 | 885.0 | 21.0 | 2.6752 |
| 3 | 268500 | 518.2 | 2h | 912.0 | 25.0 | 3.1847 | 887.0 | 23.0 | 2.9299 |
| 5 | 432000 | 657.3 | 2h | 916.0 | 29.0 | 3.6943 | 891.0 | 27.0 | 3.4395 |
| 6 | 527580 | 726.3 | 2h | 919.0 | 32.0 | 4.0764 | 892.0 | 28.0 | 3.5669 |
| 7 | 622200 | 788.8 | 2h | 920.0 | 33.0 | 4.2038 | 893.0 | 29.0 | 3.6943 |
| 8 | 691200 | 831.4 | 2h | 920.0 | 33.0 | 4.2038 | 894.0 | 30.0 | 3.8217 |

| | |
|---------------|-----------------|
| FAMILIA | CPC 0.45 |
| TIEMPO CURADO | NTC |
| RELACIÓN | 28 DIAS |
| FECHA | 0.45 |
| FOLIO | 23/03/2017 |
| | RL012 |

| Esp. | Probeta | T | T ^{0.5} | Wo | Wt | A | m | k | εe | S |
|-----------|---------|--------|------------------|-------|-------|----------|----------|----------|-------|-----|
| 1 | L1.2 | 115600 | 340 | 887.0 | 920.0 | 7.85E-03 | 4.32E+07 | 1.24E-02 | 8.12% | 9.1 |
| 2 | L2.3 | 96100 | 310 | 864.0 | 894.0 | 7.85E-03 | 3.84E+07 | 1.23E-02 | 7.64% | 9.7 |
| \bar{X} | | 105850 | 325 | 875.5 | 907.0 | 7.85E-03 | 4.08E+07 | 1.24E-02 | 7.88% | 9.4 |

Apéndice 7.- Electromigración de cloruros. -

FAMILIA CPP 0.65
 RELACIÓN 0.65
 FECHA 30/05/2017
 FECHA COLADO 21/01/2017
 EDAD COLADO 28 DIAS

FOLIO RL 001

ECUACIONES

Ecuación simplificada no. 4 NT Build 492

$$D_{nssm} = \frac{0.0239(273 + T)L}{(U - 2)t} \cdot \left(X_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273 + T)L X_d}{U - 2}} \right)$$

D_{nssm} : Coeficiente de migración en estado no estacionario $\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$.

U: Valor absoluto del voltaje aplicado, V.

T: Valor promedio de la temperatura inicial y final de la solución anólito, °C.

L: Espesor del espécimen, mm.

X_d : Valor promedio de la profundidad de penetración, mm.

t: duración de la prueba, hora.

PREPARACIÓN DEL ENSAYO

| | |
|--------------------------------------|--|
| Disolución Catódica - NaCl | 1333.33 gr NaCl / 12 L. H ₂ O |
| Disolución Anódica - NaOH | 3.6 gr. NaOH/0. 300 L. H ₂ O |
| Nitrato de Plata - AgNO ₃ | 0.1M AgNO ₃ |

DATOS DEL ENSAYO

Espécimen 1

| | | | | | | | |
|------------------|------|--------------|-------|---------------|-----|-----------|--------|
| ID Rodaja | A1.2 | Espesor (mm) | 49.75 | Diámetro (mm) | 100 | Peso (gr) | 797.00 |
| Voltaje inicial | 30 V | mA inicial | 35 mA | | | | |
| Voltaje ajustado | 35 V | mA ajustado | 49 mA | 24h | | | |

Perfil de penetración

| Profundidad | | | | | |
|----------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| $X_{d6} = 27.00$ | $X_{d4} = 24.00$ | $X_{d2} = 16.50$ | $X_{d1} = 17.20$ | $X_{d3} = 20.90$ | $X_{d5} = 27.00$ |
| $X_{d7} = 25.00$ | | | | | |
| Espesor (mm) = 49.75 | | | | | |

| Temperatura | |
|----------------|-------|
| T _i | 26.8 |
| T _f | 26.1 |
| T | 26.45 |

| Datos | |
|--------------------------|-----------------------|
| 10.70 V | Voltaje aplicado (U) |
| 26.45 °C | Temperatura (T) |
| 49.75 mm | Espesor (L) |
| 23.20 mm | Profundidad (X_d) |
| 24 hrs | Duración ensayo (t) |
| Coeficiente de migración | |
| 31.47 | D_{nssm} |

Espécimen 2

| | | | | | | | |
|------------------|------|--------------|--------|---------------|-----|-----------|-----|
| ID Rodaja | A2.3 | Espesor (mm) | 47.00 | Diámetro (mm) | 100 | Peso (gr) | 791 |
| Voltaje inicial | 30 V | mA inicial | 546 mA | | | | |
| Voltaje ajustado | 10 V | mA ajustado | 26 mA | 24hrs | | | |

Perfil de penetración

| Profundidad | | | | | |
|----------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| $X_{d6} = 41.00$ | $X_{d4} = 36.50$ | $X_{d2} = 22.50$ | $X_{d1} = 26.00$ | $X_{d3} = 28.50$ | $X_{d5} = 28.00$ |
| $X_{d7} = 33.50$ | | | | | |
| Espesor (mm) = 47.00 | | | | | |

| Temperatura | |
|----------------|-------|
| T _i | 28.5 |
| T _f | 26.8 |
| T | 27.65 |

| Datos | |
|--------------------------|-----------------------|
| 10.52 V | Voltaje aplicado (U) |
| 27.65 °C | Temperatura (T) |
| 47.00 mm | Espesor (L) |
| 32.25 mm | Profundidad (X_d) |
| 24 hrs | Duración ensayo (t) |
| Coeficiente de migración | |
| 44.19 | D_{nssm} |

Promedio

| Peso (gr) | Diámetro (mm) | Voltaje aplicado (U) | Temperatura (T) | Espesor (L) | Profundidad (X_d) | Duración ensayo (t) | Coeficiente de migración (D_{nssm}) |
|-----------|---------------|----------------------|-----------------|-------------|-----------------------|---------------------|---|
| 794 grs | 100 mm | 10.61 V | 27.05 °C | 48.38 mm | 27.73 mm | 24 hrs | 37.83 |

CEDULA PRUEBA MIGRACIÓN DE CLORUROS

NT BUILD 492

FAMILIA CPC 0.65
RELACIÓN 0.65
FECHA 31/05/2017
FECHA COLADO 21/02/2017
EDAD COLADO 28 DIAS

FOLIO RL 004

ECUACIONES

Ecuación simplificada no. 4 NT Build 492

$$D_{nssm} = \frac{0.0239(273 + T)L}{(U - 2)t} \cdot \left(X_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273 + T)L X_d}{U - 2}} \right)$$

D_{nssm} : Coeficiente de migración en estado no estacionario $\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$.

U: Valor absoluto del voltaje aplicado, V.

T: Valor promedio de la temperatura inicial y final de la solución anolito, °C.

L: Espesor del espécimen, mm.

X_d : Valor promedio de la profundidad de penetración, mm.

t: duración de la prueba, hora.

PREPARACIÓN DEL ENSAYO

Disolución Catódica - NaCl 1333.33 gr NaCl / 12 L. H₂O
Disolución Anódica - NaOH 3.6 gr. NaOH/0. 300 L. H₂O
Nitrato de Plata - AgNO₃ 0.1M AgNO₃

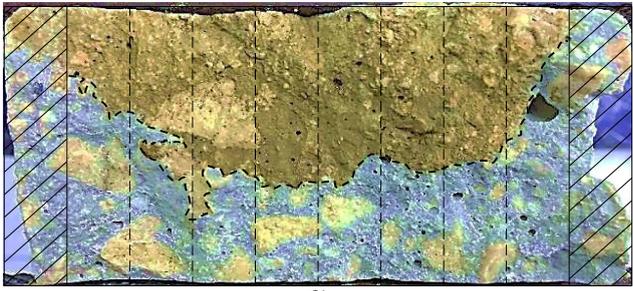
DATOS DEL ENSAYO

Espécimen 1

| | | | | | | | |
|------------------|------|--------------|--------|---------------|-----|-----------|--------|
| ID Rodaja | D1.2 | Espesor (mm) | 49.75 | Diámetro (mm) | 100 | Peso (gr) | 828.00 |
| Voltaje inicial | 30 V | mA inicial | 582 mA | | | | |
| Voltaje ajustado | 10 V | mA ajustado | 71 mA | 24h--6hr | | | |

