

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE VILLAHERMOSA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION

**“CONCRETO ESTRUCTURAL CON PARTÍCULAS DE CAUCHO DE
NEUMÁTICOS FUERA DE USO (NFU)”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:

EDGAR LORENZO HERNÁNDEZ PÉREZ

DIRECTOR:

M.I.P.A. NOEMÍ MÉNDEZ DE LOS SANTOS

CODIRECTOR:

M.I.P.A. MARIO JOSÉ ROMELLÓN CERINO

VILLAHERMOSA, TABASCO.

JUNIO 2017



RSGC 544

Inicio: 2009.08.05

Recertificación: 2015.07.24

Terminación: 2018.07.24

SEP

SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
Instituto Tecnológico de Villahermosa

"Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos"

Dependencia: Div. de Estudios de Posgrado e Inv.
Oficio No.: DEPI/349/2017.
Asunto: Autorización de impresión
Fecha: 15 de Junio de 2017.

C. EDGAR LORENZO HERNÁNDEZ PÉREZ
ESTUDIANTE DE LA MAESTRIA EN INGENIERIA
PRESENTE

De acuerdo al fallo emitido por la comisión revisora integrada por los CC. MIPA. Noemí Méndez de los Santos, MIPA. Mario José Romellón Cerino, MC. Nora Purata Pérez, DRA. Rocío del Carmen Antonio Cruz, y considerando que cubre con todos los requisitos de Reglamento de Titulación en vigor, damos a usted nuestra Autorización para que proceda a imprimir su Trabajo Profesional Titulado:

"CONCRETO ESTRUCTURAL CON PARTÍCULAS DE CAUCHO DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO (NFU)"

Hago de su conocimiento lo anterior para los efectos y fines correspondientes.

ATENTAMENTE

Tierra, Tiempo, Trabajo y Tecnología

M.A. CARLOS MARIO MARTINEZ IZQUIERDO
JEFE DE LA DIV. DE EST. DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN.

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE VILLAHERMOSA

DIVISION DE
ESTUDIOS DE POSGRADO
E INVESTIGACION

c.c.p.: Archivo
MA'CMMI/CCDR



Carretera Villahermosa-Frontera Km. 3.5 Cd. Industrial C.P. 86010 Apdo 424
Tels. 01 (993) 353-02-59, 353-26-49, Fax 137. Villahermosa, Tabasco, México

www.itvillahermosa.edu.mx



RSGC 544



Inicio: 2009.08.05

Recertificación: 2015.07.24

Terminación: 2018.07.24

2018.07.24

Dedico esta tesis a Dios, quien en su Soberana Voluntad me proporcionó el tiempo, proveyó los recursos y envió a las personas que me ayudaron a concluir este trabajo.

“Y todo lo que hacéis, sea de palabra o de hecho, hacedlo todo en el nombre del Señor Jesús, dando gracias a Dios Padre por medio de él.”

Colosenses 3: 17

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por darme la oportunidad de culminar esta etapa en mi vida y acompañarme siempre en cada paso.

A mis familiares, quienes estuvieron a mi lado en los momentos buenos, pero sobre todo en los momentos difíciles.

A mi Directora de Tesis, quien me motivó incansablemente a lograr concluir este trabajo.

A mis sinodales, porque su valioso tiempo y su gran capacidad quedan reflejados en el perfeccionamiento de esta tesis.

A mis profesores de la Maestría, que tuvieron la paciencia y el interés de inculcar en mí sus conocimientos y su experiencia.

A mis compañeros de clase, con quienes compartí las experiencias que me formaron profesionalmente en esta etapa.

A todas las personas que me apoyaron incondicionalmente para lograr el día de hoy esta gran meta.

A todos ellos se los agradezco desde el fondo de mi alma.

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	V
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
RESUMEN	IX
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVO GENERAL.....	6
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	6
CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO	7
1.1. El concreto	7
1.1.1. Generalidades del concreto	7
1.1.1.1. Composición del concreto	8
1.1.1.1.1. Cemento portland	8
1.1.1.1.2. Agregados del concreto	8
1.1.1.1.3. Agua de mezcla para concreto	9
1.1.1.2. Ventajas del concreto frente a otros materiales	10
1.1.1.3. Resistencia a la compresión	11
1.1.1.4. Masa volumétrica	11
1.1.2. Diseño de resistencia	12
1.1.2.1. Relación agua-cemento	13
1.1.2.2. Tamaño de agregados	13
1.1.2.3. Trabajabilidad (Revenimiento)	15
1.1.3. Normas de calidad.....	15



1.1.3.1.	Normas Internacionales	16
1.1.3.1.1.	Normas ACI	16
1.1.3.1.2.	Normas ASTM	16
1.1.3.1.3.	Normas AASHTO.....	18
1.1.3.2.	Normas Mexicanas	19
1.2.	El Caucho y los neumáticos	22
1.2.1.	Generalidades del caucho	22
1.2.1.1.	Composición y estructura.....	23
1.2.1.2.	Propiedades	23
1.2.2.	Los neumáticos.....	24
1.2.2.1.	Proceso de elaboración de neumáticos	24
1.2.2.2.	Impacto en el entorno	26
1.2.2.2.1.	Cuánto contamina la quema de llantas y neumáticos.....	26
1.2.2.3.	Proceso de trituración de neumáticos	28
1.2.2.3.1.	Niveles de molienda.....	28
CAPÍTULO 2.	METODOLOGÍA.....	30
2.1.	Diseño experimental de los elementos de prueba para resistencia del concreto ecológico.....	30
2.1.1.	Descripción del contenido de las muestras y las pruebas a realizar.....	31
2.1.2.	Recepción del material	32
2.1.3.	Almacenamiento y preparación de los agregados	33
2.1.4.	Descripción de los ensayos realizados a los materiales.....	34
2.2.	Preparación y elaboración de los especímenes de ensayo del concreto.	43



2.2.1. Descripción de las muestras.....	44
2.2.2. Diseño del proporcionamiento de los materiales a utilizar en la mezcla por muestra	45
2.3. Procedimiento de elaboración de los especímenes de cada muestra	53
2.4. Conservación y curado de los especímenes para pruebas de resistencia del concreto.	58
2.4.1. Descimbrado de los especímenes de concreto	59
2.4.2. Curado de los cilindros de la muestra de concreto	59
2.5. Ensaye de los elementos para pruebas de resistencia de acuerdo a las Normas Mexicanas.	60
2.5.1. Procedimiento de ensaye de los especímenes de concreto	61
CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	63
3.1. Resultados del análisis de las propiedades de los materiales	63
3.1.1. Pruebas al agregado grueso	63
3.1.1.1. Peso volumétrico suelto y compactado al agregado grueso	63
3.1.1.2. Densidad relativa	64
3.1.1.3. Absorción	65
3.1.2. Pruebas al agregado fino.....	66
3.1.2.1. Peso volumétrico suelto al agregado fino	66
3.1.2.2. Densidad relativa	67
3.1.2.3. Absorción	67
3.1.2.4. Granulometría de la arena	68
3.1.2.5. Módulo de finura	69



3.2. Tablas de proporcionamiento de materiales para mezclas de concreto por muestra.....	69
3.3. Tablas de resultado de ensayos de resistencia a la compresión de los elementos de pruebas	76
3.4. Análisis estadístico de los datos obtenidos de las pruebas de resistencia a la compresión	77
3.4.1. ANOVA de ensaye a los 7 días de elaboración	77
3.4.2. ANOVA de ensaye a los 14 días de elaboración	78
3.4.3. ANOVA de ensaye a los 28 días de elaboración	79
3.5. Discusión de los resultados	80
CONCLUSIONES	82
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	84
ANEXOS	86



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de cemento portland.....	8
Tabla 2. Distribución de los especímenes de prueba	32
Tabla 3. Descripción de las muestras	44
Tabla 4. Resistencia a compresión media requerida sin datos previos disponibles.....	45
Tabla 5. Relación agua-cemento y resistencia a compresión del concreto.	46
Tabla 6. Revenimientos recomendados para varios tipos de construcción	47
Tabla 7. Requisitos aproximados de agua de mezcla y contenido de aire para diferentes revenimientos y tamaños máximos nominales del agregado.	48
Tabla 8. Volumen de Agregado Grueso por Volumen Unitario de Concreto.....	50
Tabla 9. Distribución de especímenes para ensaye a la compresión.	60
Tabla 10. Datos y cálculos del peso volumétrico seco suelto de la grava.	63
Tabla 11. Datos y cálculos del peso volumétrico seco compactado de la grava.....	64
Tabla 12. Datos y cálculos de la densidad relativa de la grava.....	64
Tabla 13. Datos y cálculos del porcentaje de absorción de la grava.	65
Tabla 14. Datos y cálculos del peso volumétrico seco suelto de la arena.	66
Tabla 15. Datos y cálculos de la densidad relativa de la arena.	67
Tabla 16. Datos y cálculos del porcentaje de absorción de la arena.	67
Tabla 17. Datos granulométricos de la arena.	68
Tabla 18. Parámetros y cantidades de material para mezcla de muestra T.	69
Tabla 19. Parámetros y cantidades de material para mezcla de muestra A.	70
Tabla 20. Parámetros y cantidades de material para mezcla de muestra B.	70
Tabla 21. Parámetros y cantidades de material para mezcla de muestra C.....	71



Tabla 22. Parámetros y cantidades de material para mezcla de muestra D.	71
Tabla 23. Parámetros y cantidades de material para mezcla de muestra E.	72
Tabla 24. Parámetros y cantidades de material para mezcla de muestra F.	72
Tabla 25. Parámetros y cantidades de material para mezcla de muestra G.	73
Tabla 26. Parámetros y cantidades de material para mezcla de muestra H.	73
Tabla 27. Parámetros y cantidades de material para mezcla de muestra I.	74
Tabla 28. Resistencia a la compresión de especímenes de muestra.	76
Tabla 29. Análisis de varianza de especímenes ensayados a los 7 días ($\alpha=5\%$).	77
Tabla 30. Prueba de Tukey de las muestras de ensaye a los 7 días ($\alpha=5\%$).	77
Tabla 31. Análisis de varianza de especímenes ensayados a los 14 días ($\alpha=5\%$).	78
Tabla 32. Prueba de Tukey de las muestras de ensaye a los 14 días ($\alpha=5\%$).	78
Tabla 33. Análisis de varianza de especímenes ensayados a los 28 días ($\alpha=5\%$).	79
Tabla 34. Prueba de Tukey de las muestras de ensaye a los 28 días ($\alpha=5\%$).	79



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Proceso de construcción de neumáticos.	24
Figura 2. Diagrama del procedimiento general de realización.	30
Figura 3. Materiales utilizados en las mezclas.	31
Figura 4. Recepción e inspección del material.	32
Figura 5. Secado del material.	33
Figura 6. Almacenamiento de los agregados.	34
Figura 7. Obtención del peso volumétrico seco de la grava.	35
Figura 8. Prueba para obtención de densidad relativa.	36
Figura 9. Pesaje de material después del secado.	37
Figura 10. Obtención del peso volumétrico de la arena.	38
Figura 11. Comprobación del estado saturado y superficialmente seco de la arena.	39
Figura 12. Procedimiento para determinación del peso específico de la arena.	41
Figura 13. Procedimiento de cribado de la arena.	42
Figura 14. Material retenido en cada malla de cribado de la arena.	43
Figura 15. Relación aproximada entre resistencia a compresión y relación agua- cemento para el concreto.	46
Figura 16. Demanda de agua aproximada para varios revenimientos y tamaños de agregados.	48
Figura 17. Volumen del agregado grueso por unidad de volumen de concreto.	49
Figura 18. Hoja de cálculo programada para proporcionamiento de concreto.	52
Figura 19. Pesaje del material necesario para elaborar la mezcla.	53
Figura 20. Ensaye de humedad a los materiales de la mezcla.	53
Figura 21. Preparación de los moldes antes de la elaboración de la mezcla.	54



Figura 22. Elaboración de la mezcla de concreto.....	55
Figura 23. Elaboración de la prueba de revenimiento.	56
Figura 24. Elaboración de la prueba de temperatura.	57
Figura 25. Obtención de los especímenes de concreto.....	58
Figura 26. Obtención de los especímenes de concreto.....	59
Figura 27. Curado de especímenes.	60
Figura 28. Cabeceo de los especímenes de concreto.....	61
Figura 29. Ensaye a la compresión de especímenes de concreto.	62
Figura 30. Curva granulométrica de la arena.	68
Figura 31. Proporciones de material, en masa, utilizados en cada tipo de muestra.....	75
Figura 32. Proporciones de material, en volumen, utilizados en cada tipo de muestra .	75
Figura 33. Resistencias alcanzadas de los especímenes, por muestra	76

RESUMEN

Ante el inminente desarrollo de la industria automotriz, el consumo de neumáticos en los países desarrollados y subdesarrollados es elevado y va en aumento. Aunque los neumáticos usados no generan ningún peligro inmediato, su eliminación de manera inapropiada o su producción en grandes cantidades puede contaminar gravemente el medio ambiente u ocasionar problemas a la hora de eliminarlos, dado que por su diseño son técnicamente indestructibles con el paso de los años; por esto, las opciones de eliminación más comunes para este residuo después de su vida útil son la eliminación en vertederos y la quema, que son opciones poco recomendables: la primera genera acumulación de humedad y proliferación de vectores transmisores de enfermedades, y la segunda genera contaminantes que, al ser inhalados, son tóxicos para los seres vivos. Sin embargo, el reciclaje de llantas de desecho es una opción viable para la sustentabilidad.

Esta investigación compara la resistencia a la compresión de concreto para fines estructurales en el cual se sustituye una parte proporcional del volumen del agregado fino (arena) por partículas de caucho de llantas recicladas de dos granulometrías distintas usadas por separado y mezcladas entre sí, respecto a una mezcla a una resistencia específica de 300 kg/cm^2 diseñada a partir de la norma ACI 211.1 que sirve como muestra testigo. La metodología consiste, para la resistencia a la compresión, en la elaboración de un total de 70 especímenes de ensayo cilíndricos, siete por cada tipo de muestra. Entre los tipos de muestra se considera el testigo y nueve muestras experimentales, variando los tamaños de grano de caucho y los porcentajes de sustitución: los tamaños de grano de 6 mm y de 2 mm, usados por separado y mezclados entre sí, en sustituciones del 5%, del 10% y del 20% en volumen del agregado fino. De los siete especímenes, dos se ensayan a los siete días de la elaboración de la mezcla, dos más a los 14 días y los tres últimos a los 28 días. El análisis de los resultados se expresa a través de un análisis de varianza (ANOVA) para cada tipo de muestra respecto al testigo, de las resistencias a la compresión obtenidas a los 7, 14 y 28 días.

La finalidad del trabajo es identificar cuál o cuáles tipos de mezcla pueden ser utilizados para fines estructurales de acuerdo a lo establecido en las normas mexicanas, dando un valor agregado a los neumáticos desechados y disminuyendo el impacto ambiental, colaborando con el medio ambiente.



INTRODUCCIÓN

El consumo de neumáticos en los países desarrollados y subdesarrollados es elevado y va en aumento. Los propietarios y usuarios de vehículos, por el hecho de circular en los mismos, somos responsables del desgaste de los neumáticos que acaban quedando fuera de uso y convirtiéndose en residuo (Royano, Valls, Barra, & Vázquez, 2011). Tan sólo en México, se generan aproximadamente al año 1 011 033 toneladas de residuos de llantas y se calcula que pueden existir entre 6 y 24 millones de llantas en la región fronteriza que se encuentran en situación fuera de control (Gutiérrez Avedoy, Ramírez Hernández, Encarnación Aguilar, & Medina Arévalo, 2012).

En principio, los neumáticos usados no generan ningún peligro inmediato, pero su eliminación de manera inapropiada o su producción en grandes cantidades, puede contaminar gravemente el medio ambiente u ocasionar problemas a la hora de eliminarlos. Así pues, los neumáticos han sido diseñados para resistir condiciones mecánicas y meteorológicas duras (pues son resistentes al ozono, la luz y las bacterias) lo que los hace técnicamente indestructibles con el paso de los años. Su almacenamiento en el vertedero no permite recuperar ni energía ni materia de ellos (Cano Serrano, Cerezo García, & Urbina Fraile, 2006).

Una opción de eliminación poco viable para estos residuos es mediante su quema; además, este proceso es muy peligroso. Tan solo una persona que se encuentra cerca de una zona donde se realiza quema de llantas durante 1 hora aspira en ese período el equivalente a la contaminación del aire normal de una ciudad correspondiente a 100 días, exponiéndose a la inhalación de niveles muy peligrosos y elevados de sustancias irritantes, alergénicas y cancerígenas (Luján, 2001).

En este trabajo de tesis, como proyecto de investigación, se buscará comparar las características estructurales que presentan los elementos elaborados con un concreto tradicional y con un concreto ecológico que contenga un porcentaje definido de partículas de caucho como agregado, evaluando sus resistencias y esfuerzos sobre las condiciones de carga de acuerdo a lo establecido en las normas mexicanas.



Existen algunos antecedentes de trabajo con concretos adicionados con partículas de caucho, en los cuales se estudian sus diversas propiedades y el comportamiento que tienen bajo circunstancias específicas comparándolo frente al concreto convencional, que sirven de sustento para el desarrollo y análisis del concreto sustentable elaborado en esta tesis.

En la investigación de López, Díaz, López y Méndez, en el 2014, utilizaron neumáticos desechados, triturándolos previamente por un patrocinador del proyecto, implementándolo como agregado fino en mezclas de concreto, donde lograron alcanzar resistencias de 250 kg/cm², misma resistencia que el concreto estructural normal que rigen las normas NMX-C-083-ONNCCE-2002, NMX-C-109-ONNCCE-2013, con porcentajes del 20% de caucho en el agregado fino, lo que les permitió afirmar que se pudieron lograr los objetivos de su investigación, esperando aumentar este porcentaje y poder contribuir reduciendo la contaminación del medio ambiente obteniendo como ventajas adicionales un peso menor en las estructuras y por ende menores costos.

En un estudio realizado por Marques, Correia y de Brito, en el año de 2013, se investigó los efectos de las temperaturas elevadas en el rendimiento mecánico residual del concreto producido con granulados de caucho reciclado (en la investigación es llamado RRA). Se prepararon cuatro composiciones de concreto diferentes: un concreto de referencia (RC) hecho con agregado grueso natural y tres mezclas de concreto con las tasas de sustitución de 5%, 10% y 15% de los agregados grueso y fino por RRA a partir de neumáticos usados. Las muestras fueron expuestas durante un período de 1 hora a temperaturas de 400 °C, 600 °C y 800 °C, después de ser calentada de acuerdo con la curva tiempo-temperatura de la norma ISO 834. Después de enfriar a temperatura ambiente, la resistencia a la compresión y la resistencia a la tracción indirecta se evaluaron y se compararon con valores de referencia obtenidos antes de la exposición al fuego. Para las tasas de reemplazo utilizados en los experimentos, los resultados obtenidos mostraron que el concreto hecho con granulados de caucho reciclado (abreviado CRRA) presentó una respuesta térmica que fue aproximadamente similar a la de RC; además, aunque las propiedades mecánicas residuales de CRRA fueron



notablemente más afectados que los de RC, en particular para las temperaturas de exposición más altas, la reducción relativa no evita que sea utilizado en aplicaciones estructurales.

En el 2014, Gupta, Chaudhary y Sharma utilizaron residuos de neumáticos de caucho como sustituto parcial del agregado fino en forma de ceniza de goma y la ceniza de goma con fibras de caucho (forma combinada) con tres relaciones agua/cemento. Se analizaron la trabajabilidad, la resistencia a la compresión, la resistencia a la flexión, la densidad, la absorción de agua, la resistencia a la abrasión, la profundidad de carbonatación, el módulo estático de elasticidad, el módulo dinámico de elasticidad y la penetración de iones cloruro en concreto con partículas de caucho y concreto modificado (ceniza de caucho 10% y variada porcentaje de fibras de goma). Se demostró que la resistencia a la flexión del concreto con partículas de caucho disminuye con el aumento de porcentaje de partículas de goma mientras que resistencia a la flexión del concreto modificado se incrementa con el aumento del porcentaje de contenido de fibras de goma. La resistencia a la abrasión, la profundidad de carbonatación, módulo de elasticidad y cloruro de penetración de los iones de la ceniza de caucho de concreto y concreto modificado también se vieron afectados por la adición de fibras de ceniza de goma y caucho en el concreto.