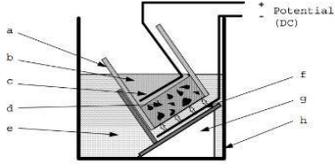
Perfil de penetración

| | | | | | | |
|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| $X_{d6} = 33.50$ | $X_{d4} = 21.00$ | $X_{d2} = 20.00$ | $X_{d1} = 18.90$ | $X_{d3} = 24.00$ | $X_{d5} = 21.10$ | $X_{d7} = 30.00$ |
|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|



Especor (mm) = 49.75

| Profundidad | |
|-------------|-------|
| $X_1 =$ | 18.9 |
| $X_2 =$ | 20 |
| $X_3 =$ | 24 |
| $X_4 =$ | 21 |
| $X_5 =$ | 21.1 |
| $X_6 =$ | 33.5 |
| $X_7 =$ | 30 |
| $X_d =$ | 24.58 |
| Temperatura | |
| T_i | 26.6 |
| T_f | 26.2 |
| T | 26.4 |



| Datos | |
|--------------------------|-----------------------|
| 10 V | Voltaje aplicado (U) |
| 26.4 °C | Temperatura (T) |
| 49.75 mm | Espesor (L) |
| 24.58 mm | Profundidad (X_d) |
| 24 hrs | Duración ensayo (t) |
| Coeficiente de migración | |
| 36.14 | D_{nssm} |

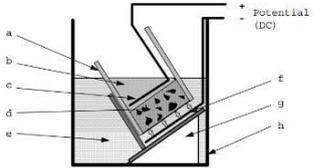
Espécimen 2

| | | | | | | | |
|------------------|------|--------------|--------|---------------|-----|-----------|-----|
| ID Rodaja | D2.2 | Espesor (mm) | 50.00 | Diámetro (mm) | 100 | Peso (gr) | 847 |
| Voltaje inicial | 30 V | mA inicial | 751 mA | | | | |
| Voltaje ajustado | 10 V | mA ajustado | 30 mA | 24hrs | | | |

Perfil de penetración

| $X_1 =$ | |
|-------------|-------|
| $X_2 =$ | |
| $X_3 =$ | |
| $X_4 =$ | |
| $X_5 =$ | |
| $X_6 =$ | |
| $X_7 =$ | |
| X_d | ----- |
| Temperatura | |
| T_i | 25.9 |
| T_f | 27.8 |
| T | 26.85 |

Filtración de muestra



| Datos | |
|--------------------------|-----------------------|
| 10.62 V | Voltaje aplicado (U) |
| 26.85 °C | Temperatura (T) |
| 50.00 mm | Espesor (L) |
| ---- | Profundidad (X_d) |
| 24 hrs | Duración ensayo (t) |
| Coeficiente de migración | |
| ---- | D_{nssm} |

Promedio

| | | | | | | | |
|-----------|---------------|----------------------|-----------------|-------------|-----------------------|---------------------|---|
| Peso (gr) | Diámetro (mm) | Voltaje aplicado (U) | Temperatura (T) | Espesor (L) | Profundidad (X_d) | Duración ensayo (t) | Coeficiente de migración (D_{nssm}) |
| 837.5 grs | 100 mm | 10.31 V | 26.625 °C | 49.88 mm | 24.58 mm | 24 hrs | 36.14 |

FAMILIA CPP 0.65 NTC
 RELACIÓN 0.65
 FECHA 08/06/2017
 FECHA COLADO 06/03/2017
 EDAD COLADO 28 DIAS

FOLIO RL 007

ECUACIONES

Ecuación simplificada no. 4 NT Build 492

$$D_{nssm} = \frac{0.0239(273 + T)L}{(U - 2)t} \cdot \left(X_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273 + T)L X_d}{U - 2}} \right)$$

D_{nssm} : Coeficiente de migración en estado no estacionario $\times 10^{-12} m^2/s$.

U: Valor absoluto del voltaje aplicado, V.

T: Valor promedio de la temperatura inicial y final de la solución anólito, °C.

L: Espesor del espécimen, mm.

X_d : Valor promedio de la profundidad de penetración, mm.

t : duración de la prueba, hora.

PREPARACIÓN DEL ENSAYO

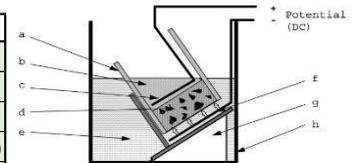
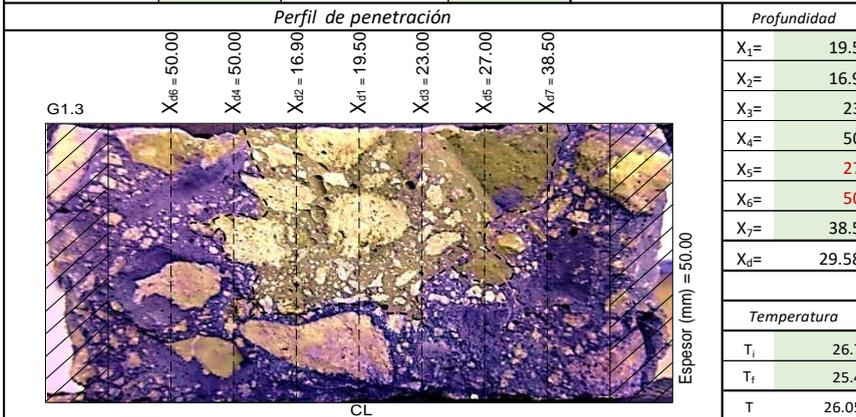
Disolución Catódica - NaCl 1333.33 gr NaCl / 12 L. H₂O
 Disolución Anódica - NaOH 3.6 gr. NaOH/0. 300 L. H₂O
 Nitrato de Plata - AgNO₃ 0.1M AgNO₃

DATOS DEL ENSAYO

Espécimen 1

ID Rodaja G1.3 Espesor (mm) 50.00 Diámetro (mm) 100.00 Peso (gr) 846.00

Voltaje inicial 30 V mA inicial 945 mA
 Voltaje ajustado 10 V mA ajustado 35 mA 24 hrs



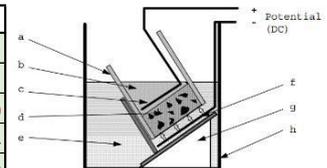
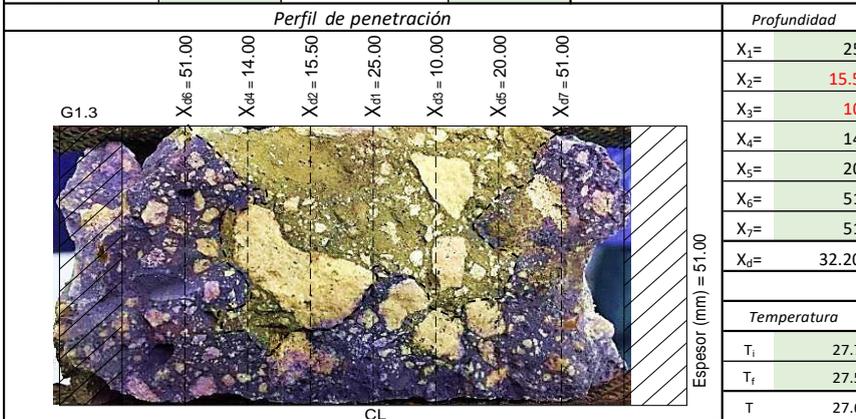
| Datos | |
|----------|-------------------------------|
| 10.43 V | Voltaje aplicado (U) |
| 26.05 °C | Temperatura (T) |
| 50.00 mm | Espesor (L) |
| 29.58 mm | Profundidad (X _d) |
| 24 hrs | Duración ensayo (t) |

Coeficiente de migración
42.60 D_{nssm}

Espécimen 2

ID Rodaja G2.2 Espesor (mm) 51.00 Diámetro (mm) 100 Peso (gr) 851

Voltaje inicial 30 V mA inicial 739 V
 Voltaje ajustado 10 V mA ajustado 47 V 24hrs



| Datos | |
|----------|-------------------------------|
| 10.15 V | Voltaje aplicado (U) |
| 27.6 °C | Temperatura (T) |
| 51.00 mm | Espesor (L) |
| 32.20 mm | Profundidad (X _d) |
| 24 hrs | Duración ensayo (t) |

Coeficiente de migración
49.35 D_{nssm}

Promedio

| Peso (gr) | Diámetro (mm) | Voltaje aplicado (U) | Temperatura (T) | Espesor (L) | Profundidad (X _d) | Duración ensayo (t) | Coeficiente de migración (D _{nssm}) |
|-----------|---------------|----------------------|-----------------|-------------|-------------------------------|---------------------|---|
| 848.5 grs | 100 mm | 10.29 V | 26.825 °C | 50.50 m | 30.89 mm | 24 hrs | 45.97 |

FAMILIA CPC 0.65 NTC
 RELACIÓN 0.65
 FECHA 10/06/2017
 FECHA COLADO 14/03/2017
 EDAD COLADO 28 DIAS

FOLIO RL 010

ECUACIONES

Ecuación simplificada no. 4 NT Build 492

$$D_{nssm} = \frac{0.0239(273 + T)L}{(U - 2)t} \cdot \left(X_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273 + T)L X_d}{U - 2}} \right)$$

D_{nssm} : Coeficiente de migración en estado no estacionario $\times 10^{-12} m^2/s$.

U: Valor absoluto del voltaje aplicado, V.

T: Valor promedio de la temperatura inicial y final de la solución anolito, °C.

L: Espesor del espécimen, mm.

X_d : Valor promedio de la profundidad de penetración, mm.

t: duración de la prueba, hora.

PREPARACIÓN DEL ENSAYO

Disolución Catódica - NaCl 1333.33 gr NaCl / 12 L. H₂O
 Disolución Anódica - NaOH 3.6 gr. NaOH/0. 300 L. H₂O
 Nitrate de Plata - AgNO₃ 0.1M AgNO₃

DATOS DEL ENSAYO

Espécimen 1

| | | | | | | | |
|------------------|------|-------------|--------|---------------|-----|-----------|-----|
| ID Rodaja | J1.2 | Esesor (mm) | 51.00 | Diámetro (mm) | 100 | Peso (gr) | 867 |
| Voltaje inicial | 30 V | mA inicial | 257 mA | | | | |
| Voltaje ajustado | 10 V | mA ajustado | 43 mA | 24 hrs | | | |

Perfil de penetración

| Profundidad |
|------------------------|
| X ₁ = 41 |
| X ₂ = 46 |
| X ₃ = 42 |
| X ₄ = 51 |
| X ₅ = 51 |
| X ₆ = 51 |
| X ₇ = 51 |
| X _d = 47.83 |

Temperatura

| | |
|----------------|-------|
| T _i | 26.1 |
| T _f | 25.2 |
| T | 25.65 |

| Datos | |
|--------------------------|-------------------------------|
| 10.5454545 V | Voltaje aplicado (U) |
| 25.65 °C | Temperatura (T) |
| 51.00 mm | Esesor (L) |
| 47.83 mm | Profundidad (X _d) |
| 24 hrs | Duración ensayo (t) |
| Coeficiente de migración | |
| 72.57 | D _{nssm} |

Espécimen 2

| | | | | | | | |
|------------------|------|-------------|--------|---------------|-----|-----------|-----|
| ID Rodaja | J2.3 | Esesor (mm) | 48.50 | Diámetro (mm) | 100 | Peso (gr) | 824 |
| Voltaje inicial | 30 V | mA inicial | 363 mA | | | | |
| Voltaje ajustado | 10 V | mA ajustado | 21 mA | 24hrs | | | |

Perfil de penetración

| Profundidad |
|------------------------|
| X ₁ = 45.5 |
| X ₂ = 48.5 |
| X ₃ = 42.5 |
| X ₄ = 48.5 |
| X ₅ = 45.5 |
| X ₆ = 48.5 |
| X ₇ = 48.5 |
| X _d = 46.79 |

Temperatura

| | |
|----------------|------|
| T _i | 28.3 |
| T _f | 26.9 |
| T | 27.6 |

| Datos | |
|--------------------------|-------------------------------|
| 10.88 V | Voltaje aplicado (U) |
| 27.6 °C | Temperatura (T) |
| 48.50 mm | Esesor (L) |
| 46.79 mm | Profundidad (X _d) |
| 24 hrs | Duración ensayo (t) |
| Coeficiente de migración | |
| 65.71 | D _{nssm} |

Promedio

| Peso (gr) | Diámetro (mm) | Voltaje aplicado (U) | Temperatura (T) | Esesor (L) | Profundidad (X _d) | Duración ensayo (t) | Coeficiente de migración (D _{nssm}) |
|-----------|---------------|----------------------|-----------------|------------|-------------------------------|---------------------|---|
| 845.5 grs | 100 mm | 10.71 V | 26.625 °C | 49.75 m | 47.31 mm | 24 hrs | 69.14 |

FAMILIA CPP 0.50
 RELACIÓN 0.5
 FECHA 30/05/2017
 FECHA COLADO 27/01/2017
 EDAD COLADO 28 DIAS

FOLIO RL 002

ECUACIONES

Ecuación simplificada no. 4 NT Build 492

$$D_{nssm} = \frac{0.0239(273 + T)L}{(U - 2)t} \cdot \left(X_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273 + T)L X_d}{U - 2}} \right)$$

D_{nssm} : Coeficiente de migración en estado no estacionario $\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$.

U: Valor absoluto del voltaje aplicado, V.

T: Valor promedio de la temperatura inicial y final de la solución anólito, °C.

L: Espesor del espécimen, mm.

X_d : Valor promedio de la profundidad de penetración, mm.

t: duración de la prueba, hora.

PREPARACIÓN DEL ENSAYO

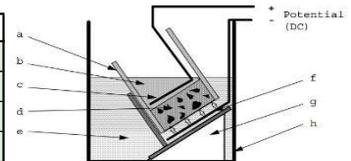
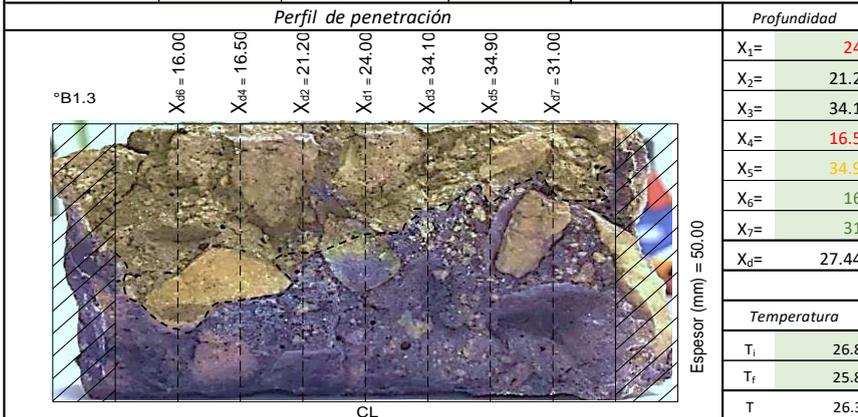
Disolución Catódica - NaCl 1333.33 gr NaCl / 12 L. H₂O
 Disolución Anódica - NaOH 3.6 gr. NaOH/0. 300 L. H₂O
 Nitrito de Plata - AgNO₃ 0.1M AgNO₃

DATOS DEL ENSAYO

Espécimen 1

ID Rodaja °B1.3 Espesor (mm) 50.00 Diámetro (mm) 100 Peso (gr) 764.00

Voltaje inicial 30 V mA inicial 256 mA
 Voltaje ajustado 11.5 V mA ajustado 64 mA 24 h

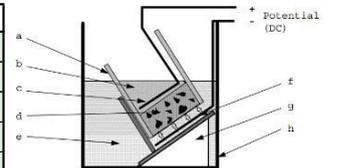
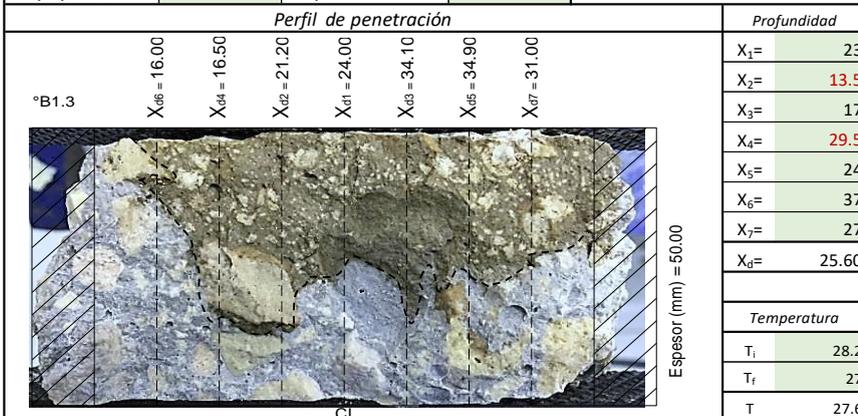


| Datos | |
|--------------------------|-------------------------------|
| 10.23 V | Voltaje aplicado (U) |
| 26.3 °C | Temperatura (T) |
| 50.00 mm | Espesor (L) |
| 27.44 mm | Profundidad (X _d) |
| 24 hrs | Duración ensayo (t) |
| Coeficiente de migración | |
| 40.06 | D _{nssm} |