En otro estudio, se investigaron los comportamientos de compresión y de flexión de un nuevo tipo de material de concreto, miga de caucho y de acero reforzado con fibra de reciclado de concreto con agregados (RSRAC). Para popularizar la aplicación de este nuevo tipo de material de construcción verde, se llevó a cabo un estudio experimental para investigar el efecto del contenido de goma en los comportamientos de compresión y flexión de RSRAC. Un total de 18 cubos (150 mm) y 18 cilindros (150 mm x 200 mm) se probaron bajo carga de compresión axial, y 18 prismas de 150 x 150 x 550 mm fueron probados siendo sometidos a flexión de tres puntos. El contenido de caucho de la miga se varió en la investigación a niveles de 0%, 4%, 8%, 12% y 16% por sustitución en volumen de arena. Agregado reciclado de concreto (RCA) se introdujo en la mezcla de concreto por sustitución al 100% en volumen de agregado grueso natural



(NCA), y 1% de la cantidad volumétrica de fibra de acero se añadió a la mezcla de concreto. Se analizó el efecto del contenido de caucho en la compresión y resistencia a la flexión, el modo de fallo, el módulo de elasticidad y la dureza de RSRAC. Los resultados indican que el RSRAC con un óptimo contenido de caucho muestra un buen comportamiento a la compresión en comparación con el concreto normal NCA. RSRAC también es una alternativa más ecológica al concreto de caucho normal para su uso en los miembros de flexión de estructuras de concreto (Jian-he, Yong-chang, Li-sha, & Zhi-hong, 2014) .

Por su parte, Lijuan, Shenghua y Lan, en el 2014 realizaron pruebas de compresión uniaxial para un concreto con bajo volumen de caucho de neumáticos (RC) con diferentes niveles de contenido de volumen de caucho y tamaños de partículas (cinco de cada uno). Se investigó la influencia del contenido de caucho y tamaño de partícula sobre las propiedades mecánicas de RC, incluyendo la fuerza axial de compresión, módulo de elasticidad, la tensión máxima, deformación última, la aparición de grietas visibles y el patrón de falla de especímenes. Se realizó el análisis mecánico de los resultados de prueba basados en curvas esfuerzo-deformación de la compresión uniaxial. Se establecieron modelos constitutivos de compresión uniaxial de concretos de bajo volumen de caucho que incluía la fuerza axial de compresión, la tensión máxima y los parámetros constitutivos a y b . No había regularidad obvia entre los parámetros constitutivos a y b , el contenido de caucho y el tamaño de partículas de caucho. Además, se dan los significados físicos de los parámetros constitutivos a y b , y los modelos constitutivos establecidos fueron evaluados mediante pruebas. Los resultados de la prueba demostraron que los modelos constitutivos no sólo tienen buena capacidad de predicción y de alta precisión, pero también es de buena aplicabilidad dentro del límite de contenido de caucho de 50 kg/m^3 . Los modelos constitutivos fueron mejorados mediante la introducción del factor de reducción de la tasa de arena k para reflejar la influencia de aditivos de caucho. Los modelos constitutivos mejorados son capaces de predecir el rendimiento de concreto con bajas cantidades de caucho.



En los últimos veinte años, se han hecho muchos intentos de utilizar el caucho reciclado de los neumáticos fuera de uso como un sustituto del agregado en el concreto. Junto con otros agregados sustentables, como el concreto reciclado y el vidrio reciclado, el reciclaje de llantas de desecho se ha convertido en un opción viable para la construcción sustentable (Su, Yang, Ling, Ghataora, & Dirar, 2014).

En México, una forma masiva de contrarrestar la problemática de los neumáticos desechados fue por medio del “Llancreto”, un concreto con partículas de caucho reciclado, desarrollada por la empresa cementera CEMEX lanzándola al mercado a finales del año 2004. Es completamente funcional, pero su uso ha sido muy limitado hasta el momento, utilizándose únicamente en calles y avenidas de tránsito ligero.

Utilizar las partículas de neumáticos como agregado fino en concretos estructurales, sería un avance en la investigación de concretos sustentables, ya que, por sus características, el uso del caucho reciclado en la mezcla no ha permitido alcanzar las resistencias mínimas que exigen las normas. Adicionalmente, de la elaboración de este concreto se obtendrían los siguientes beneficios en las comunidades: La reducción de focos de infección en lugares de almacenamiento de llantas, la aportación a la reducción de emisiones de carbono por la quema de llantas, la liberación de áreas de almacenaje nocivas e insalubres dedicadas a las llantas y la factibilidad de utilizar las llantas en concretos dando un beneficio a la comunidad.



Objetivo general

Evaluar un concreto estructural con partículas de caucho proveniente de los neumáticos fuera de uso a nivel experimental, que cumpla con las normas de calidad y de seguridad estructural requeridas.

Objetivos específicos

- Diseñar y elaborar los especímenes de prueba para ensaye de resistencia y el testigo en cantidad que requieren las normas.
- Ensayar los especímenes de prueba de acuerdo con las normas que rigen las pruebas de laboratorio.
- Analizar estadísticamente los resultados de resistencia a la compresión, a través de un análisis de varianza (ANOVA).



CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO

1.1. El concreto

1.1.1. Generalidades del concreto

El concreto es básicamente una mezcla de dos componentes: agregados y pasta. La pasta, compuesta de cemento portland y agua, une a los agregados, normalmente arena y grava, creando una masa similar a una roca. Esto ocurre por el endurecimiento de la pasta en consecuencia de la reacción química del cemento con el agua. Otros materiales cementantes y adiciones minerales se pueden incluir en la pasta.

Generalmente los agregados se dividen en dos grupos: finos y gruesos. Los agregados finos pueden ser arena natural o artificial (manufacturadas) con partículas de hasta 9.5 mm (3/8 in); agregados gruesos son aquellas partículas retenidas en la malla 1.18 mm (tamiz no.16) y pueden llegar hasta 150 mm (6 in). El tamaño máximo del agregado grueso comúnmente empleado es de 19 mm o 25 mm (3/4 in o 1 in). Un agregado de tamaño intermedio, cerca de 9.5 mm (3/8 in) es, algunas veces, adicionado para mejorar la granulometría general del agregado.

La pasta se compone de materiales cementantes, agua y aire atrapado o aire incluido (intencionalmente incorporado). La pasta constituye aproximadamente del 25% hasta 40% del volumen total del concreto. El volumen absoluto del cemento está normalmente entre 7% y 15% mientras que el volumen del agua está entre 14% y 21%. El contenido de aire atrapado varía del 4% hasta 8% del volumen.

Como los agregados constituyen aproximadamente del 60% al 75% del volumen total del concreto, su selección es muy importante. Los agregados deben componerse de partículas con resistencia mecánica adecuada y con resistencia a las condiciones de exposición y no deben contener materiales que puedan causar deterioro del concreto. La granulometría continua de tamaños de partículas es deseable para el uso eficiente de la pasta (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).



1.1.1.1. Composición del concreto

1.1.1.1.1. Cemento portland

Se fabrican diferentes tipos de cemento portland para satisfacer a varios requisitos físicos y químicos para aplicaciones específicas. La ASTM C 150, Especificaciones de Norma para el Cemento Portland (*Standard Specification for Portland Cement*), designa ocho tipos de cementos, usando los números romanos, (Tabla 1).

Tabla 1. Tipos de cemento portland

Tipo I	Normal
Tipo IA	Normal con aire incluido
Tipo II	Moderada resistencia a los sulfatos
Tipo IIA	Moderada resistencia a los sulfatos con aire incluido
Tipo III	Alta resistencia inicial (alta resistencia temprana)
Tipo IIIA	Alta resistencia inicial con aire incluido
Tipo IV	Bajo calor de hidratación
Tipo V	Alta resistencia a los sulfatos

Fuente: Norma ASTM C 150

La AASHTO M 85, Especificaciones para el Cemento Portland (*Specification for Portland Cement*), también usa cinco designaciones para el cemento portland del I al V. Los requisitos de la M 85 son casi idénticos a los de la ASTM C 150. Las especificaciones de la AASHTO se usan por algunos departamentos de transporte estatales en lugar de las normas ASTM (Kosmatka et al., 2004)

1.1.1.1.2. Agregados del concreto

La importancia del uso del tipo y calidad adecuada del agregado no se puede subestimar. Los agregados finos y gruesos ocupan cerca del 60% al 75% del volumen del concreto (70% a 85% de la masa) e influyen fuertemente en las propiedades tanto en estado fresco como endurecido, en las proporciones de la mezcla y en la economía del concreto.

Los agregados finos generalmente consisten en arena natural o piedra triturada (partida, machacada, pedrejón arena de trituración) con la mayoría de sus partículas

menores que 5 mm (0.2 in). Los agregados gruesos consisten en una o en la combinación de gravas o piedras trituradas con partículas predominantemente mayores que 5 mm (0.2 in) y generalmente entre 9.5 mm y 37.5 mm (3/8 y 1 1/2 in). Algunos depósitos naturales de agregado, llamados de gravas de mina, consisten en grava y arena que se pueden usar inmediatamente en el concreto, después de un procesamiento mínimo. La grava y la arena naturales normalmente se excavan o dragan de la mina, del río, del lago o del lecho marino. La piedra triturada se produce triturando la roca de cantera, roca redondeada, guijarros o gravas grandes. La escoria de alto horno enfriada al aire y triturada también se usa como agregados fino y grueso.

Los agregados frecuentemente se lavan y se gradúan en la mina o en la planta. Se puede esperar alguna variación en el tipo, calidad, limpieza, granulometría (gradación), contenido de humedad y otras propiedades. Cerca de la mitad de los agregados gruesos en el concreto de cemento portland en Norteamérica es grava, la mayoría del resto es piedra triturada (Kosmatka et al., 2004).

1.1.1.1.3. Agua de mezcla para concreto

Prácticamente cualquier agua natural que sea potable y no presente fuerte sabor u olor se la puede usar como agua de mezcla (de mezclado, de amasado) para la preparación del concreto. Sin embargo, también se pueden emplear en concreto algunas aguas que no se consideran potables. En tales casos, el concreto elaborado con este tipo de agua se considera aceptable si alcanza resistencias del 90% a las que se obtiene usando agua potable.

El exceso de impurezas en el agua de mezcla no sólo puede afectar el tiempo de fraguado y las resistencia del concreto, sino también puede causar eflorescencias, manchado, corrosión del refuerzo, inestabilidad del volumen y reducción de la durabilidad. Por lo tanto, se pueden establecer ciertos límites opcionales para cloruros, sulfatos, álcalis y sólidos en el agua de mezcla o se pueden realizar ensayos adecuados para la determinación del efecto de las impurezas sobre varias propiedades. Algunas impurezas pueden tener un pequeño efecto sobre la resistencia y el tiempo de fraguado y aun afectar la durabilidad y otras propiedades.



Se puede utilizar satisfactoriamente el agua para la preparación del concreto con menos de 2000 partes por millón (ppm) de sólidos disueltos. El agua que contiene más de 2000 ppm de sólidos disueltos se debe analizar para verificar su efecto sobre la resistencia y el tiempo de fraguado. Más información sobre el efecto de las impurezas del agua de mezcla se encuentra en Steinour (1960) y Abrams (1924), donde se discuten más de 100 tipos diferentes de compuestos e iones (Kosmatka et al., 2004).

1.1.1.2. Ventajas del concreto frente a otros materiales

Frente a otros materiales como el acero, la madera, etc., el concreto presenta las siguientes ventajas:

1. Es durable a lo largo del tiempo y no requiere de una gran inversión para su mantenimiento. Tiene una vida útil extensa.
2. Tiene gran resistencia a la compresión en comparación con otros materiales.
3. Es resistente al efecto del agua.
4. En fuegos de intensidad media, el concreto armado sufre daños superficiales si se provee un adecuado recubrimiento al acero. Es más resistente al fuego que la madera y el acero estructural.
5. Se le puede dar la forma que uno desee haciendo uso del encofrado adecuado.
6. Le confiere un carácter monolítico a sus estructuras lo que les permite resistir más eficientemente las cargas laterales de viento o sismo.
7. No requiere mano de obra muy calificada.
8. Su gran rigidez y masa evitan problemas de vibraciones en las estructuras erigidas con él.
9. En la mayoría de lugares, es el material más económico.
10. Por su gran peso propio, la influencia de las variaciones de cargas móviles es menor (Harmsen, 2005).

1.1.1.3. Resistencia a la compresión

La resistencia (compresión o flexión) es el indicador de la calidad del concreto más universalmente utilizado. A pesar de ser una característica importante, otras propiedades, tales como durabilidad, permeabilidad y resistencia al desgaste se reconocen hoy en día como de igual importancia o, en algunos casos, de mayor importancia, especialmente cuando se considera la vida útil de la estructura.

Dentro del rango normal de resistencias usadas en la construcción de concreto, la resistencia es inversamente proporcional a la relación agua-cemento o agua-material cementante. Para concretos totalmente compactados, producidos con agregados limpios y sanos, la resistencia y otras propiedades requeridas del concreto, bajo las condiciones de obra, se gobiernan por la cantidad del agua de mezcla usada por unidad de cemento o material cementante.

La resistencia de la pasta cementante en el concreto depende de la calidad y de la cantidad de componentes reactivos en la pasta y de su grado de hidratación. El concreto se vuelve más resistente con el tiempo, siempre que la temperatura y la humedad disponibles sean adecuadas. Por lo tanto, la resistencia en cualquier edad es función tanto de la relación agua-material cementante original y del grado de hidratación del material cementante. La importancia del curado temprano y minucioso se reconoce fácilmente.

La diferencia en la resistencia del concreto para una relación agua-cemento dada, puede resultar de: (1) cambios del tamaño, granulometría, textura superficial, forma, resistencia y rigidez del agregado, (2) diferencias en los tipos y fuentes de material cementante, (3) contenido de aire incluido (incorporado), (4) la presencia de aditivos y (5) duración del curado (Kosmatka et al., 2004).

1.1.1.4. Masa volumétrica

El concreto convencional, normalmente usado en pavimentos, edificios y otras estructuras, tiene masa volumétrica (masa unitaria, densidad) que varía de 2200 hasta 2400 kg/m³ (137 hasta 150 lb/ft³). La masa volumétrica del concreto varía dependiendo



de la cantidad y la densidad del agregado, la cantidad de aire atrapado o intencionalmente incluido y las cantidades de agua y cemento. Por otro lado, el tamaño máximo del agregado influye en las cantidades de agua y cemento. Al reducirse la cantidad de pasta (aumentándose la cantidad de agregado), se aumenta la masa volumétrica. En el diseño del concreto armado, la masa volumétrica de la combinación del concreto con el refuerzo normalmente se considera 2400 kg/m^3 (150 lb/ft^3).

El peso del concreto seco es igual al peso de los ingredientes del concreto fresco menos el peso del agua de mezclado evaporable. Parte del agua de la mezcla combina químicamente con el cemento durante el proceso de hidratación, transformando el cemento en un gel de cemento. Además, parte del agua permanece fuertemente retenida en los poros y en los capilares y no se evapora bajo las condiciones normales. La cantidad del agua de mezclado que se evaporará del concreto expuesto en un medio ambiente con humedad relativa del 50% es cerca del 0.5% al 3% del peso del concreto; la cantidad real depende del contenido inicial de agua, de las características de absorción de los agregados y del tamaño y forma de los miembros del concreto.

1.1.2. Diseño de resistencia

El proceso de determinación de las características requeridas del concreto y que se pueden especificar se llama diseño de mezcla. Las características pueden incluir: propiedades del concreto fresco, propiedades mecánicas del concreto endurecido y la inclusión, exclusión o límites de ingredientes específicos. El diseño de la mezcla lleva al desarrollo de la especificación del concreto.

El proporcionamiento de la mezcla se refiere al proceso de determinación de las cantidades de los ingredientes del concreto, usando materiales locales, para que se logren las características especificadas. Un concreto adecuadamente proporcionado debe presentar las siguientes cualidades:

- Trabajabilidad aceptable del concreto fresco
- Durabilidad, resistencia y apariencia uniforme del concreto endurecido
- Economía



1.1.2.1. Relación agua-cemento

La relación agua-material cementante es simplemente la masa del agua dividida por la masa del material cementante (cemento portland, cemento adicionado, ceniza volante, escoria, humo de sílice y puzolanas naturales). La relación agua-material cementante elegida para un diseño de mezcla debe ser el menor valor necesario para resistir a las condiciones de exposición anticipadas.

Cuando la durabilidad no es el factor que gobierne, la elección de la relación agua-material cementante se debe basar en los requisitos de resistencia a compresión. En estos casos, la relación agua-material cementante y las proporciones de la mezcla para la resistencia requerida se deben basar en datos de campo adecuados o en mezclas de prueba que empleen los materiales de la obra, a fin de que se determine la relación entre la resistencia y la relación agua-material cementante.

En el diseño de mezclas, la relación agua-material cementante, A/MC , se usa frecuentemente como sinónimo de la relación agua-cemento (A/C). Sin embargo, algunas especificaciones diferencian las dos relaciones. Tradicionalmente, la relación agua-cemento se refiere a la relación agua-cemento portland o agua-cemento adicionado (Kosmatka et al., 2004).

1.1.2.2. Tamaño de agregados

Dos características de los agregados tienen una influencia importante en el proporcionamiento de las mezclas de concreto porque afectan la trabajabilidad del concreto fresco:

- Granulometría (tamaño y distribución de las partículas)
- Naturaleza de las partículas (forma, porosidad, textura superficial)

La granulometría es importante para que se logre una mezcla económica, pues afecta la cantidad de concreto que se puede producir para una dada cantidad de material cementante y agua. Los agregados gruesos deben tener el mayor tamaño máximo posible para las condiciones de la obra. El tamaño máximo que se puede usar depende



de factores tales como la forma del elemento de concreto que se va a fundir, la cantidad y la distribución del acero de refuerzo (armadura) en el elemento y el espesor de la losa.

La granulometría también influye en la trabajabilidad y la facilidad de colocación del concreto. Algunas veces, hay carencia del agregado de tamaño mediano, cerca de 9.5 mm, en el suministro de agregado. Esto puede resultar en un concreto con alta contracción, demanda elevada de agua y baja trabajabilidad. Su durabilidad también se puede afectar.

El tamaño máximo del agregado grueso no debe exceder un quinto de la menor dimensión entre los lados de las cimbras, ni tampoco, tres cuartos la distancia libre entre las varillas o cables de refuerzo individual, paquetes de varillas o tendones o ductos de presfuerzo. También es una buena práctica limitar el tamaño del agregado para que no supere tres cuartos del espacio libre entre el refuerzo y la cimbra. En losas sobre el terreno sin refuerzo, el tamaño máximo del agregado no debería exceder un tercio del espesor de la losa. Se pueden usar tamaños menores cuando la disponibilidad o alguna consideración económica lo requieran.

La cantidad de agua de mezcla necesaria para producir un volumen unitario de concreto, para un dado revenimiento, depende de la forma, del tamaño máximo y de la cantidad de agregado grueso. Los tamaños mayores minimizan los requisitos de agua y, por lo tanto, permiten la disminución del contenido de cemento. Un agregado redondeado requiere menos agua de mezcla que un agregado triturado, en concretos con el mismo revenimiento.

El tamaño máximo del agregado grueso que producirá el concreto con la mayor resistencia, para un dado contenido de cemento, depende de la fuente del agregado, bien como de su forma y granulometría. En el concreto de alta resistencia (mayor que 700 kg/cm² o 70 MPa), el tamaño máximo es cerca de 19 mm (3/4 in). Las resistencias más elevadas también se pueden lograr con el empleo de piedra triturada en vez de grava redondeada.

La granulometría más deseada para el agregado fino dependerá del tipo de obra, del contenido de pasta de la mezcla y del tamaño máximo del agregado grueso. En



mezclas más pobres, se desea una granulometría fina (módulo de finura más bajo) para lograr una buena trabajabilidad. En mezclas más ricas, se usa una granulometría más gruesa.

Para concretos menos trabajables, tales como los necesarios en la construcción de pavimentos, el volumen de agregado se puede aumentar en cerca de 10%. Para concretos más trabajables, tales como los necesarios para el bombeo, el volumen se puede reducir en hasta 10% (Kosmatka et al., 2004).

1.1.2.3. Trabajabilidad (Revenimiento)

Siempre se debe producir el concreto para que tenga trabajabilidad, consistencia y plasticidad adecuadas con las condiciones de la obra. La trabajabilidad es la medida de la facilidad o de la dificultad de colocación, consolidación y acabado del concreto. La consistencia es la capacidad del concreto de fluir. Plasticidad es la facilidad de moldeado del concreto. Si se usa más agregado en el concreto o si se adiciona menos agua, la mezcla se vuelve más rígida (menos plástica y menos trabajable) y difícil de moldearse. Ni las mezclas muy secas y desmoronables, ni las muy aguadas y fluidas se pueden considerar plásticas.

El ensayo de revenimiento se usa para medir la consistencia del concreto. Para una dada proporción de cemento y agregado, sin aditivos, cuanto mayor el revenimiento, más húmeda es la mezcla. El revenimiento es un indicador de trabajabilidad cuando se evalúan mezclas similares. Sin embargo, no se lo debe utilizar para comparar mezclas de proporciones totalmente diferentes. Si se lo usa en diferentes revolturas del mismo diseño de mezcla, un cambio en el revenimiento indica un cambio en la consistencia y en las características de los materiales, de las proporciones de la mezcla, del contenido de agua, del mezclado, del tiempo del ensayo o de la propia prueba (Kosmatka et al., 2004).