Espécimen 2

ID Rodaja °B2.2 Espesor (mm) 50.80 Diámetro (mm) 100 Peso (gr) 854

Voltaje inicial 30 V mA inicial 1062 mA
 Voltaje ajustado 10 V mA ajustado 41 mA 24 hrs.



| Datos | |
|--------------------------|-------------------------------|
| 11.18 V | Voltaje aplicado (U) |
| 27.6 °C | Temperatura (T) |
| 50.80 mm | Espesor (L) |
| 25.60 mm | Profundidad (X _d) |
| 24 hrs | Duración ensayo (t) |
| Coeficiente de migración | |
| 34.27 | D _{nssm} |

Promedio

| Peso (gr) | Diámetro (mm) | Voltaje aplicado (U) | Temperatura (T) | Espesor (L) | Profundidad (X _d) | Duración ensayo (t) | Coeficiente de migración (D _{nssm}) |
|-----------|---------------|----------------------|-----------------|-------------|-------------------------------|---------------------|---|
| 809 grs | 100 mm | 10.71 V | 26.95 °C | 50.40 m | 26.52 mm | 24 hrs | 37.17 |

CEDULA PRUEBA MIGRACIÓN DE CLORUROS

NT BUILD 492

FAMILIA CPC 0.50
 RELACIÓN 0.50
 FECHA 02/06/2017
 FECHA COLADO 22/02/2017
 EDAD COLADO 28 DIAS

FOLIO RL 005

ECUACIONES

Ecuación simplificada no. 4 NT Build 492

$$D_{nssm} = \frac{0.0239(273 + T)L}{(U - 2)t} \cdot \left(X_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273 + T)L X_d}{U - 2}} \right)$$

D_{nssm} : Coeficiente de migración en estado no estacionario $\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$.

U : Valor absoluto del voltaje aplicado, V.

T : Valor promedio de la temperatura inicial y final de la solución anólito, °C.

L : Espesor del espécimen, mm.

X_d : Valor promedio de la profundidad de penetración, mm.

t : duración de la prueba, hora.

PREPARACIÓN DEL ENSAYO

Disolución Catódica - NaCl 1333.33 gr NaCl / 12 L. H₂O
 Disolución Anódica - NaOH 3.6 gr. NaOH/0. 300 L. H₂O
 Nitrato de Plata - AgNO₃ 0.1M AgNO₃

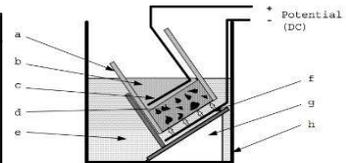
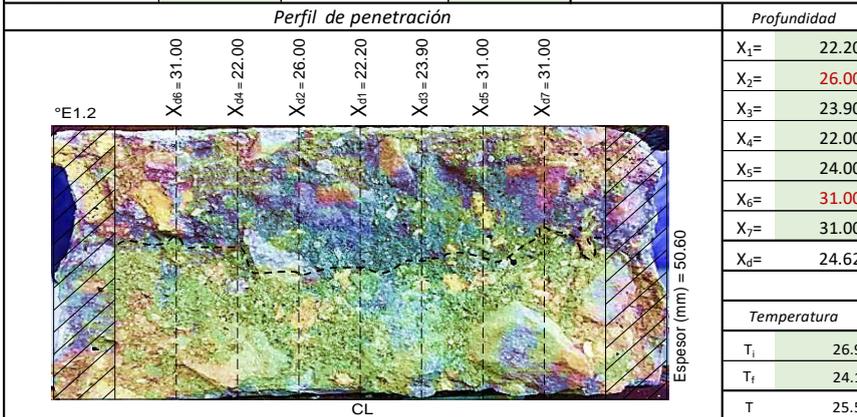
DATOS DEL ENSAYO

Espécimen 1

ID Rodaja °E1.2 Espesor (mm) 50.60 Diámetro (mm) 100 Peso (gr) 760

Voltaje inicial 30 V mA inicial 473 mA
 Voltaje ajustado 10 V mA ajustado 24 mA

24hrs--6hrs



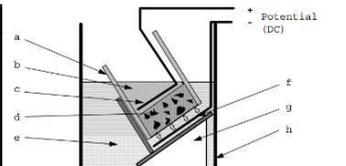
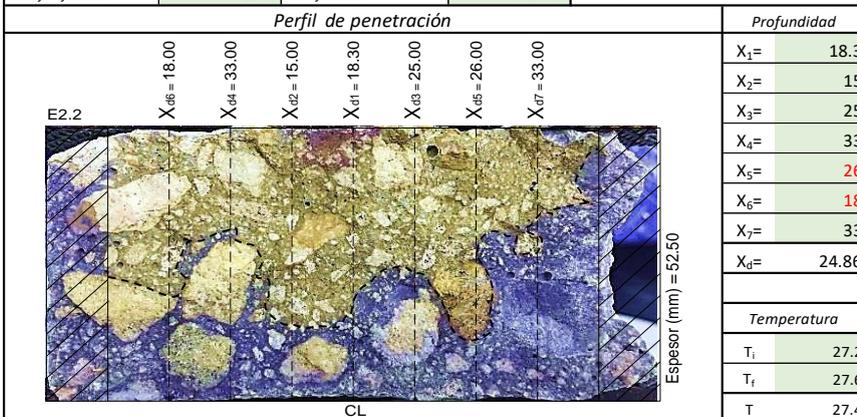
| Datos | |
|--------------------------|-------------------------------|
| 10.67 V | Voltaje aplicado (U) |
| 25.5 °C | Temperatura (T) |
| 50.60 mm | Espesor (L) |
| 24.62 mm | Profundidad (X _d) |
| 24 hrs | Duración ensayo (t) |
| Coeficiente de migración | |
| 34.17 | D _{nssm} |

Espécimen 2

ID Rodaja E2.2 Espesor (mm) 52.50 Diámetro (mm) 100 Peso (gr) 900

Voltaje inicial 30 V mA inicial 753 mA
 Voltaje ajustado 10 V mA ajustado 31 mA

24hrs



| Datos | |
|--------------------------|-------------------------------|
| 11.93 V | Voltaje aplicado (U) |
| 27.4 °C | Temperatura (T) |
| 52.50 mm | Espesor (L) |
| 24.86 mm | Profundidad (X _d) |
| 24 hrs | Duración ensayo (t) |
| Coeficiente de migración | |
| 31.84 | D _{nssm} |

Promedio

| Peso (gr) | Diámetro (mm) | Voltaje aplicado (U) | Temperatura (T) | Espesor (L) | Profundidad (X _d) | Duración ensayo (t) | Coeficiente de migración (D _{nssm}) |
|-----------|---------------|----------------------|-----------------|-------------|-------------------------------|---------------------|---|
| 830 grs | 100 mm | 11.30 V | 26.45 °C | 51.55 m | 24.74 mm | 24 hrs | 33.01 |

CEDULA PRUEBA MIGRACIÓN DE CLORUROS

NT BUILD 492

FAMILIA CPP 0.50 NTC
 RELACIÓN 0.5
 FECHA 09/06/2017
 FECHA COLADO 08/03/2017
 EDAD COLADO 28 DIAS

FOLIO RL 008

ECUACIONES

Ecuación simplificada no. 4 NT Build 492

$$D_{nssm} = \frac{0.0239(273 + T)L}{(U - 2)t} \cdot \left(X_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273 + T)L X_d}{U - 2}} \right)$$

D_{nssm} : Coeficiente de migración en estado no estacionario $\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$.

U: Valor absoluto del voltaje aplicado, V.

T: Valor promedio de la temperatura inicial y final de la solución anólito, °C.

L: Espesor del espécimen, mm.

X_d : Valor promedio de la profundidad de penetración, mm.

t: duración de la prueba, hora.

PREPARACIÓN DEL ENSAYO

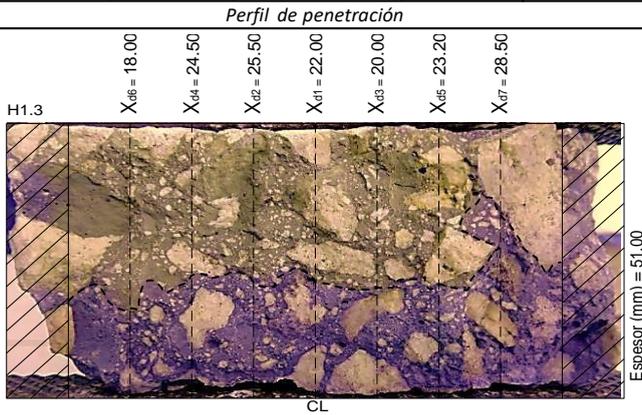
Disolución Catódica - NaCl 1333.33 gr NaCl / 12 L. H₂O
 Disolución Anódica - NaOH 3.6 gr. NaOH/0. 300 L. H₂O
 Nitrato de Plata - AgNO₃ 0.1M AgNO₃

DATOS DEL ENSAYO

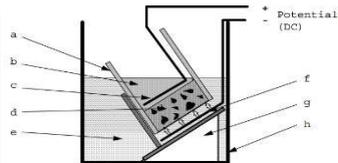
Espécimen 1

ID Rodaja H1.3 Espesor (mm) 51.00 Diámetro (mm) 100.00 Peso (gr) 866.00

Voltaje inicial 30 V mA inicial 713 mA
 Voltaje ajustado 10 V mA ajustado 30 mA 24 hrs



| Profundidad | Value |
|----------------|-------|
| X ₁ | 22 |
| X ₂ | 25.5 |
| X ₃ | 20 |
| X ₄ | 24.5 |
| X ₅ | 23.2 |
| X ₆ | 17.5 |
| X ₇ | 28.5 |
| X _d | 21.90 |
| Temperatura | |
| T _i | 26.2 |
| T _f | 25.7 |
| T | 25.95 |

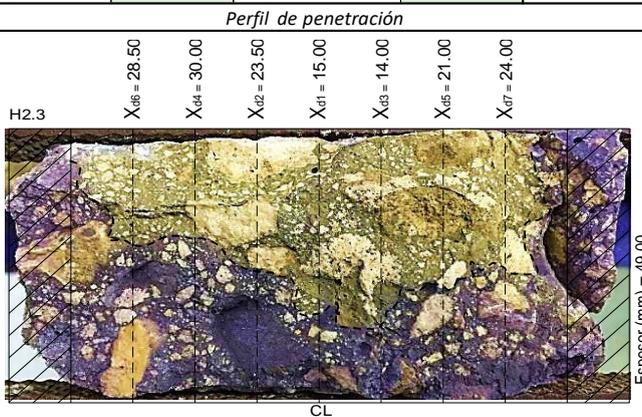


| Datos | |
|--------------------------|-------------------------------|
| 10.63 V | Voltaje aplicado (U) |
| 25.95 °C | Temperatura (T) |
| 51.00 mm | Espesor (L) |
| 21.90 mm | Profundidad (X _d) |
| 24 hrs | Duración ensayo (t) |
| Coeficiente de migración | |
| 30.28 | D _{nssm} |

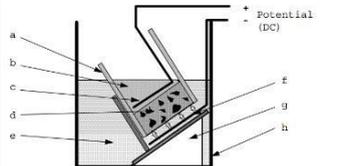
Espécimen 2

ID Rodaja H2.3 Espesor (mm) 49.00 Diámetro (mm) 100 Peso (gr) 820

Voltaje inicial 30 V mA inicial 658 mA
 Voltaje ajustado 10 V mA ajustado 26 mA 24hrs



| Profundidad | Value |
|----------------|-------|
| X ₁ | 15 |
| X ₂ | 23.5 |
| X ₃ | 14 |
| X ₄ | 30 |
| X ₅ | 21 |
| X ₆ | 28.5 |
| X ₇ | 24 |
| X _d | 21.70 |
| Temperatura | |
| T _i | 27.5 |
| T _f | 27.5 |
| T | 27.5 |



| Datos | |
|--------------------------|-------------------------------|
| 11.86 V | Voltaje aplicado (U) |
| 27.5 °C | Temperatura (T) |
| 49.00 mm | Espesor (L) |
| 21.70 mm | Profundidad (X _d) |
| 24 hrs | Duración ensayo (t) |
| Coeficiente de migración | |
| 25.90 | D _{nssm} |

Promedio

| Peso (gr) | Diámetro (mm) | Voltaje aplicado (U) | Temperatura (T) | Espesor (L) | Profundidad (X _d) | Duración ensayo (t) | Coeficiente de migración (D _{nssm}) |
|-----------|---------------|----------------------|-----------------|-------------|-------------------------------|---------------------|---|
| 843 grs | 100 mm | 11.25 V | 26.725 °C | 50.00 m | 21.80 mm | 24 hrs | 28.09 |

FAMILIA CPC 0.50 NTC
 RELACIÓN 0.5
 FECHA 11/06/2017
 FECHA COLADO 22/03/2017
 EDAD COLADO 28 DIAS

FOLIO RL 011

ECUACIONES

Ecuación simplificada no. 4 NT Build 492

$$D_{nssm} = \frac{0.0239(273 + T)L}{(U - 2)t} \cdot \left(X_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273 + T)L X_d}{U - 2}} \right)$$

D_{nssm} : Coeficiente de migración en estado no estacionario $\times 10^{-12} m^2 / s$.
 U: Valor absoluto del voltaje aplicado, V.
 T: Valor promedio de la temperatura inicial y final de la solución anólito, °C.
 L: Espesor del espécimen, mm.
 X_d : Valor promedio de la profundidad de penetración, mm.
 t: duración de la prueba, hora.

PREPARACIÓN DEL ENSAYO

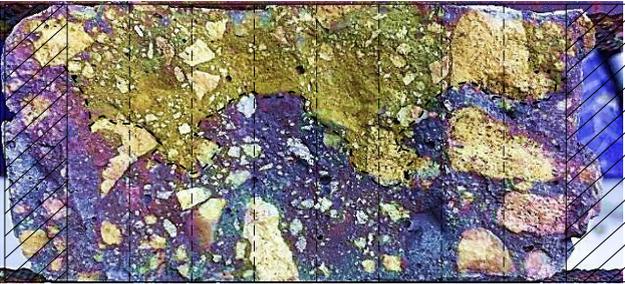
Disolución Catódica - NaCl 1333.33 gr NaCl / 12 L. H₂O
 Disolución Anódica - NaOH 3.6 gr. NaOH/0. 300 L. H₂O
 Nitrate de Plata - AgNO₃ 0.1M AgNO₃

DATOS DEL ENSAYO

Especimen 1

| | | | | | | | |
|------------------|------|--------------|--------|---------------|-----|-----------|--------|
| ID Rodaja | K1.2 | Espesor (mm) | 52.00 | Diámetro (mm) | 100 | Peso (gr) | 888.00 |
| Voltaje inicial | 30 V | mA inicial | 967 mA | | | | |
| Voltaje ajustado | 10 V | mA ajustado | 39 mA | 24hrs | | | |

| Perfil de penetración | | Profundidad |
|-----------------------|------------------|---------------|
| $X_{i6} = 22.50$ | $X_{i4} = 20.90$ | $X_1 = 30.5$ |
| $X_{i2} = 35.80$ | $X_{i1} = 30.50$ | $X_2 = 35.8$ |
| $X_{i3} = 21.00$ | $X_{i5} = 34.50$ | $X_3 = 21$ |
| $X_{i7} = 35.00$ | | $X_4 = 20.9$ |
| | | $X_5 = 34.5$ |
| | | $X_6 = 22.5$ |
| | | $X_7 = 35$ |
| | | $X_d = 28.84$ |



| Temperatura | |
|----------------|-------|
| T _i | 26.2 |
| T _f | 27.5 |
| T | 26.85 |

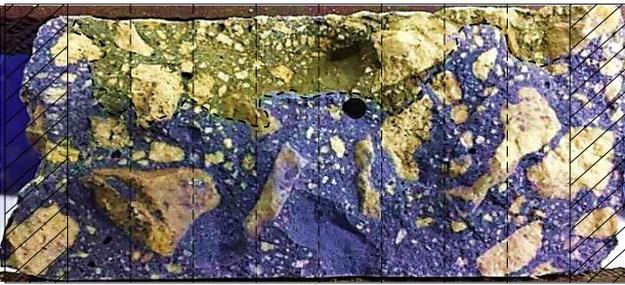
| Datos | |
|----------|-------------------------------|
| 10.85 V | Voltaje aplicado (U) |
| 26.85 °C | Temperatura (T) |
| 52.00 mm | Espesor (L) |
| 28.84 mm | Profundidad (X _d) |
| 24 hrs | Duración ensayo (t) |

| Coeficiente de migración | |
|--------------------------|-------------------|
| 41.19 | D _{nssm} |