1.1.3. Normas de calidad

La elaboración del concreto requiere que sus materiales y procesos tengan un adecuado control de calidad para asegurar que el concreto producido cumple con los



requerimientos de seguridad y funcionalidad para los cuales es diseñado; es por ello que existen normas que establecen los parámetros necesarios para lograr que el concreto sea de alta calidad. Existen normas de calidad del concreto en distintas regiones del mundo pero las más sobresalientes son las emitidas por el American Concrete Institute (ACI), por el American Society for Testing Materials (ASTM) y por el American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). En México, la institución encargada de emitir las normas de calidad de concreto es el Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE).

1.1.3.1. Normas Internacionales

1.1.3.1.1. Normas ACI

ACI Committe 211, *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight and Mass Concrete* (*Prácticas Estándares de las Proporciones de los concretos Normal, Pesado y Masivo*), ACI211.1-91, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 1991.

1.1.3.1.2. Normas ASTM

C 29-97. *Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate* *Método de ensayo para determinar el peso volumétrico (Densidad suelta, Peso Unitario, Masa Unitaria) y vacíos en el agregado.*

C 31-00 *Standard Practice for Making and Curing Concrete Tests Especimens in the Field. Práctica normalizada para producción y curado de especímenes de ensayo de concreto en el campo.*

C 39-01 *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Especimens. Método de ensayo para determinar la resistencia a compresión de cilindros de concreto.*

C 127-01 *Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate. Método de ensayo para determinar la densidad, densidad relativa (Gravedad específica) y la absorción de los agregados gruesos.*



C 128-01 *Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate. Método de ensayo para determinar la densidad, densidad relativa (Gravedad específica) y la absorción de los agregados finos.*

C 136-01 *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. Método de ensayo para el análisis granulométrico de los agregados finos y gruesos.*

C 143-00 *Standard Test Method for Slump of Hydraulic Cement Concrete. Método de ensayo para determinar el revenimiento (asentamiento) del concreto de cemento portland.*

C 172-99 *Standard Practice for Sampling Freshly Mixed Concrete. Practica normalizada para el muestreo del concreto fresco.*

C 192-00 *Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory. Practica normalizada para la producción y el curado de especímenes de concreto en laboratorio.*

C 470-98 *Standard Specifications for Molds for Forming Concrete Test Cylinders Vertically. Especificación de norma para moldes para el moldeo vertical de cilindros de concreto.*

C 617-98 *Standard Practice for Capping Cylindrical Concrete Specimens. Practica normalizada para el cabeceo de cilindros de concreto.*

C 873-99 *Standard Test Method for Compressive Strength of Concrete Cylinders Cast in Place in Cylindrical Molds. Método de ensayo para determinar la resistencia a la compresión de cilindros de concreto colados en el sitio en moldes cilíndricos.*

C 1064-99 *Standard Test Method for Temperature Freshly Mixed Portland Cement Concrete. Método de ensayo para determinar la temperatura del concreto de cemento portland fresco.*

D 75-97 *Standard Practice for Sampling Aggregates. Practica de norma para el muestreo de agregados.*



1.1.3.1.3. Normas AASHTO

M 6-93 (1997) *Fine Aggregate for Portland Cement Concrete. Agregado fino para concreto de cemento portland.*

M 80-87 (1999) *Coarse Aggregate for Portland Cement Concrete. Agregado grueso para concreto de cemento portland.*

M 205-97 *Molds for Forming Concrete Test Cylinders Vertically. Moldes para el moldeado vertical de cilindros de concreto.*

T 2-91 *Sampling Aggregates. Muestreo para agregados.*

T 19-00 *Bulk Density ("Unit Weight") and Voits in Aggregate. Peso volumétrico (Densidad suelta, Masa Unitaria) y vacíos en los agregados.*

T 22-97 *Compressive Strength of Cylindrical Specimens of Concrete. Resistencia a la compresión de cilindros de concreto.*

T 23-97 *Making a Curing Concrete Test Specimens. Producción y curado de especímenes de concreto para ensayo.*

T 26-79 (1996) *Quality of Water to be Used in Concrete. Calidad del agua para uso en concreto.*

T 27-99 *Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. Análisis granulométrico de los agregados finos y gruesos.*

T 84-00 *Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate. Gravedad específica y absorción del agregado fino.*

T 85-91 (1996) *Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate. Gravedad específica y absorción del agregado grueso.*

T 119-99 *Slump of Hydraulic Cement Concrete. Revenimiento del concreto de cemento hidráulico.*

T 126-97 *Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory. Producción y curado de especímenes de concreto en el laboratorio.*



T 231-97 *Capping Cylindrical Concrete Specimens. Cabeceo de especímenes cilíndricos de concreto.*

T 248-96 *Reducing Samples of Aggregates to Testing Size. Reducción de muestras de agregados para el tamaño de ensayo.*

T 309-99 *Temperature of Freshly Mixed Portland Cement Concrete. Temperatura del concreto de cemento portland.*

1.1.3.2. Normas Mexicanas

Las siguientes normas mexicanas, que son jurisdicción del Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE), son aplicables a la elaboración de concreto, y cada una se describe a continuación:

- NMX-C-030-2004-ONNCCE: INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCION – AGREGADOS – MUESTREO. Se establece el muestreo de agregados que se utilizan para la investigación preliminar de fuentes potenciales de suministro; el control de los agregados en la fuente de abastecimiento; el control de las operaciones en el sitio de uso y la aceptación o rechazo de los agregados.
- NMX-C-073-ONNCCE-2004: INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCION – AGREGADOS – MASA – VOLUMETRICA – METODO DE PRUEBA. Esta Norma Mexicana establece el método de prueba para la determinación de la masa volumétrica de los agregados finos y gruesos o de una combinación de ambos y es aplicable a agregado cuyo tamaño máximo nominal no excedan de 150 mm.
- NMX-C-077-1997-ONNCCE: INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCION - AGREGADOS PARA CONCRETO - ANALISIS GRANULOMETRICO - METODO DE PRUEBA. Esta Norma señala el método para el análisis granulométrico de agregados finos y gruesos con el fin de determinar la distribución de las partículas de diferentes tamaños a través de las cribas. Obteniendo el porcentaje total del material que pasa por cada criba, el porcentaje del material retenido acumulado en cada criba y el porcentaje del material retenido entre dos cribas consecutivas.



- NMX-C-083-ONNCCE-2014: INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN -CONCRETO - DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE ESPECÍMENES - MÉTODO DE ENSAYO. Esta Norma Mexicana establece los métodos de prueba para la determinación de la resistencia a la compresión del concreto, en especímenes cilíndricos moldeados y corazones de concreto con masa volumétrica mayor 900 kg/m^3 .
- NMX-C-109-ONNCCE-2013: INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN – CONCRETO HIDRÁULICO – CABECEO DE ESPECÍMENES. Esta Norma indica que la base de los especímenes o caras de aplicación de carga no deben apartar de la perpendicular al eje más de 0.5° , y no se permiten irregularidades respecto de un plano que exceda de 0.05 mm , en caso contrario deben ser cabeceadas.
- NMX-C-122-ONNCCE-2004: INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCION - AGUA PARA CONCRETO – ESPECIFICACIONES. Esta Norma establece los requisitos para las aguas naturales o contaminantes, diferentes de las potables que se pretendan emplear en la elaboración o curado del concreto hidráulico. Asimismo, se da a conocer la acción agresiva de diferentes tipos de agua.
- NMX-C-156-ONNCCE-2010: INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCION - CONCRETO HIDRAULICO - DETERMINACION DEL REVENIMIENTO EN EL CONCRETO FRESCO. Esta Norma establece los procedimientos que ayudan a determinar la consistencia del concreto hidráulico en estado fresco mediante el método de ensayo conocido como revenimiento. Con este método se obtienen valores confiables de revenimiento en el intervalo de 2 a 20 cm ; es aplicable al concreto fresco industrializado o hecho en obra con tamaño máximo nominal del agregado menor a 50 mm .
- NMX-C-159-ONNCCE-2004: INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCION – CONCRETO – ELABORACION Y CURADO, EN EL LABORATORIO DE ESPECIMENES. Se establecen los procedimientos para elaborar y curar en el laboratorio, los especímenes de concreto utilizados para las pruebas de resistencia a la compresión, flexión y tensión diametral.

- NMX-C-160-ONNCCE-2004: INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCION – CONCRETO - ELABORACION Y CURADO EN OBRA DE ESPECIMENES DE CONCRETO. En esta Norma se establecen los procedimientos para elaborar y curar en obra, los especímenes de concreto utilizados para las pruebas de resistencia a la compresión, a la flexión y a la tensión diametral.
- NMX-C-159-ONNCCE-2004: INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCION – CONCRETO FRESCO – MUESTREO. Establece el método para obtener muestras representativas de concreto fresco, tal como se entrega en el sitio de la obra y con las cuales se realizan los ensayos para determinar el cumplimiento de los requisitos de la calidad convenidos.
- NMX-C-164-ONNCCE-2002: INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCION – AGREGADOS - DETERMINACION DE LA MASA ESPECIFICA Y ABSORCIÓN DE AGUA DEL AGREGADO GRUESO. Establece el método de prueba para la determinación de la masa específica y la absorción de agua del agregado grueso.
- NMX-C-165-ONNCCE-2004: INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCION – AGREGADOS - DETERMINACION DE LA MASA ESPECIFICA Y ABSORCIÓN DE AGUA DEL AGREGADO FINO – METODO DE PRUEBA. Establece el método de prueba para la determinación de la masa específica y la absorción del agregado fino en condición de saturado y superficialmente seco.
- NMX-C-170-ONNCCE-1997: INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCION – AGREGADOS - REDUCCION DE LAS MUESTRAS DE AGREGADOS OBTENIDAS EN EL CAMPO, AL TAMAÑO REQUERIDO PARA LAS PRUEBAS. Esta Norma establece los métodos para la reducción de las muestras de agregados obtenidas en el campo hasta el tamaño apropiado para prueba; empleando en cada caso una técnica para minimizar las variaciones en características medibles entre la muestra probada y la muestra de campo.
- NMX-C-219-ONNCCE-2005: INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCION – CONCRETO - RESISTENCIA A LA COMPRESION A EDADES TEMPRANAS Y PREDICCIÓN DE LA MISMA A EDADES POSTERIORES – METODOS DE PRUEBA. Esta Norma

Mexicana establece el procedimiento para la elaboración, curado y ensaye de especímenes cilíndricos de concreto, destinados a medir su madurez y relacionarla con el desarrollo de resistencia a la compresión, también establece el procedimiento para utilizar los resultados de la resistencia a la compresión a edad temprana, para predecir la resistencia potencial del concreto a edades posteriores.

- NMX-C-281-ONNCCE-2006: INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCION – CONCRETO - MOLDES PARA ELABORAR ESPECIMENES CILINDRICOS DE CONCRETO VERTICALMENTE PARA PRUEBAS. Establece las especificaciones que se deben cumplir los moldes para elaborar especímenes de concreto verticalmente para ser empleados en pruebas.
- NMX-C-435-ONNCCE-2010: INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCION – CONCRETO HIDRAULICO – DETERMINACION DE LA TEMPERATURA DEL CONCRETO FRESCO. En esta Norma se establece el método de ensayo para determinar la temperatura del concreto fresco, además, es aplicable para verificar el cumplimiento de un requisito específico de la temperatura del concreto hidráulico.

1.2. El Caucho y los neumáticos

1.2.1. Generalidades del caucho

El caucho se encuentra en la naturaleza como una dispersión coloidal que contiene aproximadamente el 40% de hidrocarburo en forma de partículas suspendidas en un medio acuoso; este es látex, o savia lechosa de las plantas a partir de la cual puede obtenerse el caucho, *Hevea Brasiliensis*, que se cultiva en grandes plantaciones, la mayor parte en Malaya y Nueva Guinea. El látex se recoge practicando una hendidura en la corteza del árbol y dejando gotear el látex que se recoge en una cazoleta. El látex recolectado se coloca en unos grandes recipientes divididos en compartimientos de una pulgada de ancho aproximadamente. El látex coagula por adición de ácido acético diluido, y las láminas de caucho coagulado, blandas, blancas, se separan del recipiente, se prensan, para eliminar el exceso de agua y se secan en hornos de humo. El caucho bruto final es una goma elástica, semitransparente, de color pardo claro, que se somete a un proceso de molienda (Geissman & Sánchez Bellido, 1973).



1.2.1.1. Composición y estructura

El caucho bruto en estado natural es un hidrocarburo blanco o incoloro.

El compuesto de caucho más simple es el isopreno o 2-metilbutadieno, cuya fórmula química es C_5H_8 (Castro, 2008).

Los dobles enlaces del caucho bruto pueden experimentar muchas de las reacciones típicas de los dobles enlaces olefínicos. El caucho es atacado fácilmente por el ozono, se hidrogena, y adiciona bromo y cloro; cuando se expone a la acción del oxígeno del aire, durante períodos largos de tiempo, y especialmente a temperaturas elevadas, se deteriora por oxidación. El caucho bruto está, por tanto, sometido a un deterioro gradual, haciéndose duro, quebradizo y perdiendo su elasticidad. Se ha encontrado de forma empírica, que las propiedades del caucho pueden mejorarse y preservarse, si se somete a un proceso de vulcanización. La vulcanización del caucho es un proceso complejo, objeto de una vasta tecnología. En esencia, consiste en la adición de un 3%, aproximadamente, de azufre al caucho bruto (desintegrado mecánicamente), seguida del calentamiento a unos $140^\circ C$ durante periodos cortos de tiempo. A la mezcla de vulcanización se añaden diversos aditivos (óxido de zinc, negro de carbón) y aceleradores (disulfuro de tetrametiltiouram, $Me_2NCSS-SCSNMe_2$), para mejorar la eficacia del proceso y obtener caucho de mayor calidad, o con propiedades especiales. La adición de cantidades mayor de azufre (20-25%), da lugar a la formación del caucho duro (Geissman & Sánchez Bellido, 1973).

1.2.1.2. Propiedades

Todos los tipos de caucho poseen diferentes propiedades, pero también todos con algo en común, una vez vulcanizados, pueden ser muy duraderos, por lo que necesitarían una gran cantidad de tiempo para degradarse.

La combinación se realiza de modo que los cauchos naturales proporcionen elasticidad y los sintéticos, estabilidad térmica. Esta combinación de efectos favorece la durabilidad y la capacidad de adaptarse a ciertas exigencias.



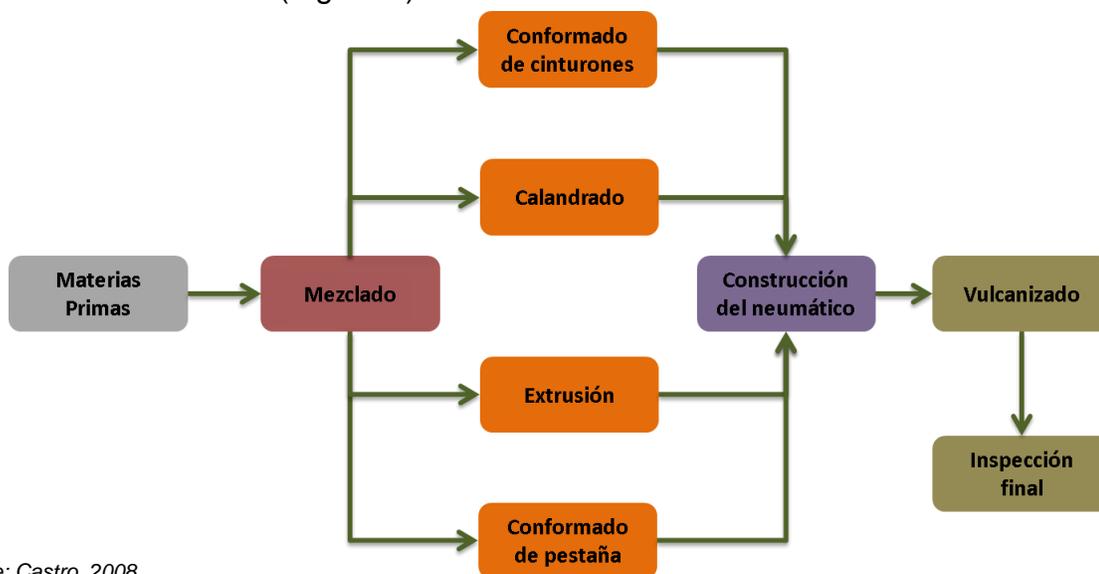
La estructura de los cauchos naturales está formada por cis-1,4 polisopreno mezclado con pequeñas cantidades de proteínas, lípidos y sales inorgánicas, entre otros. Se encuentra así un polímero de cadena larga y enredada en forma de espiral, de peso molecular medio, 5×10^5 g/mol, que a temperatura ambiente está en un estado de agitación continua. Este comportamiento general es debido en parte al impedimento estérico del grupo metilo y el átomo de hidrógeno, en el mismo lado del doble enlace carbono-carbono (Castro, 2008)

1.2.2. Los neumáticos

Un neumático es básicamente un elemento que permite a un vehículo desplazarse en forma suave a través de superficies lisas. Consiste en una cubierta principalmente de caucho que contiene aire el cual soporta al vehículo y su carga. Su invención se debe al norteamericano Charles Goodyear quién descubrió, accidentalmente en 1880, el proceso de vulcanización, con el que se da al caucho la resistencia y solidez necesaria para fabricarlo (Castro, 2008).

1.2.2.1. Proceso de elaboración de neumáticos

Para la fabricación de neumáticos de los neumáticos generalmente se sigue el proceso indicado a continuación (Figura 1).



Fuente: Castro, 2008.

Figura 1. Proceso de construcción de neumáticos.

Las principales materias primas utilizadas para la fabricación de los neumáticos son:

- Caucho natural, este es un látex obtenido del árbol que es coagulado por humo y actúa como conservante.
- Caucho sintético, derivado de hidrocarburos utilizado para disminuir las proporciones de caucho natural.
- Negro de humo, es un componente de gran importancia en los neumáticos, ya que les brinda resistencia contra a abrasión mientras protege al caucho de la luz ultravioleta.
- El azufre, durante el vulcanizado une a las moléculas de caucho entre sí, proporcionándoles resistencia tanto al frío como al calor.
- Las resinas y pigmentos de zinc en pequeñas cantidades, ayudan a controlar el vulcanizado, previenen la oxidación y facilitan el procesamiento del caucho.
- Los acelerantes, se utilizan para controlar la proporción del vulcanizado, razón por la cual los distintos tipos de caucho pueden vulcanizarse completamente en el mismo lapso de tiempo.
- Los antioxidantes y antiozonantes, se agregan al caucho para combatir los efectos del oxígeno y del ozono, que acortan la vida útil de los neumáticos.

Para la unificación y homogenización de las materias primas se realiza en las siguientes fases.

- Fase 1: Mezclado. El caucho es mezclado con el resto de las materias primas para obtener láminas de goma, que serán enviadas a los siguientes procesos.
- Fase 2: Calandrado. Las telas son recubiertas de goma, denominadas telas de carcasa.
- Fase 3: Extrusión. Proceso en el cual se le da forma a la goma (Banda de rodamiento, laterales e Innerliner).
- Fase 4: Conformado del talón. En esta fase, las cuerdas de acero son recubiertas con goma para dar como resultado el talón del neumático.
- Fase 5: Cinturones estabilizadores. Se le aplica goma a una serie de cuerdas de acero que darán como resultado los cinturones estabilizadores.

La construcción del neumático se lleva a cabo en dos etapas.



1. Unión del Innerliner, tela de cuerpo, laterales, talones y da como resultado la Carcasa.
 2. Unión de la carcasa con los cinturones estabilizadores y la banda de rodamiento, dando como resultado, un neumático verde.
- Fase 6: Vulcanización. Por último el neumático verde se inserta en una prensa donde se le aplica altas temperaturas y adquiere los diseños de la banda de rodamiento y el resultado es un neumático.

1.2.2.2. Impacto en el entorno

1.2.2.2.1. Cuánto contamina la quema de llantas y neumáticos

Los neumáticos son un auténtico atentado contra el entorno. Su material (caucho) y su masiva fabricación los convierten en un problema medio ambiental de primer orden en todo el mundo, pues no siempre se reutilizan, aunque también es cierto que su reciclaje cada vez es más común e imaginativo.

Solo en España se generan alrededor de 300,000 toneladas de neumáticos usados cada año, pero únicamente una pequeña parte se recicla. Casi la mitad de esta enorme cantidad de desechos no está controlado y otro tanto se acumula en vertederos controlados. Una gran diferencia frente a países ejemplares como Francia, Alemania y Austria, con una media de un 60% de reciclaje. La norma, sin embargo, son porcentajes mucho menores. Un panorama desolador en la mayoría de los países, salvo excepciones como las apuntadas, donde se aplican políticas más eco-responsables y, sobre todo, consiguen hacerlas cumplir, ya que demasiado a menudo se hace caso omiso de la prohibición de echarlos a los vertederos (Viue Studio S. L., 2017).

Una sola llanta quemada puede contaminar lo mismo que el uso promedio de un automóvil durante todo un año.

La quema de llantas es una práctica ilegal en casi todo el mundo.

Las personas que se encuentran cerca padecerán enfermedades respiratorias y de la piel debido a las emisiones de gases tóxicos al aire que respiran.