Especimen 2

| | | | | | | | |
|------------------|------|--------------|-------|---------------|-----|-----------|-----|
| ID Rodaja | K2.2 | Espesor (mm) | 49.50 | Diámetro (mm) | 100 | Peso (gr) | 850 |
| Voltaje inicial | 30 V | mA inicial | 402 V | | | | |
| Voltaje ajustado | 10 V | mA ajustado | 29 V | 24hrs | | | |

| Perfil de penetración | | Profundidad |
|-----------------------|------------------|---------------|
| $X_{i6} = 31.00$ | $X_{i4} = 32.00$ | $X_1 = 34$ |
| $X_{i2} = 33.00$ | $X_{i1} = 34.00$ | $X_2 = 33$ |
| $X_{i3} = 32.50$ | $X_{i5} = 39.50$ | $X_3 = 32.5$ |
| $X_{i7} = 43.00$ | | $X_4 = 32$ |
| | | $X_5 = 39.5$ |
| | | $X_6 = 31$ |
| | | $X_7 = 43$ |
| | | $X_d = 34.25$ |



| Temperatura | |
|----------------|------|
| T _i | 27.5 |
| T _f | 26.3 |
| T | 26.9 |

| Datos | |
|----------|-------------------------------|
| 12.16 V | Voltaje aplicado (U) |
| 26.9 °C | Temperatura (T) |
| 49.50 mm | Espesor (L) |
| 34.25 mm | Profundidad (X _d) |
| 24 hrs | Duración ensayo (t) |

| Coeficiente de migración | |
|--------------------------|-------------------|
| 42.09 | D _{nssm} |

Promedio

| Peso (gr) | Diámetro (mm) | Voltaje aplicado (U) | Temperatura (T) | Espesor (L) | Profundidad (X _d) | Duración ensayo (t) | Coeficiente de migración (D _{nssm}) |
|-----------|---------------|----------------------|-----------------|-------------|-------------------------------|---------------------|---|
| 869 grs | 100 mm | 11.51 V | 26.875 °C | 50.75 m | 31.55 mm | 24 hrs | 41.64 |

FAMILIA CPP 0.45
 RELACIÓN 0.45
 FECHA 31/05/2017
 FECHA COLADO 06/02/2017
 EDAD COLADO 28 DIAS

FOLIO RL 003

ECUACIONES

Ecuación simplificada no. 4 NT Build 492

$$D_{nssm} = \frac{0.0239(273 + T)L}{(U - 2)t} \cdot \left(X_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273 + T)L X_d}{U - 2}} \right)$$

D_{nssm} : Coeficiente de migración en estado no estacionario $\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$.

U: Valor absoluto del voltaje aplicado, V.

T: Valor promedio de la temperatura inicial y final de la solución anódito, °C.

L: Espesor del espécimen, mm.

X_d : Valor promedio de la profundidad de penetración, mm.

t: duración de la prueba, hora.

PREPARACIÓN DEL ENSAYO

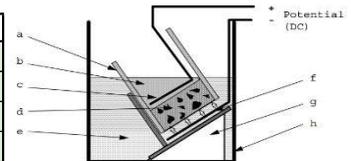
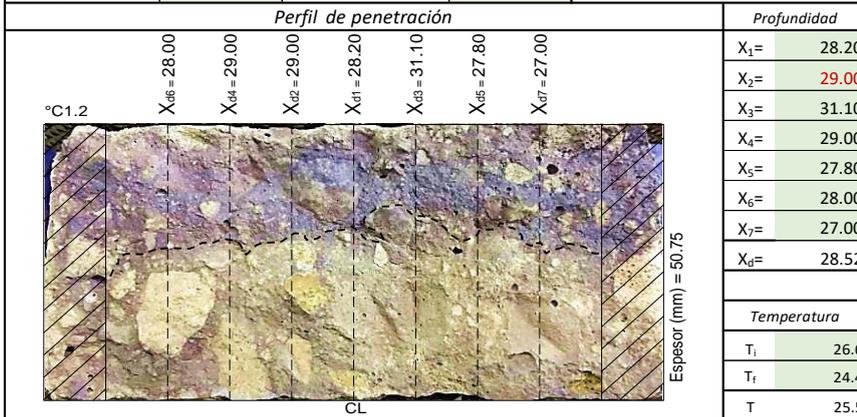
Disolución Catódica - NaCl 1333.33 gr NaCl / 12 L. H₂O
 Disolución Anódica - NaOH 3.6 gr. NaOH/0. 300 L. H₂O
 Nitrate de Plata - AgNO₃ 0.1M AgNO₃

DATOS DEL ENSAYO

Espécimen 1

ID Rodaja °C1.2 Espesor (mm) 50.75 Diámetro (mm) 100 Peso (gr) 816.00

Voltaje inicial 30 V mA inicial 420 V
 Voltaje ajustado 10 V mA ajustado 72 V 24 h-- 6h

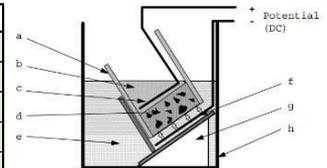
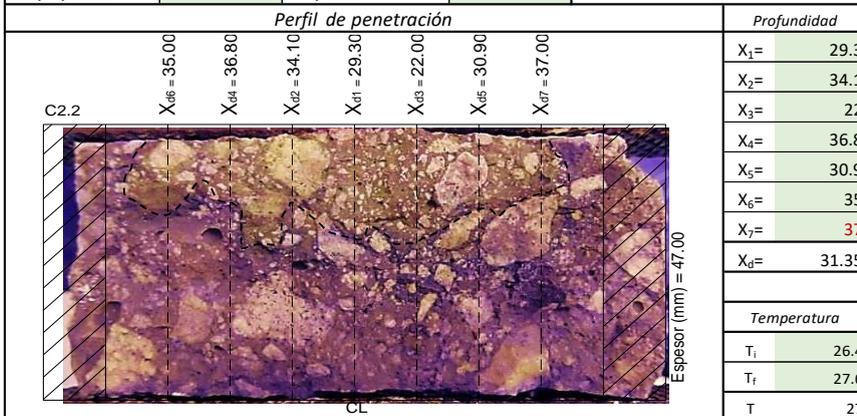


| Datos | |
|--------------------------|-------------------------------|
| 10 V | Voltaje aplicado (U) |
| 25.5 °C | Temperatura (T) |
| 50.75 mm | Espesor (L) |
| 28.52 mm | Profundidad (X _d) |
| 24 hrs | Duración ensayo (t) |
| Coeficiente de migración | |
| 43.35 | D _{nssm} |

Espécimen 2

ID Rodaja C2.2 Espesor (mm) 47.00 Diámetro (mm) 100 Peso (gr) 788

Voltaje inicial 30 V mA inicial 997 mA
 Voltaje ajustado 10 V mA ajustado 35 mA 24hrs



| Datos | |
|--------------------------|-------------------------------|
| 10.88 V | Voltaje aplicado (U) |
| 27 °C | Temperatura (T) |
| 47.00 mm | Espesor (L) |
| 31.35 mm | Profundidad (X _d) |
| 24 hrs | Duración ensayo (t) |
| Coeficiente de migración | |
| 41.17 | D _{nssm} |

Promedio

| Peso (gr) | Diámetro (mm) | Voltaje aplicado (U) | Temperatura (T) | Espesor (L) | Profundidad (X _d) | Duración ensayo (t) | Coeficiente de migración (D _{nssm}) |
|-----------|---------------|----------------------|-----------------|-------------|-------------------------------|---------------------|---|
| 802 grs | 100 mm | 10.44 V | 26.25 °C | 48.88 m | 29.93 mm | 24 hrs | 42.26 |

CEDULA PRUEBA MIGRACIÓN DE CLORUROS

NT BUILD 492

FAMILIA CPC 0.45
 RELACIÓN 0.45
 FECHA 07/04/2017
 FECHA COLADO 24/02/2017
 EDAD COLADO 28 DIAS

FOLIO RL 006

ECUACIONES

Ecuación simplificada no. 4 NT Build 492

$$D_{nssm} = \frac{0.0239(273 + T)L}{(U - 2)t} \cdot \left(X_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273 + T)L X_d}{U - 2}} \right)$$

D_{nssm} : Coeficiente de migración en estado no estacionario $\times 10^{-12} m^2 / s$.
 U: Valor absoluto del voltaje aplicado, V.
 T: Valor promedio de la temperatura inicial y final de la solución anólito, °C.
 L: Espesor del espécimen, mm.
 X_d : Valor promedio de la profundidad de penetración, mm.
 t: duración de la prueba, hora.

PREPARACIÓN DEL ENSAYO

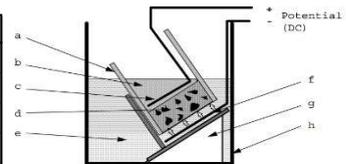
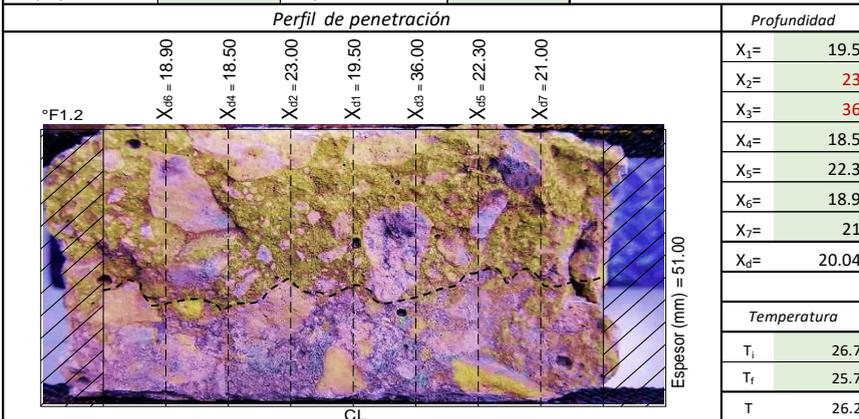
Disolución Catódica - NaCl 1333.33 gr NaCl / 12 L. H₂O
 Disolución Anódica - NaOH 3.6 gr. NaOH/0. 300 L. H₂O
 Nitrato de Plata - AgNO₃ 0.1M AgNO₃

DATOS DEL ENSAYO

Espécimen 1

ID Rodaja °F1.2 Espesor (mm) 51.00 Diámetro (mm) 100 Peso (gr) 773

Voltaje inicial 30 V mA inicial 41 mA
 Voltaje ajustado 30 V mA ajustado 41 mA 24hrs

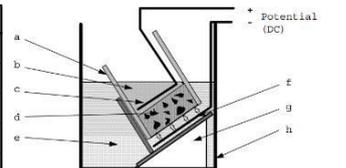
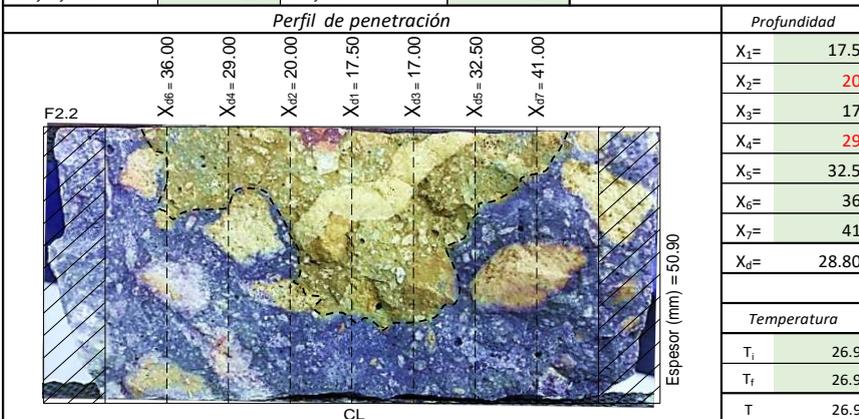


| Datos | |
|--------------------------|-------------------------------|
| 11.7 V | Voltaje aplicado (U) |
| 26.2 °C | Temperatura (T) |
| 51.00 mm | Espesor (L) |
| 20.04 mm | Profundidad (X _d) |
| 24 hrs | Duración ensayo (t) |
| Coeficiente de migración | |
| 24.77 | D _{nssm} |

Espécimen 2

ID Rodaja F2.2 Espesor (mm) 50.90 Diámetro (mm) 100 Peso (gr) 866

Voltaje inicial 30 V mA inicial 462 V
 Voltaje ajustado 10 V mA ajustado 19 V 24hrs



| Datos | |
|--------------------------|-------------------------------|
| 11.67 V | Voltaje aplicado (U) |
| 26.9 °C | Temperatura (T) |
| 50.90 mm | Espesor (L) |
| 28.80 mm | Profundidad (X _d) |
| 24 hrs | Duración ensayo (t) |
| Coeficiente de migración | |
| 37.30 | D _{nssm} |

Promedio

| Peso (gr) | Diámetro (mm) | Voltaje aplicado (U) | Temperatura (T) | Espesor (L) | Profundidad (X _d) | Duración ensayo (t) | Coeficiente de migración (D _{nssm}) |
|-----------|---------------|----------------------|-----------------|-------------|-------------------------------|---------------------|---|
| 819.5 grs | 100 mm | 11.69 V | 26.55 °C | 50.95 m | 24.42 mm | 24 hrs | 31.04 |

FAMILIA CPP 0.45 NTC
 RELACIÓN 0.45
 FECHA **10/06/2017**
 FECHA COLADO 09/03/2017
 EDAD COLADO **28 DIAS**

 FOLIO **RL 009**
ECUACIONES

Ecuación simplificada no. 4 NT Build 492

$$D_{nssm} = \frac{0.0239(273 + T)L}{(U - 2)t} \cdot \left(X_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273 + T)L X_d}{U - 2}} \right)$$

 D_{nssm} : Coeficiente de migración en estado no estacionario $\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$.

U: Valor absoluto del voltaje aplicado, V.

T: Valor promedio de la temperatura inicial y final de la solución anólito, °C.

L: Espesor del espécimen, mm.

 X_d : Valor promedio de la profundidad de penetración, mm.

t: duración de la prueba, hora.

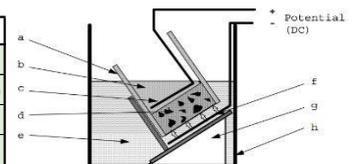
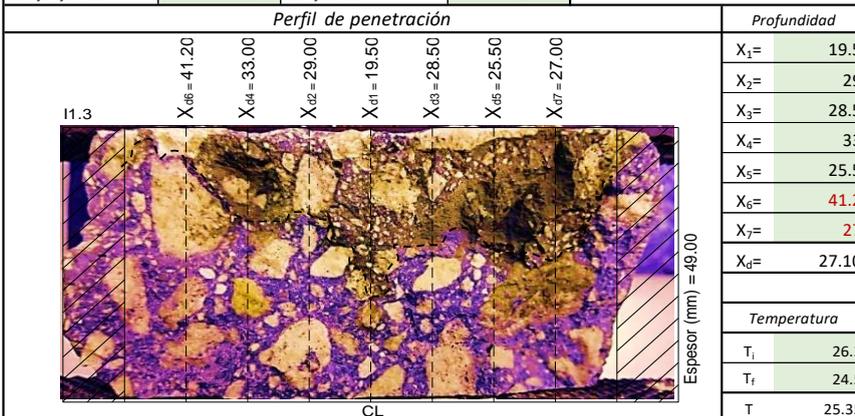
PREPARACIÓN DEL ENSAYO

| | |
|--|--|
| Disolución Catódica - NaCl | 1333.33 gr NaCl / 12 L. H ₂ O |
| Disolución Anódica - NaOH | 3.6 gr. NaOH/0. 300 L. H ₂ O |
| Nitrato de Plata - AgNO₃ | 0.1M AgNO ₃ |

DATOS DEL ENSAYO
Espécimen 1

 ID Rodaja **11.3** Espesor (mm) **49.00** Diámetro (mm) **100** Peso (gr) **831**

| | | | |
|------------------|------|-------------|--------|
| Voltaje inicial | 30 V | mA inicial | 512 mA |
| Voltaje ajustado | 10 V | mA ajustado | 26 mA |