Al quemar las llantas se emite óxido de zinc que produce dolor de cabeza, náuseas, vomito, debilidad, fiebre y escalofríos, no necesariamente de inmediato, esto puede presentarse meses después de la quema de las llantas.

La quema de 2 toneladas de llantas muestra un 200% de incremento del nivel de mercurio en el aire y un 500% de incremento en el zinc en forma de ceniza que se mezcla con el aire que respiramos.

La quema de llantas libera dioxinas, dióxido de cloro y furanos que son dos de los químicos más tóxicos conocidos por la ciencia y principales causantes de cáncer.

Hay que aprovechar las llantas lo más que se pueda antes de desecharlas, por ejemplo se pueden mandar parchar o incluso vender a las vulcanizadoras y talleres mecánicos para que ellos las reparen y las vendan.

Las llantas y neumáticos se pueden utilizar en el hogar para hacer columpios, macetas, juegos infantiles, e incluso como cercas para delimitar, limpiándolas, y pintándolas.

Muchas personas queman las llantas para recolectar el metal y venderlo, lo que no toman en cuenta es que ganarían más si vendieran las llantas completas a las plantas recicladoras, ya que estas las convierten en sub productos a partir del reciclaje y para la construcción de estadios (Escobedo, 2010).

Como medida compensatoria a nivel ambiental, la etiqueta informativa de los neumáticos, en vigor desde 2012, se divide de la A, a la G, informando de una mejor o peor resistencia a la rodadura, a la capacidad de frenado sobre suelo mojado y al nivel de decibelios producidos.

Reciclarlos para su conversión en asfalto es una idea que comenzó a ponerse en práctica en los años sesenta en Estados Unidos y desde entonces se han conseguido grandes avances. De hecho, son muchas las propuestas al respecto, y los estudios y nuevas iniciativas no dejan de multiplicarse en todo el mundo.

Además de representar una interesante salida para grandes cantidades de neumáticos usados su trituración para mezclarlos con el asfalto ayuda a mejorar sus características, al tiempo que ahorra tener que usar un polímero que también resulta contaminante.

Al margen de los beneficios ambientales, a nivel práctico el resultado es un asfalto más seguro, con mayores prestaciones, aunque también suele ser caro con respecto al



convencional. En concreto, se logra un pavimento más viscoso y elástico, que se deforma menos, aguanta la intemperie, las temperaturas extremas y el agua.

También gana en durabilidad y reduce de forma significativa la contaminación acústica, haciendo innecesarias las barreras de contaminación acústica, con lo que se evitan también sus inconvenientes. En este sentido, si se tienen en cuenta las prestaciones que se obtienen, incluyendo el gesto verde, su mayor precio acaba no siéndolo tanto.

Además de esta aplicación para el reciclaje de neumáticos existen otras muchas medidas como su uso como arrecifes artificiales (un experimento fallido que está obligando a desmantelarlos al descubrirse su toxicidad), su conversión en energía eléctrica o, por ejemplo, la reutilización de algunas de sus partes, entre otras el metal y las fibras textiles.

La obtención de energía eléctrica a partir de los residuos de neumáticos a menudo suele consumirse en la misma planta de reciclaje. Para obtenerla se queman en una caldera y el calor liberado convierte el agua que ésta contiene en un vapor que mueve la turbina y, a su vez, un generador produce la electricidad. Su uso requiere una transformación posterior.

Su transformación en materiales de construcción o de otros muchos materiales que se emplean en el sector textil, entre otros, también está ayudando a reducir sus dramáticos efectos en el medio ambiente. Podemos encontrar restos de neumáticos camuflados allí donde menos lo esperemos, desde las suelas de zapatos a la fabricación de cubiertas o tejados y cables de freno a aislantes acústicos o de vibración, alfombras, losas de goma o para la fabricación de suelos flexibles de pistas deportivas o de zonas de ocio (Viue Studio S. L., 2017).

1.2.2.3. Proceso de trituración de neumáticos

1.2.2.3.1. Niveles de molienda

Los niveles de molienda del caucho se pueden clasificar en:

Nivel de trituración previa: Se realiza un triturado previo con trituradoras de 2 o más ejes, con cuchillas que giran entre 15 y 20 RPM. El tamaño de producción puede no ser



estable, pero eso no tiene gran importancia en esta etapa porque se considera de trituración macro.

Nivel de trituración final: Existen dos métodos en los que se requiere que previamente haya sido retirado el componente metálico. Los métodos se enuncian a continuación.

A temperatura ambiente: con molinos clásicos y por cilindros se separa la parte textil.

Criogénesis: se realiza entre -60 y -70 °C dando un producto más afín y de mejor finura de hasta valores que pasan un 100 % la malla N° 100 de ASTM. 14 5 (Castro, 2007).



CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA

Esta tesis se desarrolló, en su mayor parte, en las instalaciones del Instituto Tecnológico de Villahermosa, excepto las pruebas de ensaye a la compresión de los especímenes de concreto, que fueron desarrolladas en el laboratorio certificado para pruebas “CMG Laboratorio para Construcción”, para garantizar la exactitud y precisión de los resultados.

El procedimiento en general puede resumirse a través del diagrama que se muestra a continuación (Figura 2).

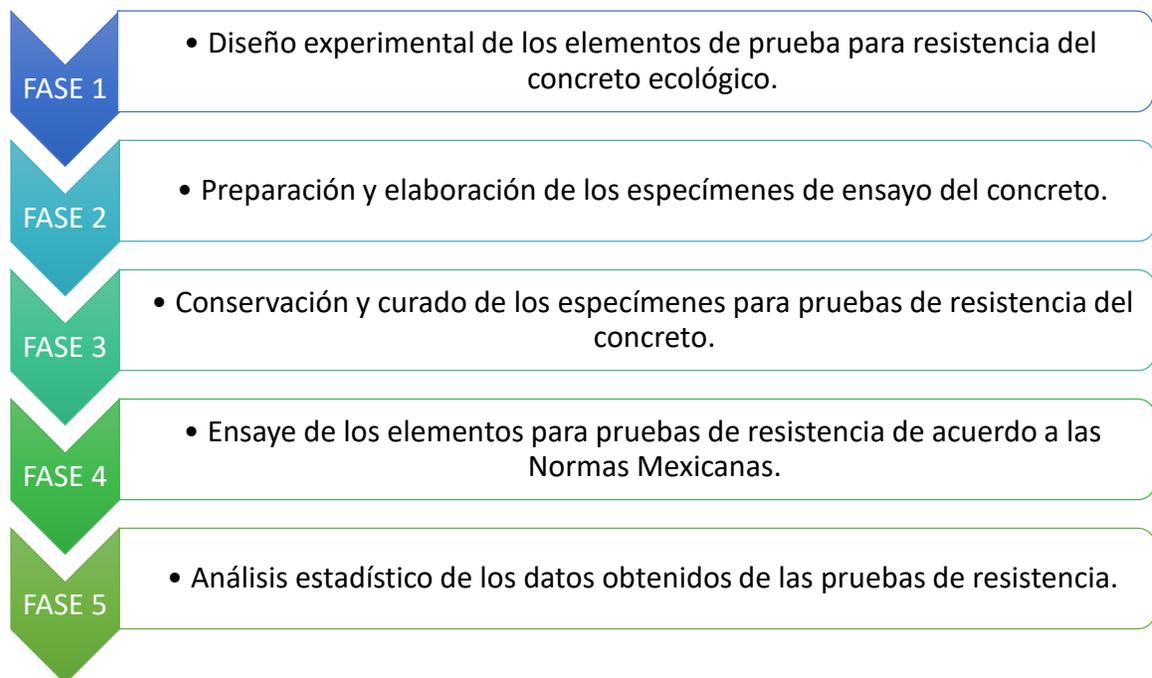


Figura 2. Diagrama del procedimiento general de realización.

2.1. Diseño experimental de los elementos de prueba para resistencia del concreto ecológico.

En este proceso se realizó la recepción del material y el almacenamiento del mismo, y la preparación de los agregados para las distintas pruebas que se realizaron, para conocer las propiedades que se requieren para hacer el diseño de la mezcla de concreto.

2.1.1. Descripción del contenido de las muestras y las pruebas a realizar

La elaboración de este concreto utiliza los materiales del concreto tradicional, los cuales son el cemento (como material cementante, el cual une los elementos de la mezcla), la arena (que tiene la función del agregado fino), la grava (que funge como el agregado grueso), el agua (que es el encargado de causar la reacción de endurecimiento en el cemento) y, para este caso, se utilizará como alternativa sustentable caucho triturado proveniente de una planta de reciclaje de neumáticos fuera de uso (NFU) para añadir a la mezcla, con la finalidad de evaluar el comportamiento del mismo en el concreto en diferentes proporciones en el agregado fino (Figura 3).



Figura 3. Materiales utilizados en las mezclas.

Se elaboraron 70 especímenes de ensayo a la compresión: 7 especímenes del testigo (2 para ensaye de resistencia a los 7 días, 2 a los 14 días y 3 a los 28 días) y 63 especímenes de los elementos de prueba, a como se describen a continuación (Tabla 2).

Tabla 2. Distribución de los especímenes de prueba

Porcentaje de caucho	Tamaño de partícula		
	6 mm	2 mm	COMBINADO
5 %	7 especímenes	7 especímenes	7 especímenes
10 %	7 especímenes	7 especímenes	7 especímenes
20 %	7 especímenes	7 especímenes	7 especímenes

Se trabajó con una resistencia base a la compresión de 300 kg/cm^2 (30 MPa) en los testigos de la cual se modificó la proporción del contenido para elaborar las muestras.

2.1.2. Recepción del material

El material utilizado fue adquirido en una tienda de materiales cercana al Instituto Tecnológico, de nombre “Materiales García”, de la cual se proveyó un volumen de 20 latas¹ de grava y 20 latas de arena. Este material fue suministrado en el estacionamiento del Instituto Tecnológico de Villahermosa, (Figura 4), para garantizar que el material fuera de calidad, se inspeccionó al momento de la recepción.



Figura 4. Recepción e inspección del material.

¹ Cada lata de agregado contiene un volumen de 19 litros.

2.1.3. Almacenamiento y preparación de los agregados

El material entregado no contaba con las condiciones óptimas de almacenamiento, dado que se encontraba con un alto contenido de agua, por lo que antes de resguardarlo se sometió a un proceso de secado al aire para retirar una parte importante de la humedad contenida en el mismo (Figura 5).



Figura 5. Secado del material.

Posteriormente al secado se procedió al almacenamiento en contenedores de 200 litros, como se muestra en la Figura 6, para evitar que el material se contamine con otros elementos externos que alteren su composición.



Figura 6. Almacenamiento de los agregados.

En cuanto al caucho, la adquisición de las partículas trituradas se hizo a través de la empresa TireChip de México, la cual suministró las partículas en las granulometrías utilizadas. El cemento utilizado corresponde al cemento tipo CPC 30R (Cemento Portland Compuesto de Resistencia Rápida) marca Cruz Azul, del cual se adquirieron 5 bultos de 50 kilogramos; dado que el cemento es más delicado en su manejo, su adquisición se hizo posterior al análisis de las propiedades de los agregados, para evitar que con la humedad del medio ambiente se generara la reacción química de endurecimiento y el material no estuviera en condiciones óptimas al momento de elaborar las mezclas.

2.1.4. Descripción de los ensayos realizados a los materiales

Para poder determinar las propiedades que se necesitan para hacer el diseño de la mezcla se hicieron los siguientes ensayos:

- Peso volumétrico seco suelto de la grava

Para la obtención del peso volumétrico del material, se procedió de la siguiente manera:

La grava se extendió y se secó al aire, hasta notar que la humedad de la misma desapareció. Después de esto se cuarteó el material: se revolvió el material hasta que tuvo un aspecto homogéneo y se formó un cono paleando hasta que el material se

extendió por los lados. Posteriormente se dividió el material por el vértice del cono en cuatro partes iguales, de las cuales se tomaron dos porciones de extremos opuestos.

Una vez lista la muestra, se pesó el contenedor sobre el cual se colocaría el material seco para poder descontarlo del peso combinado y se registró el peso obtenido; asimismo, se calculó su volumen. Después se llenó el contenedor con el material (Figura 7), dejándolo caer desde una altura máxima de 5 cm para evitar que el material se compactara dentro del recipiente, y se continuó hasta llenar el contenedor. Una vez lleno, se enrasó el material y se pesó nuevamente el contenedor con mucho cuidado de no compactar el material por algún golpe brusco. Se registró el peso obtenido en este paso y con los registros se calculó el peso volumétrico usando la siguiente fórmula:

$$PVSS = \frac{W_{GC} - W_C}{V_C}$$

donde:

$PVSS$ = Peso volumétrico seco suelto (kg/m^3)

W_{GC} = Peso de la grava y el contenedor (kg)

W_C = Peso del contenedor vacío (kg)

V_C = Volumen del contenedor (m^3)



Figura 7. Obtención del peso volumétrico seco de la grava.

- Peso volumétrico seco compactado de la grava

Para la obtención del peso volumétrico del material, se procedió de manera similar al peso volumétrico seco suelto, con la excepción de que al colocar el material en el recipiente se hizo en tres capas, compactando el material en cada capa con 25 golpes de varilla. Para calcular el peso volumétrico seco compactado se utilizó la misma fórmula que en el procedimiento anterior.

- Peso específico de la grava

Se dejó remojando en agua una muestra de grava durante 24 horas, para saturar el material; pasado el lapso de tiempo se retiró la muestra del recipiente con agua y se secó por la parte externa con una franela ligeramente húmeda. Posterior a este paso, se pesó el material para hallar el peso saturado y superficialmente seco, y después se colocó la muestra dentro de un recipiente conocido como picnómetro, lleno de agua, el cual desalojó el volumen de líquido correspondiente al volumen del material colocado en su interior (Figura 8). Una vez finalizado el desalojo de agua, se tomó la lectura del volumen de agua desplazado con una probeta, para determinar el volumen de la muestra de grava.



Figura 8. Prueba para obtención de densidad relativa.

Después, se recuperó el material depositado y se colocó en una charola para secarla totalmente en una parrilla eléctrica, para retirar completamente la humedad de la muestra y se deja enfriar. Posteriormente, se pesó nuevamente el material seco (Figura 9) y se calculó el peso específico mediante la siguiente fórmula:

$$P_E = \frac{W_S}{(\gamma_W V_{DES}) - W_{SSS} + W_S}$$

donde:

P_E = Peso específico del material

W_{SSS} = Peso de la grava saturada y superficialmente seca (g)

W_S = Peso de la grava seca (g)

V_{DES} = Volumen desalojado del contenedor (cm^3)

γ_W = Peso específico del agua = 1 g/cm^3

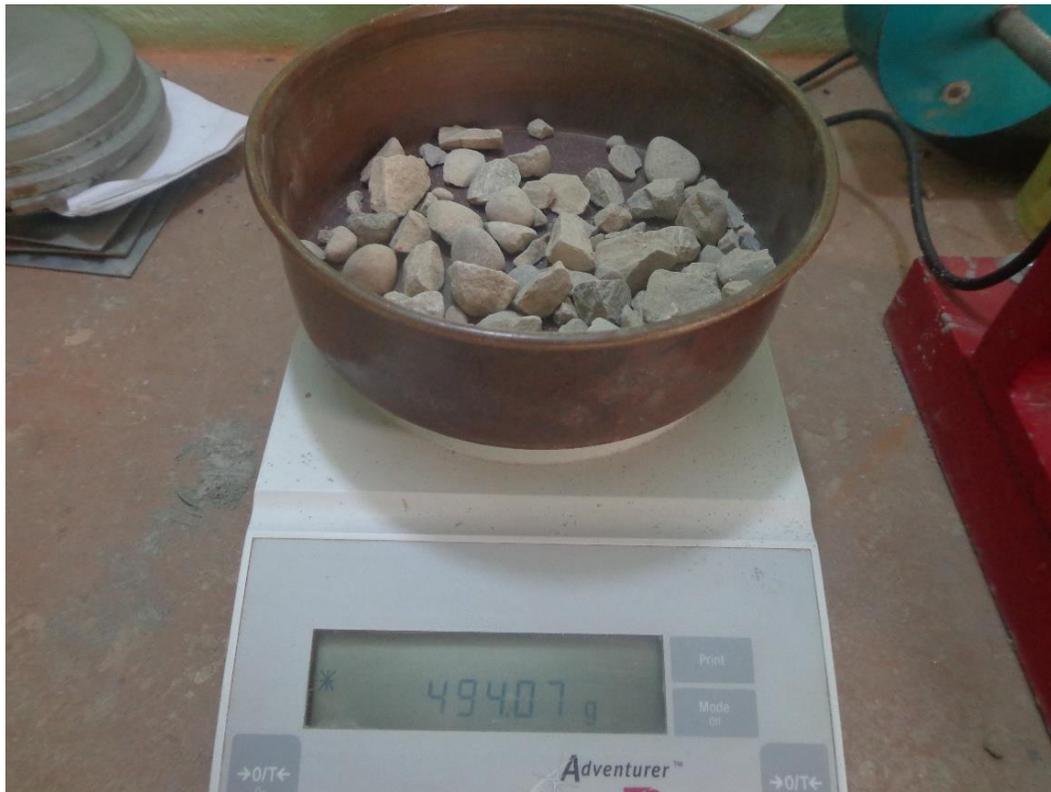


Figura 9. Pesaje de material después del secado.

- Absorción de la grava

Con los datos obtenidos en el cálculo del peso específico de la grava pudimos encontrar también el porcentaje de absorción del agregado grueso por medio de la siguiente fórmula:

$$\%_{ABS} = \frac{W_{SSS} - W_s}{W_s} * 100$$

donde:

$\%_{ABS}$ = Porcentaje de absorción del material

W_{SSS} = Peso de la grava saturada y superficialmente seca (g)

W_s = Peso de la grava seca (g)

- Peso volumétrico seco suelto de la arena

Para la obtención del peso volumétrico de la arena, tanto suelto como compactado, se procedió de manera similar al de la grava, dado que el procedimiento es el mismo para este material (Figura 10).



Figura 10. Obtención del peso volumétrico de la arena.

- Peso específico de la arena

Para hallar este valor se obtuvo una muestra aproximadamente 500 gramos de arena por cuarteo. La muestra obtenida se depositó en una charola y se colocó en un horno a una temperatura estimada de 100° C, durante 24 horas aproximadamente hasta que se secó. Después del secado se dejó que la arena se enfriara hasta una temperatura en que se pudiera manejar con comodidad. A continuación, se cubrió con agua y se mantuvo en esta condición durante 24 horas. Después de la saturación, se eliminó el exceso de agua por decantación, procurando evitar la pérdida de material fino. A continuación, se extendió la muestra sobre una superficie plana donde estuviera expuesta al aire, agitándose constantemente para asegurar que el secado fuera uniforme. Esta operación se continuó hasta que la muestra llegó a una condición en la que pudiera fluir libremente. Una vez alcanzada esta condición, se colocó una porción de la arena parcialmente seca en forma suelta en un molde troncocónico, que descansaba firmemente sobre una superficie lisa, con el diámetro mayor abajo.



Figura 11. Comprobación del estado saturado y superficialmente seco de la arena.

Se colocó una porción de la arena parcialmente seca en el molde llenándolo al borde en dos capas (Figura 11) y compactando ligeramente el agregado fino con 25 golpes ligeros del pisón, distribuidos en 15 golpes en la primera capa y 10 en la segunda. Se removió la arena sobrante de la base y se levantó el molde verticalmente. En este punto, si la humedad superficial seguía presente, el agregado fino mantenía la forma del molde; en ese caso se dejaba secar la arena por un lapso extra de tiempo. Cuando

el agregado se desplomara suavemente, se había alcanzado la condición superficialmente seca.

De la muestra en el estado saturado y superficialmente seco se tomó una porción de 300 gramos y se llenó un frasco de Chapman con agua destilada hasta la marca de 200 ml. Se depositaron los 300 gramos de material en el frasco, cuidando de evitar que en su descenso dentro de las paredes de cristal, se pegara a éstas. Posteriormente, se extrajo el aire atrapado rodando el frasco en una superficie plana. Cuando se observó que ya no subían burbujas de aire a través de los bulbos, se completó el agua hasta la marca de calibración (450 ml). Se sumergió el frasco en un baño de agua, por espacio de una hora, a una temperatura aproximada de 23 °C, y después se retiró el frasco del baño de agua, se secó bien y se pesó para obtener su masa. A continuación, se retiró el contenido del frasco y se lavó por dentro, para volver a llenar el frasco con agua destilada hasta la marca de calibración, secarlo bien y luego pesarlo nuevamente (Figura 12).

Con los datos obtenidos se calculó el peso específico con la siguiente fórmula:

$$P_E = \frac{W_S}{W_{FA} + W_S - W_{FSA}}$$

donde:

P_E = Peso específico del material

W_S = Peso de la muestra de arena saturada y superficialmente seca = 300 g

W_{FSA} = Peso del frasco con la arena y el agua hasta la marca (g)

W_{FA} = Peso del frasco con el agua hasta la marca (g)





Figura 12. Procedimiento para determinación del peso específico de la arena.

- Absorción de la arena

De la muestra en su estado de saturación y superficialmente seca, se pesó una cantidad de 500 gramos y se depositó en una charola para secarlo a fuego directo en una estufa eléctrica. Después del secado, se dejó que la muestra se enfriara y luego se obtuvo su masa. Para hallar el porcentaje de absorción se utilizó la siguiente fórmula:

$$\%_{ABS} = \frac{W_{SSS} - W_S}{W_S} * 100$$

donde:

$\%_{ABS}$ = Porcentaje de absorción del material

W_{SSS} = Peso de la muestra de arena saturada y superficialmente seca = 500 g

W_S = Peso de la arena seca (g)

- Granulometría de la arena

Para el análisis granulométrico se puso a secar una muestra del agregado de 500 gramos aproximadamente a una temperatura estimada de 100 °C durante 24 horas. Se utilizaron, para esta prueba, cribas de No. 4, 8, 16, 30, 50, 100, 200 y una charola. Se armaron las cribas en orden descendente del número de criba, terminando con la

charola (fondo). Se colocó la muestra en la criba superior y se tapó muy bien. Seguidamente se agitaron las cribas con un aparato mecánico por un tiempo suficiente (Figura 13), de tal forma que se satisfaga el criterio de un cribado correcto.



Figura 13. Procedimiento de cribado de la arena.

Posteriormente, se retiró el material retenido en cada criba (Figura 14) y se pesó por separado cada porción. Se registró la información del análisis granulométrico que consistió en determinar con respecto a la masa inicial los porcentajes de material que pasaron cada malla, el porcentaje retenido acumulado de cada criba y la gráfica de la información.



Figura 14. Material retenido en cada malla de cribado de la arena.

- Módulo de finura de la arena

Para el caso de la arena se determinó el módulo de finura con la siguiente fórmula:

$$MF = \sum_{\text{No. 4}}^{\text{No. 100}} \% \text{ retenido acumulado} / 100$$

2.2. Preparación y elaboración de los especímenes de ensayo del concreto.

Para el experimento de esta tesis se decidió hacer nueve proporciones distintas para la mezcla de concreto, partiendo del diseño original de la mezcla con una resistencia establecida a la compresión de 300 kg/cm², del cual se sustituyó una parte del agregado fino por el caucho triturado en distintas granulometrías y proporciones, a como se describe en este apartado.

2.2.1. Descripción de las muestras

Las muestras que se elaboraron en este experimento, se categorizaron y se etiquetaron en base a las distintas proporciones y granulometrías que cada diseño de mezcla contemplaba. En la Tabla 3 se enuncia cada tipo de muestra con su etiqueta y sus características.

Tabla 3. Descripción de las muestras

ETIQUETA DE LA MUESTRA	PORCENTAJE DE CAUCHO	
	GRANO 2 MM	GRANO 6 MM
T	Testigo (Sin caucho)	
A	-	5%
B	5%	-
C	5 % (Combinado*)	
D	-	10%
E	10%	-
F	10% (Combinado*)	
G	-	20%
H	20%	-
I	20% (Combinado*)	

* La mezcla combinada se elaboró revolviendo, del total del porcentaje, la mitad con grano de 6 mm y el resto con grano de 2 mm.

Todos los especímenes de concreto se diseñaron utilizando como base la proporción de materiales del testigo, utilizando una resistencia base de 300 kg/cm² y tomando en cuenta las propiedades de los agregados, a través del Diseño de Mezclas de Concreto de acuerdo a la norma ACI 211.1–95 (Prácticas Estándares de las Proporciones de los concretos Normal, Pesado y Masivo).

2.2.2. Diseño del proporcionamiento de los materiales a utilizar en la mezcla por muestra

Antes de iniciar el diseño de la mezcla base de concreto, se deben establecer algunos parámetros iniciales esenciales en el diseño. Los parámetros que se determinaron previamente en el diseño de la mezcla fueron: La resistencia a la compresión del concreto (que se estableció a 300 kg/cm² a los 28 días), el método de consolidación (varillado, en esta situación), la inclusión de aire en la mezcla (no fue requerido en este caso), el tipo de construcción para el cual es diseñada la mezcla (para fines de este trabajo, se consideró para vigas y muros reforzados), el tamaño máximo del agregado grueso (que para nuestro caso, corresponde a 3/4 in, o sea, 19 mm) y la existencia de datos estadísticos previos al diseño (los cuales no se poseen para esta investigación).

Adicionalmente a los datos antes mencionados, se utilizan los parámetros obtenidos de las pruebas de laboratorio, a saber: el peso específico del cemento (que se puede establecer de manera fija en 3.15), el módulo de finura de la arena, la densidad relativa de la arena y la grava, el porcentaje de absorción de la arena y la grava y el peso volumétrico de la grava. También se requirió, para este caso, la densidad relativa del caucho triturado.

El primer paso del diseño de la mezcla es determinar la resistencia de diseño a la compresión, la cual se determina en base al parámetro de la existencia de datos estadísticos previos al diseño. Como en el caso particular de esta tesis no existen datos estadísticos previos, se utiliza la Tabla 4 para obtener nuestra resistencia de diseño:

Tabla 4. Resistencia a compresión media requerida sin datos previos disponibles

Resistencia a compresión especificada, $f'c$, en kg/cm ²	Resistencia a compresión media requerida, en kg/cm ²
Menos de 210	$f'c + 70$
210 a 350	$f'c + 84$
Más de 350	$1.1 f'c + 50$

Fuente: Kosmatka et al., 2004.

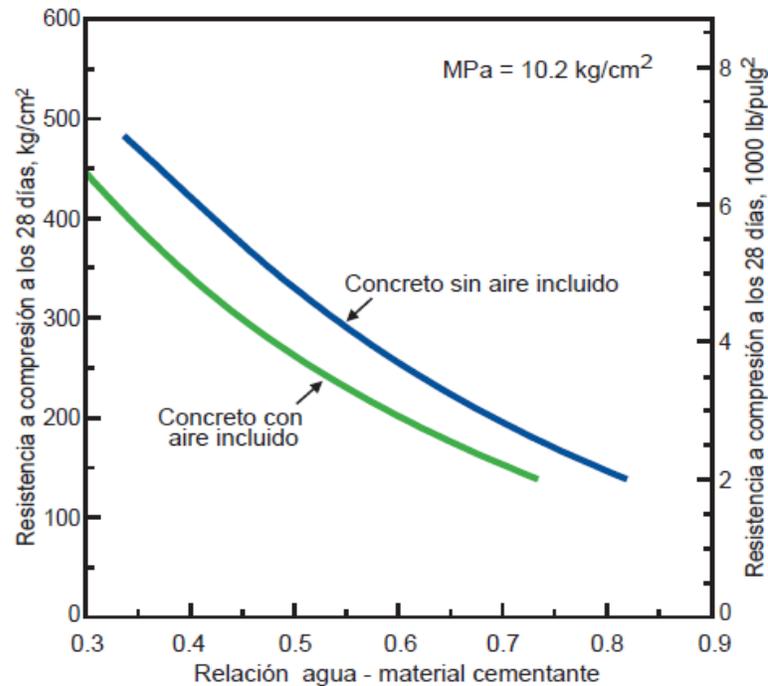


Posteriormente, una vez establecida la resistencia media establecida, se determina la relación agua-cemento a través de la gráfica de la Figura 15, o usando interpolación en la Tabla 5:

Tabla 5. Relación agua-cemento y resistencia a compresión del concreto.

Resistencia a la compresión a 28 días, en kg/cm ²	Relación agua-cemento en masa	
	Concreto con aire incluido	Concreto sin aire incluido
450	0.38	0.31
400	0.43	0.34
350	0.48	0.40
300	0.55	0.46
250	0.62	0.53
200	0.70	0.61
150	0.80	0.72

Fuente: Kosmatka et al., 2004.



Fuente: Kosmatka et al., 2004.

Figura 15. Relación aproximada entre resistencia a compresión y relación agua-cemento para el concreto.

A continuación, se establecen los parámetros de trabajabilidad, con el revenimiento requerido. Para ello se utiliza la Tabla 6, dependiendo del tipo de construcción que se realiza.

Tabla 6. Revenimientos recomendados para varios tipos de construcción

Construcción de concreto	Revenimiento (cm)	
	Máximo*	Mínimo
Zapatas y muros de cimentación reforzado	7.5	2.5
Zapatas, cajones y muros de subestructuras sin refuerzo	7.5	2.5
Vigas y muros reforzados	10.0	2.5
Columnas de edificios	10.0	2.5
Pavimentos y losas	7.5	2.5
Concreto masivo	7.5	2.5

* Se puede aumentar 2.5 cm para los métodos de consolidación manuales, tales como varillado o picado.

Fuente: Kosmatka et al., 2004.

Para fines de diseño, como se requiere que su uso sea estructural, se utilizó el tipo de construcción de vigas y muros reforzados, requiriendo así un revenimiento mínimo de 2.5 cm y máximo de 10.0 cm. Adicionalmente, como indica la nota al pie de la Tabla 6, se debe añadir 2.5 cm al revenimiento máximo si, en vez de vibrado, se utiliza un método de compactación manual, como el varillado. Como éste último será el método de compactación utilizado, el revenimiento máximo se establece en 12.5 cm.

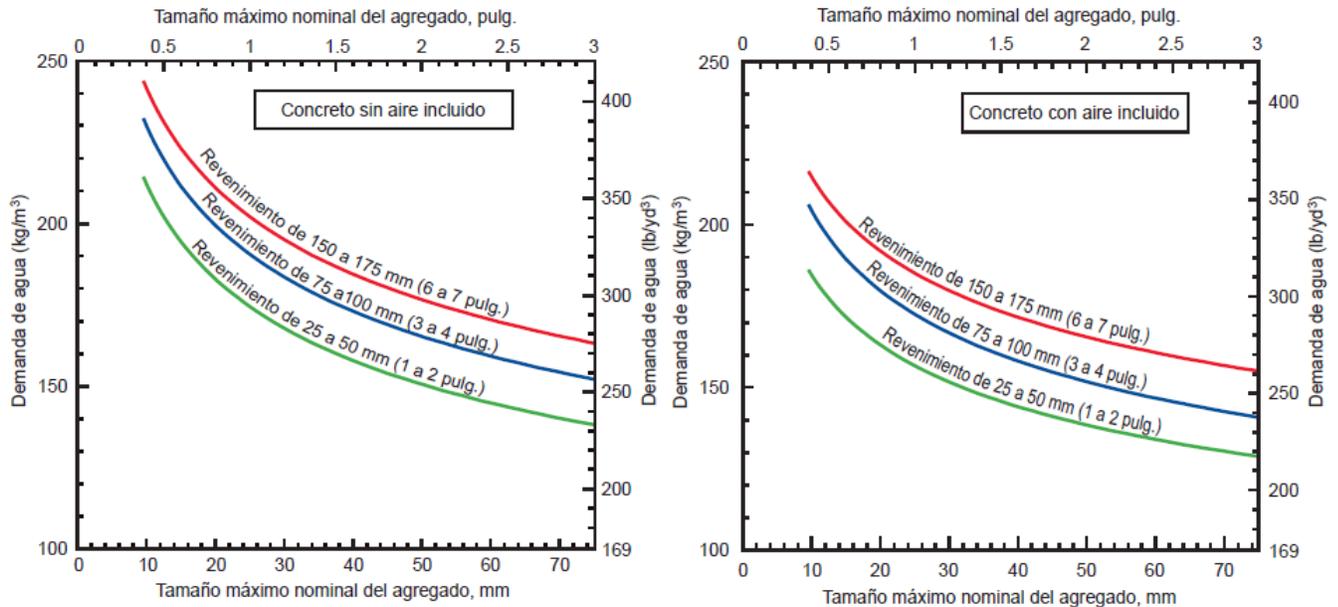
Después, usando la Figura 16 o la Tabla 7, se determina la cantidad de agua a utilizar en 1 m³ de mezcla, que es el volumen base para hacer el proporcionamiento. Para ello, se requiere haber determinado si el concreto se consideró con aire incluido y el tamaño máximo del agregado grueso. En este caso, se consideró concreto sin aire incluido y el tamaño máximo de agregado grueso se estableció en 19 mm (3/4 in).

Tabla 7. Requisitos aproximados de agua de mezcla y contenido de aire para diferentes revenimientos y tamaños máximos nominales del agregado.

Revenimiento, en cm		Agua, kilogramos por m ³ de concreto, para los tamaños de agregado grueso (en mm) indicados*							
Mínimo	Máximo	9.5	12.5	19.0	25.0	37.5	50.0	75.0	150.0
<i>Concreto sin aire incluido</i>									
2.5	5.0	207	199	190	179	166	154	130	113
7.5	10.0	228	216	205	193	181	169	145	124
15.0	17.5	243	228	216	202	190	178	160	-
Cantidad aproximada de aire atrapado en un concreto sin aire incluido		3.0%	2.5%	2.0%	1.5%	1.0%	0.5%	0.3%	0.2%
<i>Concreto con aire incluido</i>									
2.5	5.0	181	175	168	160	150	142	122	107
7.5	10.0	202	193	184	175	165	157	133	119
15.0	17.5	216	205	197	184	174	166	154	-
<i>Promedio del contenido de aire total recomendado, para el nivel de exposición</i>									
Exposición leve		4.5%	4.0%	3.5%	3.0%	2.5%	2.0%	1.5%	1.0%
Exposición moderada		6.0%	5.5%	5.0%	4.5%	4.5%	4.0%	3.5%	3.0%
Exposición severa		7.5%	7.0%	6.0%	6.0%	5.5%	5.0%	4.5%	4.0%

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

Fuente: Kosmatka et al., 2004.



Fuente: Kosmatka et al., 2004.

Figura 16. Demanda de agua aproximada para varios revenimientos y tamaños de agregados.

Una vez determinada la masa de agua requerida para 1 m³ de concreto, se calcula la masa de cemento que se necesita para el mismo volumen de mezcla, usando la siguiente fórmula:

$$m_c = \frac{m_A}{R_{A/C}}$$

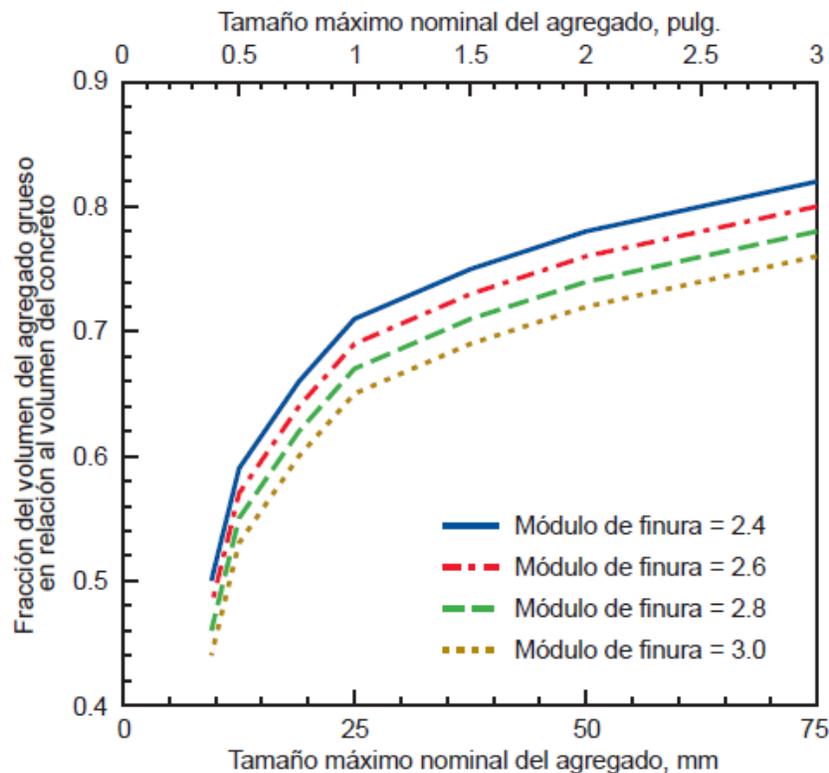
donde:

m_c = Masa del cemento para 1 m³ de concreto (kg)

m_A = Masa de agua para 1 m³ de concreto (kg)

$R_{A/C}$ = Relación agua-cemento

Luego de esto, se utiliza la Figura 17 o la Tabla 8 para determinar el volumen de agregado grueso requerido para la elaboración de 1 m³ de la mezcla de concreto usando el módulo de finura de la arena y el tamaño máximo del agregado grueso, determinados al principio.



Fuente: Kosmatka et al., 2004.

Figura 17. Volumen del agregado grueso por unidad de volumen de concreto.

Tabla 8. Volumen de Agregado Grueso por Volumen Unitario de Concreto.

Tamaño máximo nominal del agregado grueso		Volumen del agregado grueso varillado en seco, por volumen unitario de concreto para distintos módulos de finura de la arena			
mm	in	2.40	2.60	2.80	3.00
9.5	3/8	0.50	0.48	0.46	0.44
12.5	1/2	0.59	0.57	0.55	0.53
19	3/4	0.66	0.64	0.62	0.60
25	1	0.71	0.69	0.67	0.65
37.5	1 1/2	0.75	0.73	0.71	0.69
50	2	0.78	0.76	0.74	0.72
75	3	0.82	0.80	0.78	0.76
150	6	0.87	0.85	0.83	0.81

Fuente: Kosmatka et al., 2004.

En este punto, las cantidades de los ingredientes, a excepción del agregado fino, se conocen. En el método del volumen absoluto, el volumen del agregado fino se determina sustrayendo, de un metro cúbico, los volúmenes absolutos de los ingredientes conocidos. El volumen absoluto del agua, cemento y agregado grueso se calcula dividiéndose la masa conocida de cada uno de ellos por el producto de su densidad relativa y la densidad del agua (1000 kg/m^3). El volumen absoluto calculado del agregado fino es calculado restándole a 1 el volumen total de los demás ingredientes, incluyendo el aire atrapado (el cual se obtiene multiplicando la unidad por el porcentaje obtenido en la Tabla 7). Este valor, multiplicado por la densidad relativa de la arena, nos da como resultado la masa necesaria de agregado fino para elaborar 1 m^3 de concreto.

Las masas secas de los agregados se deben aumentar para compensar la humedad en y sobre los agregados y el agua de mezcla que se adiciona se debe reducir adecuadamente. Para ello, antes de la elaboración de la mezcla, se debe tomar el porcentaje de contenido de humedad existente en los agregados, el cual se calcula mediante el siguiente procedimiento:

Se toma una muestra del material a utilizar para la elaboración de la mezcla y se pesa, anotando el dato obtenido. Seguidamente, se coloca la muestra en una estufa eléctrica o de gas, para retirar completamente el agua almacenada en las partículas del agregado, y una vez alcanzado el estado seco de éste, se deja enfriar y se pesa nuevamente la muestra. El cálculo de la humedad se realiza utilizando la siguiente fórmula:

$$\%_{HUM} = \frac{W_H - W_S}{W_S} * 100$$

donde:

$\%_{HUM}$ = Porcentaje de absorción del material

W_H = Peso de la muestra de agregado en estado original (g)

W_S = Peso de la muestra de agregado seca (g)

Con esos valores, se corrige la masa de los agregados por absorción, de la siguiente manera:

$$m'_{AG} = m_{AG} \left(1 + \frac{\%_{ABS}}{100} \right)$$

donde:

m'_{AG} = Masa corregida del agregado en la mezcla (g)

m_{AG} = Masa del agregado obtenida del proporcionamiento (g)

$\%_{ABS}$ = Porcentaje de absorción del material

Posteriormente, se corrige la masa del agua por absorción y humedad, usando la fórmula siguiente:

$$m'_W = m_W - \left(m_{AR} \left(1 + \frac{\%_{AA} - \%_{HA}}{100} \right) \right) - \left(m_{GR} \left(1 + \frac{\%_{AG} - \%_{HG}}{100} \right) \right)$$

donde:

m'_W = Masa corregida del agua en la mezcla (g)

m_W = Masa del agua obtenida del proporcionamiento (g)



m_{AR} = Masa de la arena obtenida del proporcionamiento (g)

m_{GR} = Masa de la grava obtenida del proporcionamiento (g)

$\%_{AA}$ = Porcentaje de absorción de la arena

$\%_{HA}$ = Porcentaje de humedad de la arena

$\%_{AG}$ = Porcentaje de absorción de la grava

$\%_{HG}$ = Porcentaje de humedad de la grava

Por último, se calcula la cantidad de materiales a utilizar multiplicando los valores de proporcionamiento por el número de metros cúbicos de mezcla que se deseen realizar. Adicionalmente, para hacer la sustitución en volumen del caucho, se convierte la masa del agregado fino en volumen y, de acuerdo al porcentaje, se calcula la proporción en volumen de caucho a utilizar; ésta, al multiplicarse por su densidad relativa, nos da la masa de caucho necesaria.

Todo este procedimiento se programó en una hoja de cálculo, ingresando los parámetros necesarios y criterios de diseño, para obtener la cantidad de materiales necesarios para las distintas mezclas de concreto que se realizaron (Figura 18).