24 hrs

Datos

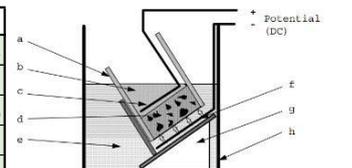
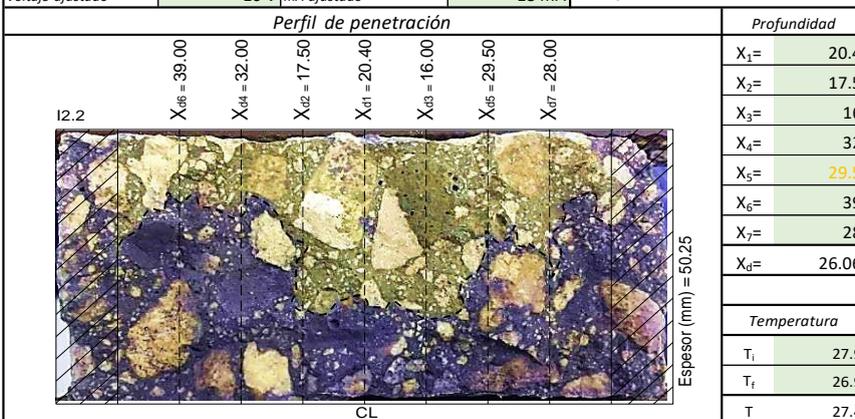
| | |
|----------|-------------------------------|
| 11.07 V | Voltaje aplicado (U) |
| 25.35 °C | Temperatura (T) |
| 49.00 mm | Espesor (L) |
| 27.10 mm | Profundidad (X _d) |
| 24 hrs | Duración ensayo (t) |

Coeficiente de migración

35.51 **Dnssm**
Espécimen 2

 ID Rodaja **12.2** Espesor (mm) **50.25** Diámetro (mm) **100** Peso (gr) **850**

| | | | |
|------------------|------|-------------|--------|
| Voltaje inicial | 30 V | mA inicial | 278 mA |
| Voltaje ajustado | 10 V | mA ajustado | 18 mA |

24hrs

Datos

| | |
|----------|-------------------------------|
| 12.55 V | Voltaje aplicado (U) |
| 27.4 °C | Temperatura (T) |
| 50.25 mm | Espesor (L) |
| 26.06 mm | Profundidad (X _d) |
| 24 hrs | Duración ensayo (t) |

Coeficiente de migración

30.58 **Dnssm**
Promedio

| Peso (gr) | Diámetro (mm) | Voltaje aplicado (U) | Temperatura (T) | Espesor (L) | Profundidad (X _d) | Duración ensayo (t) | Coeficiente de migración (Dnssm) |
|-----------|---------------|----------------------|-----------------|-------------|-------------------------------|---------------------|----------------------------------|
| 840.5 grs | 100 mm | 11.81 V | 26.375 °C | 49.63 mm | 26.58 mm | 24 hrs | 33.05 |

CEDULA PRUEBA MIGRACIÓN DE CLORUROS

NT BUILD 492

FAMILIA CPC 0.45 NTC
 RELACIÓN 0.45
 FECHA 12/06/2017
 FECHA COLADO 23/03/2017
 EDAD COLADO 28 DIAS

FOLIO RL 012

ECUACIONES

Ecuación simplificada no. 4 NT Build 492

$$D_{nssm} = \frac{0.0239(273 + T)L}{(U - 2)t} \cdot \left(X_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273 + T)L X_d}{U - 2}} \right)$$

D_{nssm} : Coeficiente de migración en estado no estacionario $\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$.

U: Valor absoluto del voltaje aplicado, V.

T: Valor promedio de la temperatura inicial y final de la solución anólito, °C.

L: Espesor del espécimen, mm.

X_d : Valor promedio de la profundidad de penetración, mm.

t: duración de la prueba, hora.

PREPARACIÓN DEL ENSAYO

Disolución Catódica - NaCl 1333.33 gr NaCl / 12 L. H₂O
 Disolución Anódica - NaOH 3.6 gr. NaOH/0. 300 L. H₂O
 Nitrato de Plata - AgNO₃ 0.1M AgNO₃

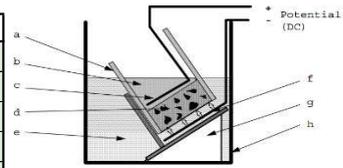
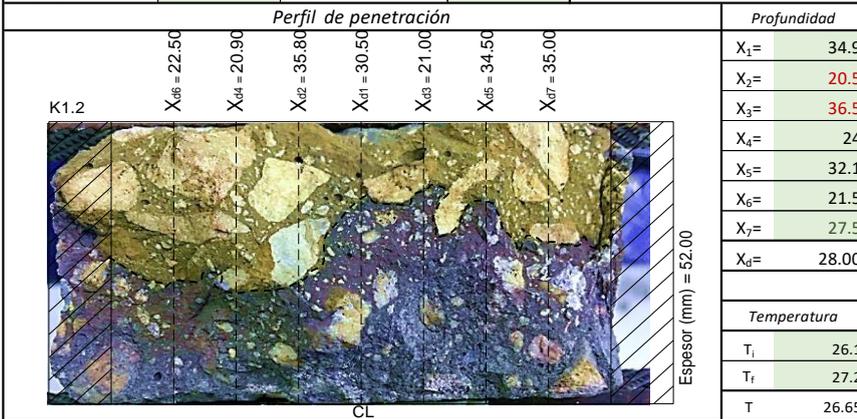
DATOS DEL ENSAYO

Espécimen 1

ID Rodaja L1.3 Espesor (mm) 49.30 Diámetro (mm) 100 Peso (gr) 850.00

Voltaje inicial 30 V mA inicial 480 mA
 Voltaje ajustado 10 V mA ajustado 33 mA

24hrs

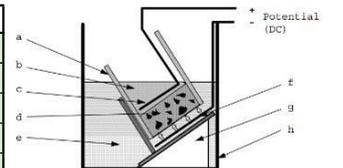
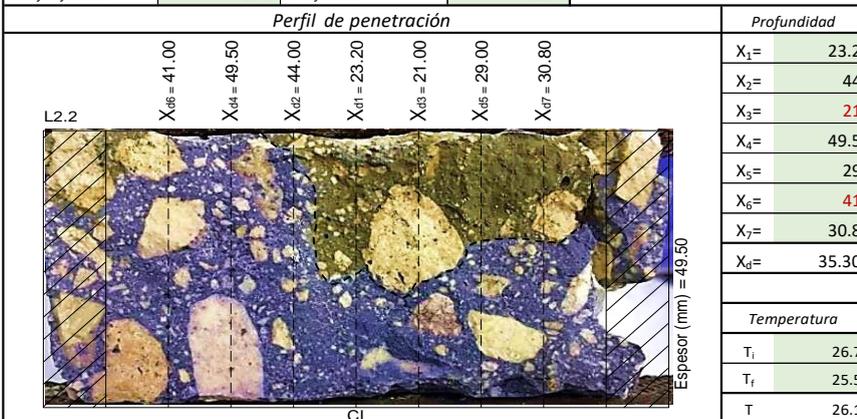


| Datos | |
|--------------------------|-------------------------------|
| 10.92 V | Voltaje aplicada (U) |
| 26.65 °C | Temperatura (T) |
| 49.30 mm | Espesor (L) |
| 28.00 mm | Profundidad (X _d) |
| 24 hrs | Duración ensayo (t) |
| Coeficiente de migración | |
| 37.73 | D _{nssm} |

Espécimen 2

ID Rodaja L2.2 Espesor (mm) 49.50 Diámetro (mm) 100 Peso (gr) 840

Voltaje inicial 30 V mA inicial 456 V
 Voltaje ajustado 10 V mA ajustado 26 V



| Datos | |
|--------------------------|-------------------------------|
| 11.83 V | Voltaje aplicada (U) |
| 26.1 °C | Temperatura (T) |
| 49.50 mm | Espesor (L) |
| 35.30 mm | Profundidad (X _d) |
| 24 hrs | Duración ensayo (t) |
| Coeficiente de migración | |
| 44.71 | D _{nssm} |

Promedio

| Peso (gr) | Diámetro (mm) | Voltaje aplicado (U) | Temperatura (T) | Espesor (L) | Profundidad (X _d) | Duración ensayo (t) | Coeficiente de migración (D _{nssm}) |
|-----------|---------------|----------------------|-----------------|-------------|-------------------------------|---------------------|---|
| 845 grs | 100 mm | 11.38 V | 26.375 °C | 49.40 mm | 31.65 mm | 24 hrs | 41.22 |