PROPORCIONAMIENTO ACI.xlsx - Excel (Error de activación de productos)														
ARCHIVO INICIO INSERTAR DISEÑO DE PÁGINA FÓRMULAS DATOS REVISAR VISTA														
01.	Peso específico del cemento	3.15												
02.	Módulo de finura de la arena	2.56												
03.	Densidad relativa de la arena	2.65												
04.	Absorción de la arena	1.35%												
05.	Humedad de la arena	3.84%												
06.	Densidad relativa de la grava	2.60												
07.	Tamaño máximo de la grava	19.0	mm											
08.	Peso volumétrico de la grava	1,670	kg/m3											
09.	Absorción de la grava	0.59%												
10.	Humedad de la grava	0.44%												
11.	Resistencia a la compresión	300	kg/cm2											
12.	Compactación por vibrado	NO												
13.	Concreto con aire incluido	NO												
14.	Densidad relativa del caucho	0.95												
										Masa volumétrica				
										Agua	Arena	Caucho 6 mm/2 mm	Cemento	Grava
										205.00	205.00	192.30	456.00	1,079.73
										456.00	145.00	456.00	1,075.00	413.00
										575.00	217.00	597.08	---	20.00
										2,311.00	1,000.00	2,325.11		
										0.04 m3	7.850 kg	21.940 kg	18.610 kg	44.080 kg
										5.0%		0.435 kg		
										5.0%		0.435 kg		
										10.0%				

Figura 18. Hoja de cálculo programada para proporcionamiento de concreto.

2.3. Procedimiento de elaboración de los especímenes de cada muestra

En esta etapa se elaboraron las mezclas de concreto por muestra, incluyendo todo el trabajo de preparación previa necesario, usando las normas NMX-C-156-ONNCCE-2010, NMX-C-159-ONNCCE-2004, NMX-C-159-ONNCCE-2004, NMX-C-281-ONNCCE-2006 y NMX-C-435-ONNCCE-2010 en el proceso.



Figura 19. Pesaje del material necesario para elaborar la mezcla.

La fase inicial consistió en la preparación del material, el cual se pesó (Figura 19) en las cantidades necesarias antes de hacer el procedimiento de mezclado, de acuerdo a los valores que obtuvimos en el diseño de la mezcla, cuidando que también se realizara el ensaye de humedad del material (Figura 20) en el momento de realizar la mezcla para hacer los ajustes pertinentes.



Figura 20. Ensaye de humedad a los materiales de la mezcla.

De la misma manera, se requirieron moldes para elaborar los especímenes de concreto, los cuales por norma deben ser cilíndricos, tener un diámetro de 150 mm y una altura de 300 mm con sus bases totalmente planas, sin protuberancias. Estos moldes se verificaron que, por su uso, no estuvieran defectuosos, ya que por su uso continuo se llegan a deformar; sólo se aceptaron aquellos que conservaran las dimensiones especificadas. Éstos se engrasaron y ajustaron (Figura 21) para evitar la adherencia del concreto al molde, la deformación de los especímenes y/o la pérdida de material de los mismos, lo cual provocaría que los especímenes fueran inservibles.



Figura 21. Preparación de los moldes antes de la elaboración de la mezcla.

El método elegido para la mezcla del concreto fue por medio de una revolvedora eléctrica (revoltura mecánica), en la cual el procedimiento de mezclado se realizó de la siguiente manera:

En primera instancia, se puso en funcionamiento la revolvedora, pero antes de iniciar el mezclado de la revoltura, se depositó agua en el interior de la revolvedora para cubrir las paredes internas, esto con el fin de evitar la pérdida del agua destinada a la mezcla; posteriormente, el agua sobrante se desalojó de la revolvedora. Una vez hecho esto, se añadió el agregado grueso y parte del agua de mezclado, luego se añadió el agregado fino, el caucho (en caso de ser necesario), el cemento y el agua mientras giraba la olla. Durante tres minutos se mezcló el concreto, después de haber cargado todos los ingredientes, seguido de un descanso de tres minutos; se terminó con otro periodo de mezclado de dos minutos. Durante el periodo de descanso, se tapó la boca de la

revolvedora con un paño húmedo para evitar la evaporación. Para eliminar la segregación, se depositó el concreto mezclado por la revolvedora en una charola limpia y humedecida, y se remezcló con un cucharón hasta obtener una apariencia uniforme (Figura 22).



Figura 22. Elaboración de la mezcla de concreto.

A continuación, se realizaron las pruebas de control de calidad de la mezcla de concreto, que fueron la prueba de revenimiento y de control de temperatura del concreto fresco, que corresponden a las normas NMX-C-159-ONNCCE-2004 y NMX-C-435-ONNCCE-2010.

La prueba de revenimiento se efectuó de la siguiente manera: Se humedeció el interior del cono de revenimiento y se colocó el cono sobre una superficie plana, humedecida, no absorbente y rígida. Se sostuvo el cono firmemente en su lugar parándose sobre los estribos de apoyo que se encuentran a cada lado del molde; después, se llenó el cono en tres capas (Figuras 23a y 23b). Para la primera capa, se llenó el molde a aproximadamente a 1/3 de su volumen, y se varilló la capa 25 veces en todo su

espesor, distribuyendo uniformemente los golpes sobre la sección transversal de la capa, inclinando ligeramente la varilla y varillando desde el perímetro, continuando progresivamente en forma de espiral hacia el centro; esto para evitar que haya exceso de aire atrapado. Para la segunda capa se llenó el cono a aproximadamente a $2/3$ de su volumen, y se varilló nuevamente la capa 25 veces en todo su espesor, penetrando ligeramente en la primera capa y distribuyendo uniformemente los golpes en toda la sección transversal de la capa. Para la tercera capa se amontonó el concreto por encima de la parte superior del cono y se varilló la capa 25 veces en todo su espesor, penetrando ligeramente en la segunda capa y distribuyendo uniformemente los golpes en toda la sección transversal de la capa. Si, como resultado del varillado, el concreto caía de la parte superior del cono, se agregaba concreto a modo de mantener un exceso por encima del cono y se continuaba el conteo del varillado desde el último valor alcanzado antes de agregar concreto al cono.



a) Llenado del cono de revenimiento



b) Varillado del concreto fresco



c) Enrase de la mezcla de concreto



d) Medición del revenimiento

Figura 23. Elaboración de la prueba de revenimiento.

Luego, se pasó en la parte superior de la superficie de concreto la varilla de compactación en un movimiento de enrasado (Figura 23c), el cual consiste en pasar el perfil de la varilla para retirar el exceso de mezcla, pero cuidando que se conserve una superficie lisa posterior al paso de la varilla. Mientras se mantenía una presión hacia abajo en el cono, se removió el concreto acumulado alrededor de la base del cono durante el enrasado, para después remover inmediatamente el cono levantándolo en dirección vertical, sin haber ningún movimiento lateral o de torsión del cono al estarlo levantando. Seguidamente, se midió el revenimiento, el cual es la distancia vertical entre la parte superior del cono y el centro original desplazado en la parte superior de la superficie del concreto (Figura 23d).

Adicionalmente, se realizó la prueba de temperatura del concreto fresco, de la siguiente forma: se colocó el dispositivo para medir la temperatura en el concreto de modo que la porción sensible de la misma estuvo sumergida al menos 75 mm. Se presionó suavemente el concreto alrededor del dispositivo para medir la temperatura de modo que la temperatura del ambiente no influyera en la temperatura medida. Se dejó el dispositivo para medir la temperatura del concreto por un mínimo de 2 minutos, o hasta que la lectura se estabilizó. Para finalizar, se leyó y registró la temperatura del concreto mientras que el dispositivo estaba en el concreto (Figura 24).



Figura 24. Elaboración de la prueba de temperatura.

Por último, en esta etapa se realizó el llenado de los moldes para la obtención de los especímenes de concreto, el cual se realiza de manera similar al llenado del cono de revenimiento, con la ligera diferencia que al término del varillado de cada capa se dieron ligeros golpes al contorno del molde con un martillo de goma para evitar la acumulación de aire atrapado entre el concreto. Se efectuaron 15 golpes en cada capa del concreto, y después de la última capa se enrasó el espécimen procurando que la superficie quedara completamente lisa. Al final, se resguardaron los especímenes elaborados en un lugar totalmente nivelado y lejos de la acción directa del sol, para su fraguado (endurecimiento) como se muestra en la Figura 25.



Figura 25. Obtención de los especímenes de concreto.

2.4. Conservación y curado de los especímenes para pruebas de resistencia del concreto.

En esta fase, se trabajó en conservar los especímenes de concreto en las condiciones óptimas durante el tiempo de fraguado hasta la fecha en que se realizaría el ensaye de los cilindros de concreto; estas condiciones están especificadas en la norma NMX-C-160-ONNCCE-2004.

2.4.1. Descimbrado de los especímenes de concreto

Para evitar la evaporación del agua en los especímenes de concreto sin fraguar, se cubrieron inmediatamente, después de terminados, con una bolsa de plástico. Después, Los especímenes se descimbraron (es decir, se retiraron de los moldes) en un lapso de 20 a 48 horas posteriores a su elaboración. Una vez retirados de los moldes, se procedió a etiquetarlos (Figura 26) de acuerdo al tipo de mezcla experimental y se numeró aleatoriamente cada espécimen con un número del uno al siete. También se tomaron notas de las dimensiones de sus diámetros y alturas y su masa por elemento.



Figura 26. Obtención de los especímenes de concreto.

2.4.2. Curado de los cilindros de la muestra de concreto

Los especímenes, una vez extraídos de los moldes y etiquetados, fueron mantenidos con agua libre en su superficie en todo tiempo. Esta condición se logró por inmersión en agua saturada con cal, sin ser expuestos a goteo directo o agua corriente. Se supervisó constantemente que los cilindros mantuvieran su fibra superior siempre sumergida en el agua (como mínimo a 2 cm de la superficie libre del agua, para esto se rellenaba diariamente la pila de curado para reponer el agua evaporada), para evitar cambios bruscos de temperatura y, como consecuencia, agrietamientos en su superficie. Esa condición se mantuvo hasta el día de ensayo de cada uno de los especímenes (Figura 27).



Figura 27. Curado de especímenes.

2.5. Ensayo de los elementos para pruebas de resistencia de acuerdo a las Normas Mexicanas.

Aquí se trabajó esencialmente en la prueba del ensayo a compresión de los cilindros, el cual está regido por las normas NMX-C-083-ONNCCE-2014 y NMX-C-109-ONNCCE-2013. Incluye el cabeceo de los especímenes de concreto y la prueba de compresión. Esta fase se desarrolló en el laboratorio de la empresa “CMG Servicios, Proyectos y Construcciones”, certificado por la Entidad Mexicana de Acreditación, garantizando la fidelidad de los resultados.

Para realizar los ensayos se distribuyeron los números de los especímenes de la siguiente forma (Tabla 9):

Tabla 9. Distribución de especímenes para ensaye a la compresión.

Números de espécimen	Días de fraguado al momento del ensaye
1 y 2	7
3 y 4	14
5, 6 y 7	28

2.5.1. Procedimiento de ensaye de los especímenes de concreto

De acuerdo a la norma NMX-C-109-ONNCCE-2013, las bases de los especímenes o caras de aplicación de carga no se deben apartar de la perpendicular al eje en más de $0,5^\circ$, aproximadamente 3 mm en 300 mm, y no se permiten irregularidades respecto de un plano que exceda de 0,05 mm, en caso contrario deben ser cabeceadas.

Para las pruebas realizadas, se cabecearon con mortero de azufre los especímenes de concreto, aun cuando cumplían con las especificaciones de la norma NMX-C-109-ONNCCE-2013, para garantizar una distribución uniforme de la carga al momento del ensaye (Figura 28).



Figura 28. Cabeceo de los especímenes de concreto.

Para iniciar los ensayos, se limpiaron las superficies de las placas superior e inferior y las cabezas del espécimen de prueba, se colocaron sobre la placa inferior de la prensa de prueba alineando su eje cuidadosamente con el centro de la placa de carga; mientras tanto, la placa superior se bajó hacia el espécimen asegurándose que se tuviera un contacto suave y uniforme. Se aplicó la carga con una velocidad uniforme y continua sin producir impacto, ni pérdida de carga, hasta que ocurrió la falla (Figura 29). Se registró la carga máxima resistida hasta el instante previo a la falla, y se calculó la resistencia dividiendo la carga máxima resistida entre el área de la superficie de contacto con la carga. Este procedimiento se hizo por igual con cada uno de los especímenes.



Figura 29. Ensayo a la compresión de especímenes de concreto.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Resultados del análisis de las propiedades de los materiales

En este apartado se presentan los resultados obtenidos al desarrollar los experimentos en las pruebas de los materiales del concreto por tipo de agregado, explicados en la metodología. Estos resultados son los que se utilizaron para elaborar el diseño de las mezclas de concreto, de los cuales se muestra más adelante el proporcionamiento.

3.1.1. Pruebas al agregado grueso

3.1.1.1. Peso volumétrico suelto y compactado al agregado grueso

En las Tablas 10 y 11 se muestran los cálculos realizados para obtener el peso volumétrico suelto y compactado de la grava, respectivamente.

Tabla 10. Datos y cálculos del peso volumétrico seco suelto de la grava.

DATOS EXPERIMENTALES		
Dimensiones del contenedor prismático		
Largo: 0.243 m	Ancho: 0.244 m	Altura: 0.248 m
Volumen:	$V_C = 0.0147 \text{ m}^3$	
Masa de contenedor vacío:	$W_C = 4.040 \text{ kg}$	
Masa del contenedor con material:	$W_{GC} = 28.590 \text{ kg}$	
CÁLCULOS:		
$PVSS = \frac{W_{GC} - W_C}{V_C} = \frac{28.590 - 4.040}{0.0147} = 1\ 670 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$		

Tabla 11. Datos y cálculos del peso volumétrico seco compactado de la grava.

DATOS EXPERIMENTALES		
Dimensiones del contenedor prismático		
Largo: 0.243 m	Ancho: 0.244 m	Altura: 0.248 m
Volumen:	$V_C = 0.0147 \text{ m}^3$	
Masa de contenedor vacío:	$W_C = 4.040 \text{ kg}$	
Masa del contenedor con material:	$W_{GC} = 29.810 \text{ kg}$	
CÁLCULOS:		
$PVSC = \frac{W_{GC} - W_C}{V_C} = \frac{29.810 - 4.040}{0.0147} = 1\,753 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$		

3.1.1.2. Densidad relativa

Los resultados de la prueba de densidad relativa de gravas se muestran en la Tabla 12:

Tabla 12. Datos y cálculos de la densidad relativa de la grava.

DATOS EXPERIMENTALES	
Masa de la grava saturada y superficialmente seca:	$W_{SSS} = 556.38 \text{ g}$
Masa de la grava seca:	$W_S = 553.12 \text{ g}$
Volumen desplazado:	$V_{DES} = 216 \text{ cm}^3$
Peso específico del agua:	$\gamma_W = 1 \text{ g/cm}^3$
CÁLCULOS:	
$P_E = \frac{W_{SSS}}{\gamma_W V_{DES} - W_{SSS} + W_S} = \frac{556.38}{(1)(216) - 553.12 + 556.38} = 2.60$	

3.1.1.3. Absorción

Usando los datos de la densidad relativa, se obtiene el porcentaje de absorción del agregado grueso, que se muestra en la Tabla 13:

Tabla 13. Datos y cálculos del porcentaje de absorción de la grava.

DATOS EXPERIMENTALES	
Masa de la grava saturada y superficialmente seca:	$W_{SSS} = 556.38 \text{ g}$
Masa de la grava seca:	$W_s = 553.12 \text{ g}$
CÁLCULOS:	
$\%_{ABS} = \frac{W_{SSS} - W_s}{W_s} * 100 = \frac{556.38 - 553.12}{553.12} * 100 = 0.59 \%$	

3.1.2. Pruebas al agregado fino

3.1.2.1. Peso volumétrico suelto al agregado fino

En la Tabla 14 se muestra el peso volumétrico suelto de la arena, obtenido de manera similar al del agregado grueso.

Tabla 14. Datos y cálculos del peso volumétrico seco suelto de la arena.

DATOS EXPERIMENTALES		
Dimensiones del contenedor prismático		
Largo: 0.243 m	Ancho: 0.244 m	Altura: 0.248 m
Volumen:	$V_C = 0.0147 \text{ m}^3$	
Masa de contenedor vacío:	$W_C = 4.040 \text{ kg}$	
Masa del contenedor con material:	$W_{GC} = 26.890 \text{ kg}$	
CÁLCULOS:		
$PVSS = \frac{W_{GC} - W_C}{V_C} = \frac{26.970 - 4.040}{0.0147} = 1\ 560 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$		

3.1.2.2. Densidad relativa

Los cálculos y resultados obtenidos de la prueba para obtener la densidad relativa de la arena se muestran a continuación en la Tabla 15.

Tabla 15. Datos y cálculos de la densidad relativa de la arena.

DATOS EXPERIMENTALES	
Masa de la arena saturada y superficialmente seca:	$W_S = 300 \text{ g}$
Masa del frasco con arena y agua hasta la marca:	$W_{FSA} = 932.6 \text{ g}$
Masa del frasco con agua hasta la marca:	$W_{FA} = 745.8 \text{ g}$
Cálculos:	
$P_E = \frac{W_S}{W_{FA} + W_S - W_{FSA}} = \frac{300}{745.8 + 300 - 932.6} = 2.65$	

3.1.2.3. Absorción

Usando los datos de la densidad relativa y en un procedimiento similar al de las gravas, se obtiene el porcentaje de absorción del agregado grueso, mostrado en la Tabla 16.

Tabla 16. Datos y cálculos del porcentaje de absorción de la arena.

DATOS EXPERIMENTALES	
Masa de la grava saturada y superficialmente seca:	$W_{SSS} = 500 \text{ g}$
Masa de la grava seca:	$W_S = 493.33 \text{ g}$
Cálculos:	
$\%_{ABS} = \frac{W_{SSS} - W_S}{W_S} * 100 = \frac{500 - 493.33}{493.33} * 100 = 1.35 \%$	

3.1.2.4. Granulometría de la arena

Los datos granulométricos del agregado están reflejados en la Tabla 17 y la Figura 30.

Tabla 17. Datos granulométricos de la arena.

MALLA NO.	MASA RETENIDA en g	% RETENIDO EN MASA	% ACUMUL. RETENIDO	% DE TOTAL QUE PASA
3/8"	0	0.00%	0.00%	100.00%
4	9.16	1.83%	1.83%	98.17%
8	30.51	6.10%	7.93%	92.07%
16	61.38	12.28%	20.21%	79.79%
30	102.49	20.50%	40.71%	59.29%
50	229.18	45.83%	86.54%	13.46%
100	60.84	12.17%	98.71%	1.29%
200	4.48	0.90%	99.61%	0.39%
CHAROLA	1.96	0.39%	100.00%	0.00%
TOTAL	500.00	100%		

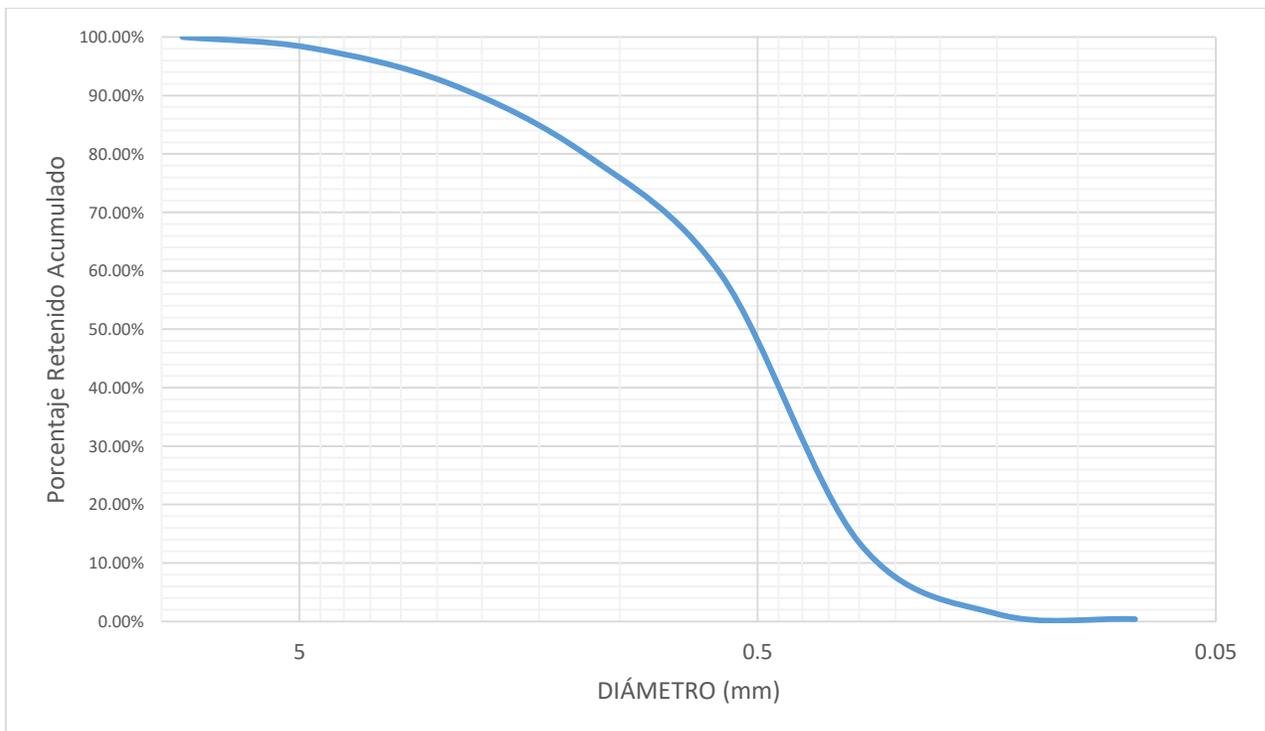


Figura 30. Curva granulométrica de la arena.

3.1.2.5. Módulo de finura

Utilizando los datos granulométricos obtenidos en la etapa anterior y haciendo uso de la fórmula correspondiente se obtiene el módulo de finura:

$$MF = \frac{\sum_{\text{No. 4}}^{\text{No. 100}} \% \text{ retenido acumulado}}{100}$$

$$MF = \frac{1.83 + 7.93 + 20.21 + 40.71 + 86.54 + 98.71}{100} = 2.56$$

3.2. Tablas de proporcionamiento de materiales para mezclas de concreto por muestra.

La Tabla 18 muestra los datos utilizados para el diseño de la mezcla para el espécimen testigo, etiquetado con la "T"

Tabla 18. Parámetros y cantidades de material para mezcla de muestra T.

MUESTRA T (Testigo)			
ARENA		GRAVA	
$W_H = 287.65 \text{ g}$	$W_S = 275.96 \text{ g}$	$W_H = 443.82 \text{ g}$	$W_S = 443.21 \text{ g}$
$\%_{HA} = 4.24 \%$		$\%_{HG} = 0.14 \%$	
MASA DE MATERIALES, en kg			
Agua	7.885	Grava	43.940
Arena	24.470	Cemento	18.610
Caucho 2mm	-	Caucho 6mm	-
CONDICIONES DE LA MEZCLA			
Revenimiento	7 cm	Temperatura	26 °C

Los datos de diseño de las mezclas “A” (mezcla con 5% de caucho en granos de 6 mm) y “B” (mezcla con 5% de caucho en granos de 2 mm) se indican en la Tabla 19 y Tabla 20, respectivamente.

Tabla 19. Parámetros y cantidades de material para mezcla de muestra A.

MUESTRA A (5% Caucho 6mm)			
ARENA		GRAVA	
$W_H = 278.77$ g	$W_S = 264.53$ g	$W_H = 236.52$ g	$W_S = 235.90$ g
$\%_{HA} = 5.38$ %		$\%_{HG} = 0.26$ %	
MASA DE MATERIALES, en kg			
Agua	7.565	Grava	44.000
Arena	23.500	Cemento	18.610
Caucho 2mm	-	Caucho 6mm	0.445
CONDICIONES DE LA MEZCLA			
Revenimiento	7.5 cm	Temperatura	26 °C

Tabla 20. Parámetros y cantidades de material para mezcla de muestra B.

MUESTRA B (5% Caucho 2mm)			
ARENA		GRAVA	
$W_H = 243.93$ g	$W_S = 234.80$ g	$W_H = 368.97$ g	$W_S = 368.11$ g
$\%_{HA} = 3.89$ %		$\%_{HG} = 0.23$ %	
MASA DE MATERIALES, en kg			
Agua	7.930	Grava	44.000
Arena	23.170	Cemento	18.610
Caucho 2mm	0.435	Caucho 6mm	-
CONDICIONES DE LA MEZCLA			
Revenimiento	12.5 cm	Temperatura	30 °C

En la Tabla 21 y la Tabla 22 se encuentran descritos los detalles de diseño de las mezclas “C” (mezcla con 5% de caucho en granos combinados de 6 mm y 2 mm) y “D” (mezcla con 10% de caucho en granos de 6 mm), respectivamente.

Tabla 21. Parámetros y cantidades de material para mezcla de muestra C.

MUESTRA C (5% Caucho mezclado 2mm/6mm)			
ARENA		GRAVA	
$W_H = 335.44$ g	$W_S = 303.03$ g	$W_H = 447.97$ g	$W_S = 444.73$ g
$\%_{HA} = 10.70$ %		$\%_{HG} = 0.73$ %	
MASA DE MATERIALES, en kg			
Agua	6.110	Grava	44.200
Arena	24.680	Cemento	18.610
Caucho 2mm	0.235	Caucho 6mm	0.235
CONDICIONES DE LA MEZCLA			
Revenimiento	12.5 cm	Temperatura	27 °C

Tabla 22. Parámetros y cantidades de material para mezcla de muestra D.

MUESTRA D (10% Caucho 6mm)			
ARENA		GRAVA	
$W_H = 272.55$ g	$W_S = 264.62$ g	$W_H = 472.23$ g	$W_S = 468.86$ g
$\%_{HA} = 3.00$ %		$\%_{HG} = 0.72$ %	
MASA DE MATERIALES, en kg			
Agua	7.925	Grava	44.200
Arena	21.760	Cemento	18.610
Caucho 2mm	-	Caucho 6mm	0.865
CONDICIONES DE LA MEZCLA			
Revenimiento	7 cm	Temperatura	28 °C

A continuación, en la Tabla 23 y Tabla 24, se muestran las referencias para el diseño de las mezclas “E” (mezcla con 10% de caucho en granos de 2 mm) y “F” (mezcla con 10% de caucho en granos combinados de 6 mm y 2 mm), respectivamente

Tabla 23. Parámetros y cantidades de material para mezcla de muestra E.

MUESTRA E (10% Caucho 2mm)			
ARENA		GRAVA	
$W_H = 315.75 \text{ g}$	$W_S = 305.84 \text{ g}$	$W_H = 308.98 \text{ g}$	$W_S = 305.44 \text{ g}$
$\%_{HA} = 3.24 \%$		$\%_{HG} = 1.16 \%$	
MASA DE MATERIALES, en kg			
Agua	7.675	Grava	44.390
Arena	21.810	Cemento	18.610
Caucho 2mm	0.870	Caucho 6mm	-
CONDICIONES DE LA MEZCLA			
Revenimiento	6.5 cm	Temperatura	27 °C

Tabla 24. Parámetros y cantidades de material para mezcla de muestra F.

MUESTRA F (10% Caucho mezclado 2mm/6mm)			
ARENA		GRAVA	
$W_H = 416.79 \text{ g}$	$W_S = 401.36 \text{ g}$	$W_H = 455.99 \text{ g}$	$W_S = 453.97 \text{ g}$
$\%_{HA} = 3.84 \%$		$\%_{HG} = 0.44 \%$	
MASA DE MATERIALES, en kg			
Agua	7.850	Grava	44.080
Arena	21.940	Cemento	18.610
Caucho 2mm	0.435	Caucho 6mm	0.435
CONDICIONES DE LA MEZCLA			
Revenimiento	6 cm	Temperatura	30 °C

En la Tabla 23 y Tabla 24, están plasmados los parámetros del diseño de las mezclas “G” (mezcla con 20% de caucho en granos de 6 mm) y “H” (mezcla con 20% de caucho en granos de 2 mm), respectivamente

Tabla 25. Parámetros y cantidades de material para mezcla de muestra G.

MUESTRA G (20% Caucho 6mm)			
ARENA		GRAVA	
$W_H = 453.12 \text{ g}$	$W_S = 444.96 \text{ g}$	$W_H = 513.09 \text{ g}$	$W_S = 510.71 \text{ g}$
$\%_{HA} = 1.83 \%$		$\%_{HG} = 0.47 \%$	
MASA DE MATERIALES, en kg			
Agua	8.310	Grava	44.090
Arena	21.510	Cemento	18.610
Caucho 2mm	-	Caucho 6mm	1.715
CONDICIONES DE LA MEZCLA			
Revenimiento	8 cm	Temperatura	29 °C

Tabla 26. Parámetros y cantidades de material para mezcla de muestra H.

MUESTRA H (20% Caucho 2mm)			
ARENA		GRAVA	
$W_H = 509.14 \text{ g}$	$W_S = 492.70 \text{ g}$	$W_H = 438.77 \text{ g}$	$W_S = 435.02 \text{ g}$
$\%_{HA} = 3.34 \%$		$\%_{HG} = 0.86 \%$	
MASA DE MATERIALES, en kg			
Agua	7.785	Grava	44.260
Arena	19.400	Cemento	18.610
Caucho 2mm	1.740	Caucho 6mm	-
CONDICIONES DE LA MEZCLA			
Revenimiento	6.5 cm	Temperatura	28 °C

Por último, la Tabla 27 exhibe los parámetros y cantidades de material utilizados para elaborar la mezcla "I" (mezcla con 10% de caucho en granos combinados de 6 mm y 2 mm).

Tabla 27. Parámetros y cantidades de material para mezcla de muestra I.

MUESTRA I (20% Caucho mezclado 2mm/6mm)			
ARENA		GRAVA	
$W_H = 432.64$ g	$W_S = 417.29$ g	$W_H = 462.96$ g	$W_S = 457.23$ g
$\%_{HA} = 3.68$ %		$\%_{HG} = 1.25$ %	
MASA DE MATERIALES, en kg			
Agua	7.530	Grava	44.430
Arena	19.470	Cemento	18.610
Caucho 2mm	0.870	Caucho 6mm	0.870
CONDICIONES DE LA MEZCLA			
Revenimiento	5.5 cm	Temperatura	27 °C

En las Figuras 31 y 32, se muestra un gráfico donde se puede observar la cantidad y proporción utilizada de materiales para cada una de las distintas muestras de concreto elaboradas.

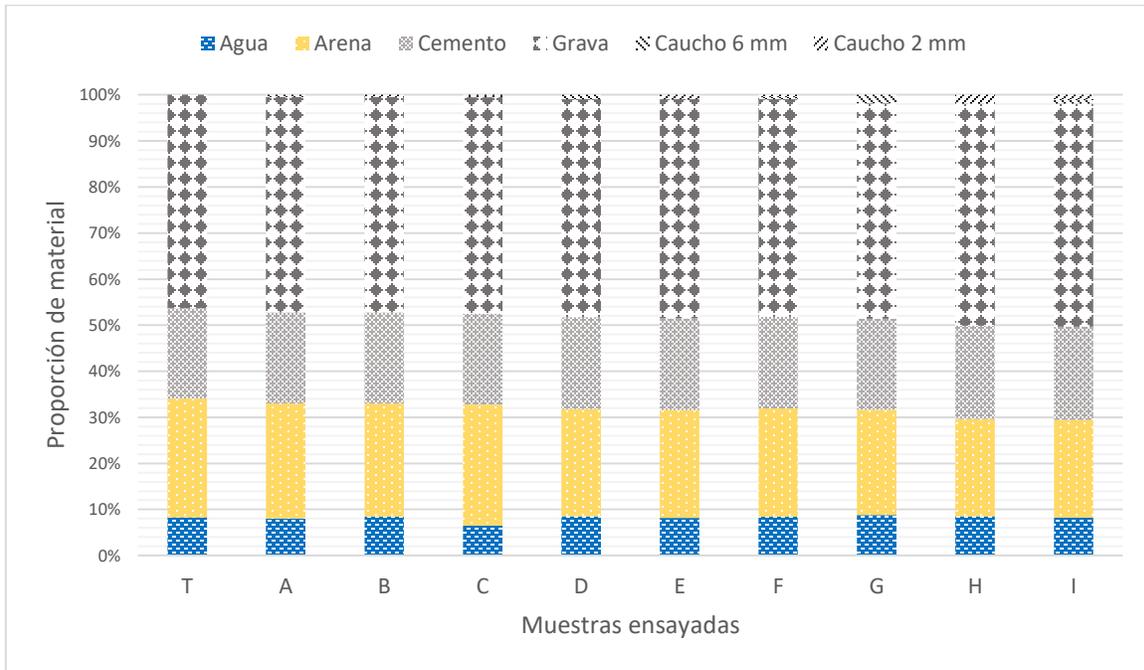


Figura 31. Proporciones de material, en masa, utilizados en cada tipo de muestra

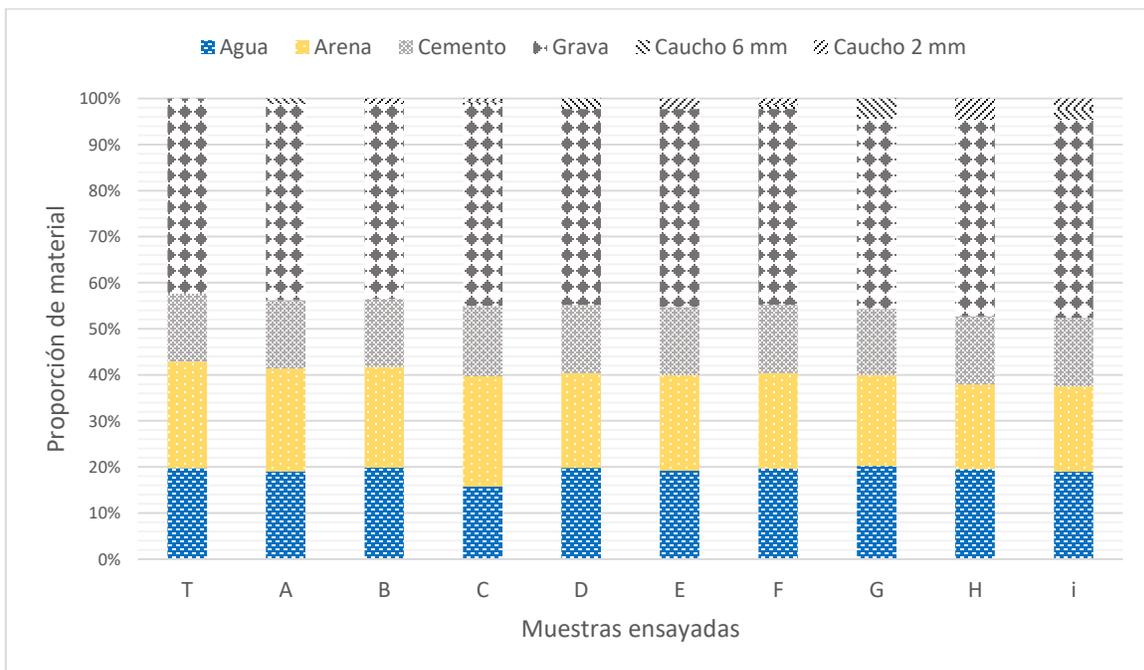


Figura 32. Proporciones de material, en volumen, utilizados en cada tipo de muestra

3.3. Tablas de resultado de ensayos de resistencia a la compresión de los elementos de pruebas

En la Tabla 28 y en la Figura 33 se pueden ver los resultados de resistencia a la compresión de los ensayos a los especímenes de concreto por cada tipo de muestra y su comportamiento.

Tabla 28. Resistencia a la compresión de especímenes de muestra.

RESISTENCIAS A LA COMPRESIÓN, en kg/cm ²							
MUESTRA	7 DÍAS		14 DÍAS		28 DÍAS		
	1	2	3	4	5	6	7
T	212	219	268	275	333	335	341
A	171	180	236	244	277	282	291
B	186	193	251	271	282	290	301
C	205	212	261	277	295	309	320
D	161	164	213	214	239	256	264
E	178	184	224	238	276	280	285
F	202	204	257	276	309	318	325
G	161	163	207	222	237	247	250
H	175	176	228	230	272	276	277
I	192	199	250	273	304	310	322

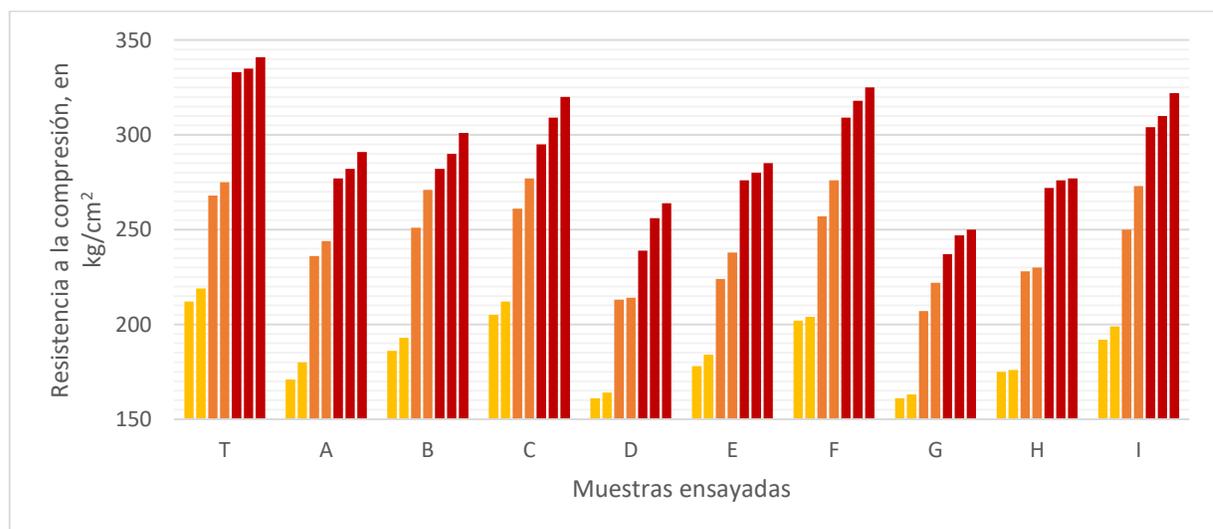


Figura 33. Resistencias alcanzadas de los especímenes, por muestra

3.4. Análisis estadístico de los datos obtenidos de las pruebas de resistencia a la compresión

3.4.1. ANOVA de ensaye a los 7 días de elaboración

A continuación, en la Tabla 29, se muestra el ANOVA (Análisis de Varianza) realizado a los especímenes ensayados a los 7 días, utilizando un nivel de significancia del 5%.

Tabla 29. Análisis de varianza de especímenes ensayados a los 7 días ($\alpha=5\%$).

FV²	SC	GL	CM	F	P	F_{α}
Tratamientos	6 269.05	9	696.56	42.09	0.000000892	3.0204
Error	165.50	10	16.55			
TOTAL	6 434.55	19				

Dado que el ANOVA muestra que existe diferencia significativa entre, al menos, un par de medias, se verifica a través del método de Tukey cuáles muestras presentan una diferencia significativa contra la media de la muestra "T" (Testigo) a un nivel de significancia del 5%. Los resultados se muestran en la Tabla 30.

Tabla 30. Prueba de Tukey de las muestras de ensaye a los 7 días ($\alpha=5\%$).

MUESTRAS	DM CON TESTIGO	VARIACIÓN
A	40.00	Significativa
B	26.00	Significativa
C	7.00	No Significativa
D	53.00	Significativa
E	34.50	Significativa
F	12.50	No Significativa
G	53.50	Significativa
H	40.00	Significativa
I	20.00	Significativa
Valor Crítico de Tukey (T_{0.05})		16.11

² En las tablas de los ANOVAs, las abreviaturas significan lo siguiente: FV = fuente de variabilidad (efecto), SC = suma de cuadrados, GL = grados de libertad, CM = cuadrado medio, F = estadístico de prueba, P = significancia observada, F _{α} = valor crítico del estadístico de prueba a la significancia α .

3.4.2. ANOVA de ensaye a los 14 días de elaboración

Nuevamente, con los resultados de los ensayos a los 14 días de elaboración, se elabora un ANOVA al 5% de nivel de significancia, del que se muestran los resultados en la Tabla 31.

Tabla 31. Análisis de varianza de especímenes ensayados a los 14 días ($\alpha=5\%$).

FV	SC	GL	CM	F	P	F $_{\alpha}$
Tratamientos	9 325.25	9	1 036.14	9.94	0.000647411	3.0204
Error	1 042.50	10	104.25			
Total	10 367.75	19				

Dado que el ANOVA nos devuelve como resultado la existencia de una diferencia significativa entre al menos un par de medias, se evalúa el método de Tukey para encontrar las muestras con diferencia significativa respecto a "T" (Testigo) bajo el mismo nivel de significancia, mostrados en la Tabla 32.

Tabla 32. Prueba de Tukey de las muestras de ensaye a los 14 días ($\alpha=5\%$).

MUESTRAS	DM CON TESTIGO	VARIACIÓN
A	31.50	No Significativa
B	10.50	No Significativa
C	2.50	No Significativa
D	58.00	Significativa
E	40.50	Significativa
F	5.00	No Significativa
G	57.00	Significativa
H	42.50	Significativa
I	10.00	No Significativa
Valor Crítico de Tukey (T_{0.05})		40.43

3.4.3. ANOVA de ensaye a los 28 días de elaboración

Al final, con los datos de resistencia a la compresión a los 28 días de elaboración de los especímenes, se elabora un ANOVA con un nivel de significancia del 5%, como se muestra en la Tabla 33:

Tabla 33. Análisis de varianza de especímenes ensayados a los 28 días ($\alpha=5\%$).

FV	SC	GL	CM	F	P	F $_{\alpha}$
Tratamientos	22 469.37	9	2 496.60	35.63	0.0000000002	2.3928
Error	1 401.33	20	70.07			
Total	23 870.70	29				

Al presentarse variación significativa en las medias muestrales, se realiza la prueba de Tukey usando un nivel de significancia del 5%, para comparar las muestras con diferencias significativas, como se muestra en la Tabla 34.

Tabla 34. Prueba de Tukey de las muestras de ensaye a los 28 días ($\alpha=5\%$).

MUESTRAS	DM CON TESTIGO	VARIACIÓN
A	53.00	Significativa
B	45.33	Significativa
C	28.33	Significativa
D	83.33	Significativa
E	56.00	Significativa
F	19.00	No Significativa
G	91.67	Significativa
H	61.33	Significativa
I	24.33	Significativa
Valor Crítico de Tukey (T_{0.05})		24.21

3.5. Discusión de los resultados

De entre todas las mezclas, podemos identificar a través de los resultados a los 28 días de elaboración, que solamente cuatro alcanzaron la resistencia de diseño a compresión establecida de 300 kg/cm^2 , a saber: la muestra "T" (Testigo) con una media de 336.33 kg/cm^2 , la muestra "C" con promedio de 308 kg/cm^2 , la muestra "F" que obtuvo un promedio de 317.33 kg/cm^2 y la muestra "I" que alcanzó una media de 312 kg/cm^2 . Las demás mezclas tuvieron un promedio inferior a la resistencia de diseño especificada, lo que las hace candidatas menos sólidas para el objetivo de este estudio. Cabe mencionar que todas las mezclas con caucho sufrieron una disminución de su resistencia a la compresión respecto a la mezcla testigo, que alcanzó una resistencia 12.11% mayor que la cual a la que fue diseñada.

Al observar el análisis de varianza a los 7 días, se resalta que la hipótesis nula, que establece que las medias de todos los tratamientos son iguales, se rechaza dado que el estadístico obtenido del cálculo es mucho mayor que el valor crítico del estadístico al nivel de significancia establecido. Por tanto, esto nos lleva a hacer comparaciones entre las medias de los tratamientos, llamadas pruebas de rango múltiples, para identificar las medias que significativamente son diferentes. En el método de Tukey, usado en esta investigación, se observa que únicamente dos tratamientos no presentan diferencia significativa con el tratamiento "T", ya que sus diferencias de medias son menores al valor crítico de la prueba; las mezclas son las que corresponden al tratamiento "C" y al tratamiento "F".

Revisando el análisis de varianza a los 14 días, podemos advertir que se presenta una diferencia significativa de medias entre pares de tratamientos, por lo que se efectúa de nueva cuenta la prueba de rango múltiple a través del método de Tukey, con el cual observamos una disminución en la cantidad de tratamientos con diferencias significativas respecto a "T", encontrando que los tratamientos que no presentan diferencia significativa son los de la mezcla "A", la mezcla "B", la mezcla "C", la mezcla "F" y la mezcla "I".



Haciendo una exploración a la tabla del ANOVA de las resistencia a los 28 días, puede notarse que por tercera ocasión se rechaza la hipótesis nula, llevando a cabo la prueba de rango múltiple de Tukey; en esta tercera vez, el método arroja que solamente una muestra se mantiene en el rango para diferencias no significativas, la cual es la muestra "F". Aunque la muestra "I" presenta una diferencia respecto a la media del testigo muy cercana al valor crítico del método de Tukey, el valor es mayor, así que formalmente se asume una diferencia significativa.

Al observar los resultados obtenidos de los tres análisis hechos, podemos ver que el único tratamiento que conserva su diferencia respecto al testigo dentro del rango permisible en los tres casos es el tratamiento "F". El tratamiento "C" lo hace en dos ocasiones (a los 7 y a los 14 días), pero en la resistencia final deja ver una diferencia respecto a la mezcla de control. Los tratamientos "A", "B" e "I" únicamente se conservan consistentes en una ocasión (a los 14 días), pero ni la primera resistencia parcial ni la final se inclinan hacia la media de la mezcla testigo. El resto de los tratamientos ("D", "E", "G" y "H") presentaron en todo momento diferencia significativa en la resistencia a la compresión del testigo usado de control.



CONCLUSIONES

El consumo de neumáticos en los países desarrollados y subdesarrollados es elevado y va en aumento. Aunque los neumáticos usados no generan ningún peligro inmediato, su eliminación de manera inapropiada o su producción en grandes cantidades puede contaminar gravemente el medio ambiente u ocasionar problemas a la hora de eliminarlos, dado que por su diseño son técnicamente indestructibles con el paso de los años. Por esto, las opciones de eliminación más comunes para este residuo después de su vida útil son la eliminación en vertederos y la quema, opciones poco recomendables dado que la primera genera acumulación de humedad y la proliferación de vectores transmisores de enfermedades, y la segunda genera contaminantes que, al ser inhalados, son tóxicos para los seres vivos. Sin embargo, el reciclaje de llantas de desecho es una opción viable para la construcción sustentable. El objetivo de esta investigación fue identificar mezclas de concreto con partículas de caucho que pudiesen ser utilizados para fines estructurales, ensayadas de acuerdo a lo establecido en las normas mexicanas, dando un valor agregado a los neumáticos desechados y disminuyendo el impacto ambiental, colaborando con el medio ambiente.

El estudio comparó la resistencia a la compresión de un concreto diseñado para fines estructurales en el cual se sustituyó una parte proporcional del volumen del agregado fino (arena) por partículas de caucho de llantas recicladas de dos granulometrías distintas usadas por separado y mezcladas entre sí, respecto a una mezcla a una resistencia específica de 300 kg/cm^2 diseñada a partir de la norma ACI 211.1 que sirvió como muestra testigo.

El resultado de los análisis indicó que las muestras "C" (correspondiente al agregado de caucho mezclado de 6 y 2 mm en un 5%), "F" (que pertenece al caucho mezclado en 10%) e "I" (referente a la mezcla de caucho combinado al 20%) fueron las que mostraron consistencia con la muestra testigo; de las cuales, la que mostró más consistencia fue la mezcla "F", al mostrar no significatividad en la diferencia de las medias muestrales respecto a la muestra "T" en los análisis realizados a los 7, 14 y 28 días y la evaluación hecha por las pruebas de rango múltiples, con el método de Tukey.



De acuerdo con estas conclusiones estadísticas, se puede concluir que la muestra “F”, que corresponde al concreto con partículas mezcladas de caucho de 6 mm y de 2 mm en sustitución del agregado fino en 10% del volumen, es la más aceptable como sustituto de la mezcla tradicional, ya que satisface los rangos de resistencia y de comportamiento respecto a la mezcla tradicional sin caucho. Esto confirma la existencia de un concreto sustentable con partículas de caucho provenientes de neumáticos fuera de uso que puede ser utilizado para fines estructurales en reemplazo del concreto tradicional, tal cual fue planteado en la hipótesis de esta investigación.

Antes de aplicar esta mezcla de concreto en un caso real, se recomienda hacer otros estudios que contemplen un muestreo más amplio de los tratamientos, ya que en esta investigación no fue posible aumentar el número de especímenes por la falta de financiamiento para la adquisición de los materiales; también se requiere del equipo necesario para hacer los ensayos, ya que en esta ocasión se tuvo que solicitar los servicios externos de un tercero para poder hacer los ensayos. También se recomienda ampliar el estudio de la mezcla en esfuerzos a flexión de acuerdo a las normas mexicanas, para hallar diferencias o similitudes en el comportamiento del concreto bajo esfuerzos flexionantes, estudios que por cuestiones de tiempo y recursos no fueron realizados en esta investigación.

Se puede realizar como línea de investigación a partir de este estudio, la caracterización de concretos con caucho reciclado, para hacer una tabla de proporcionamientos para diferentes resistencias a la compresión y características de los materiales. Asimismo, se pueden hacer estudios de comportamiento y resistencia del concreto con caucho trabajando en combinación con acero de refuerzo, para determinar las ventajas y desventajas que se observan con respecto a un concreto armado tradicional.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cano Serrano, E., Cerezo García, L., & Urbina Fraile, M.** (2006). *Valorización material y energética de neumáticos fuera de uso*. Madrid: Círculo de Innovación de Materiales, Tecnología Aeroespacial y Nanotecnología (CIMTAN).
- Castro, G.** (Diciembre de 2007). *Reutilización, Reciclado y Disposición final de Neumáticos*. Obtenido de Departamento de Ingeniería Mecánica F.I.U.B.A.: http://campus.fi.uba.ar/file.php/295/Material_Complementario/Reutilizacion_Reciclado_y_Disposicion_final_de_Neumatico.pdf
- Castro, G.** (Diciembre de 2008). *Materiales y compuestos para la industria del neumático*. Obtenido de Departamento de Ingeniería Mecánica F.I.U.B.A.: http://campus.fi.uba.ar/file.php/295/Material_Complementario/Materiales_y_Compuestos_para_la_Industria_del_Neumatico.pdf
- Escobedo, V.** (09 de Septiembre de 2010). *Cuánto contamina la quema de llantas y neumáticos*. Obtenido de <http://www.dforceblog.com/2010/09/20/cuanto-contamina-la-quema-de-llantas-y-neumaticos/>
- Geissman, T. A., & Sánchez Bellido, I.** (1973). *Principios de Química Orgánica*. Barcelona, España: Reverte.
- Gupta, T., Chaudhary, S., & Sharma, R. K.** (2014). Assessment of mechanical and durability properties of concrete containing waste rubber tire as fine aggregate. *Construction and Building Materials*, 562-574.
- Gutiérrez Avedoy, V. J., Ramírez Hernández, I. F., Encarnación Aguilar, G., & Medina Arévalo, A.** (2012). *Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), México.
- Harmsen, T. E.** (2005). *Diseño de Estructuras de Concreto Armado* (4ta. ed.). Lima, Perú: Fondo Editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú.



- Jian-he, X., Yong-chang, G., Li-sha, L., & Zhi-hong, X.** (2014). Compressive and flexural behaviours of a new steel-fibre-reinforced recycled aggregate concrete with crumb rubber. *Construction and Building Materials*, 263-272.
- Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., Panarese, W. C., & Tanesi, J.** (2004). *Diseño y Control de Mezclas de Concreto*. EE. UU.: Portland Cement Association.
- Lijuan, L., Shenghua, R., & Lan, Z.** (2014). Mechanical properties and constitutive equations of concrete containing a low volume of fire rubber particles. *Construction and Building Materials*, 291-308.
- López Arévalo, C. E., Díaz Palacios, R., López Arévalo, J. B., & Méndez de los Santos, N.** (2014). El caucho reciclado, como una alternativa sustentable en nuevos concretos. *Artículo en proceso de publicación*.
- Luján, J. C.** (2001). Contaminación ambiental y posibles daños a la salud causados por la quema de neumáticos en la vía pública. *Revista médica*, 91-101.
- Marques, A. M., Correia, J. R., & de Brito, J.** (2013). Post-fire residual mechanical properties of concrete made with recycled rubber aggregate. *Fire Safety Journal*, 49-57.
- Royano, V., Valls, S., Barra, M., & Vázquez, E.** (2011). Estudio de hormigones con adición de polvo de neumático fuera de uso (NFU). *Jornada de Recerca i Innovación a l'Escola de Camins*.
- Su, H., Yang, J., Ling, T.-C., Ghataora, G. S., & Dirar, S.** (2014). Properties of concrete prepared with waste tyre rubber articles of uniform and varying sizes. *Journal of Cleaner Production*.
- Viue Studio S. L.** (Febrero de 2017). *Los neumáticos, grandes contaminantes*. Obtenido de Ecología verde: <http://www.ecologiaverde.com/neumaticos-grandes-contaminantes/#ixzz4Y2yjEBIY>

ANEXOS

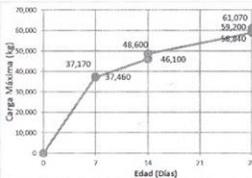
1. Reportes de resistencias a la compresión elaborados por el laboratorio
2. Reportes y gráficos del ANOVA y la prueba de Tukey a los 7, 14 y 28 días, realizados por el software MINITAB 17.1.0
3. Cálculos manuales del valor crítico de la prueba de Tukey para los tratamientos del ANOVA, a los 7, 14 y 28 días.



ANEXO 1

Reportes de resistencias a la compresión elaborados por el laboratorio

	CMG LABORATORIO PARA CONSTRUCCION	F-REC-01
	INFORME DE RESISTENCIA A LA COMPRESION DE CILINDROS DE CONCRETO	

OBRA: ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE CONCRETO CON PARTICULAS DE CAUCHO										ELEMENTO MUESTRA "T"			
UBICACION: VILLAHERMOSA, TABASCO.										FECHA DE ENTREGA: 19-abr.-16			
CONTRATISTA: INSTITUTO TECNOLOGICO DE VILLAHERMOSA										FOLIO: 7-CMG12-16			
DOMICILIO: CARRETERA VHSA - FRONTERA KM 3.5 CD INDUSTRIAL.													
DATOS DEL MUESTREO													
FECHA DE MUESTREO	MUESTRA No	PROVEEDOR DEL CONCRETO	TIPO DE CEMENTO	TIPO DE CONCRETO	F'c kg/cm ²	ADITIVO UTILIZADO	TAMAÑO MÁXIMO DEL AGREGADO	REVENIMIENTO (cm)					
21-mar.-16	1	HECHO EN OBRA	CPC 30	NORMAL A 28 DIAS	300	S/A	19 mm	DE PROYECTO		EN OBRA			
MUESTRA: 12 13													
DATOS DEL ENSAYE													
CILINDRO No	EDAD DIAS	FECHA DE ENSAYE	PESO DEL CILINDRO kg	DIAMETRO cm	ALTURA cm	AREA cm ²	VOLUMEN cm ³	VOLUMEN DEL CILINDRO kg/m ³	CARGA MÁXIMA		RESISTENCIA A LA COMPRESION		% DE LA RESISTENCIA
									kgf	N	kgf/cm ²	MPa	
1	7	28-mar.-16	12.370	15.00	30.10	176.72	5.319	2.326	37,460	367,483	212	20.79	71
2	7	28-mar.-16	12.270	14.70	30.10	169.72	5.108	2.402	37,170	364,638	219	21.48	73
3	14	4-abr.-16	12.220	14.80	30.20	172.03	5.195	2.352	46,100	452,241	268	26.28	89
4	14	4-abr.-16	12.290	15.00	30.10	176.72	5.319	2.311	48,600	476,766	275	26.97	92
5	28	18-abr.-16	12.270	15.00	30.00	176.72	5.301	2.314	58,840	577,220	333	32.65	111
6	28	18-abr.-16	12.290	15.00	30.20	176.72	5.337	2.303	59,200	580,752	335	32.85	112
7	28	18-abr.-16	12.330	15.10	30.10	179.08	5.390	2.287	61,070	599,097	341	33.44	114
METODOS DE PRUEBAS APLICADOS: NMX-C-083-ONNCCE-2014, NMX-C-109-ONNCCE-2013, NMX-C-156-ONNCCE-2010, NMX-C-160-ONNCCE-2004, NMX-C-181-ONNCCE-2013													
OBSERVACIONES LA MUESTRA ENSAYADA CUMPLE CON EL F'c DE PROYECTO													
JEFE DE LABORATORIO / COORDINADOR DE LABORATORIO ING. SERGIO A. CELESTINO COVARRUBIAS				GERENTE GENERAL ING. ANGEL DE JESUS MOLINA LAZARO				DIRECTOR GENERAL ING. ARTURO MEZQUITA PEREZ					
CIRCULO LAGUNA EL TOCOAL, MANZANA 4, LOTE 13, FRACC. LAGUNAS, VILLAHERMOSA, CENTRO, TABASCO													

LOS RESULTADOS DEL PRESENTE INFORME SE REFIEREN A LA MUESTRA Y EL ESPECIMEN ENSAYADO
 PROHIBIDA LA REPRODUCCION Y/O MODIFICACION TOTAL O PARCIAL DEL PRESENTE INFORME.

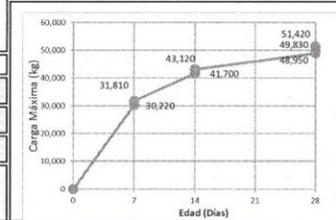
Revisión:	Vigente a partir de:	Página 1 de 1
06	01 DE JULIO DE 2014	



	CMG LABORATORIO PARA CONSTRUCCION	F-REC-01
	INFORME DE RESISTENCIA A LA COMPRESION DE CILINDROS DE CONCRETO	

OBRA: ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE CONCRETO CON PARTICULAS DE CAUCHO UBICACION: VILLAHERMOSA, TABASCO. CONTRATISTA: INSTITUTO TECNOLÓGICO DE VILLAHERMOSA DOMICILIO: CARRETERA VHSA.- FRONTERA KM 3.5 CD INDUSTRIAL.	ELEMENTO MUESTRA "A" FECHA DE ENTREGA: 20-abr.-16 FOLIO: 14-CMG12-16
---	---

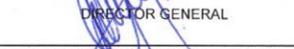
DATOS DEL MUESTREO									
FECHA DE MUESTREO	MUESTRA No	PROVEEDOR DEL CONCRETO	TIPO DE CEMENTO	TIPO DE CONCRETO	F'c kg/cm ²	ADITIVO UTILIZADO	TAMAÑO MÁXIMO DEL AGREGADO	REVENIMIENTO (cm)	
								DE PROYECTO	EN OBRA
22-mar.-16	2	HECHO EN OBRA	CPC 30	NORMAL A 28 DIAS	300	S/A	19 mm	12	13



DATOS DEL ENSAYE													
CILINDRO No	EDAD DIAS	FECHA DE ENSAYE	PESO DEL CILINDRO kg	DIAMETRO cm	ALTURA cm	AREA cm ²	VOLUMEN cm ³	Y VOLUM. DEL CILINDRO kg/m ³	CARGA MÁXIMA		RESISTENCIA A LA COMPRESION		% DE LA RESISTENCIA
									kgf	N	kgf/cm ²	MPa	
8	7	29-mar.-16	12.210	15.00	30.00	176.72	5,301	2.303	30,220	296,458	171	16.77	57
9	7	29-mar.-16	12.230	15.00	30.20	176.72	5,337	2.292	31,810	312,056	180	17.65	60
10	14	5-abr.-16	12.200	15.00	30.00	176.72	5,301	2.301	41,700	409,077	236	23.14	79
11	14	5-abr.-16	12.290	15.00	30.10	176.72	5,319	2.311	43,120	423,007	244	23.93	81
12	28	19-abr.-16	12.300	15.00	30.10	176.72	5,319	2.312	48,950	480,200	277	27.16	92
13	28	19-abr.-16	12.200	15.00	29.90	176.72	5,284	2.309	49,830	488,832	282	27.65	94
14	28	19-abr.-16	12.320	15.00	30.00	176.72	5,301	2.324	51,420	504,430	291	28.54	97

MÉTODOS DE PRUEBAS APLICADOS: NMX-C-083-ONNCCE-2014, NMX-C-109-ONNCCE-2013, NMX-C-156-ONNCCE-2010, NMX-C-160-ONNCCE-2004, NMX-C-161-ONNCCE-2013

OBSERVACIONES
 LA MUESTRA ENSAYADA EVOLUCIONA SATISFACTORIAMENTE, LA MUESTRA ENSAYADA NO CUMPLE CON EL F'c DE PROYECTO.

JEFE DE LABORATORIO / COORDINADOR DE LABORATORIO  ING. SERGIO A. CELESTINO COVARRUBIAS	GERENTE GENERAL  ING. ANGEL DE JESUS MOLINA LAZARO	DIRECTOR GENERAL  ING. ARTURO MEZQUITA PEREZ
---	--	---

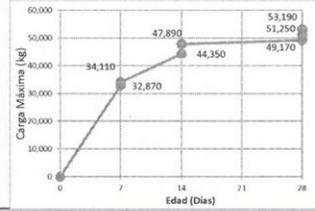
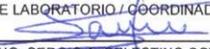
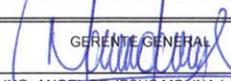
CIRCUITO LAGUNA EL TOCOAL, MANZANA 4J, LOTE 13, FRACC. LAGUNAS, VILLAHERMOSA, CENTRO, TABASCO

LOS RESULTADOS DEL PRESENTE INFORME SE REFIEREN A LA MUESTRA Y EL ESPECIMEN ENSAYADO.
 PROHIBIDA LA REPRODUCCION Y/O MODIFICACION TOTAL O PARCIAL DEL PRESENTE INFORME.

Revisión: 06	Vigente a partir de: 01 DE JULIO DE 2014	Página 1 de 1
-----------------	---	---------------



 Servicios, Proyectos y Construcciones	CMG LABORATORIO PARA CONSTRUCCION	F-REC-01
	INFORME DE RESISTENCIA A LA COMPRESION DE CILINDROS DE CONCRETO	

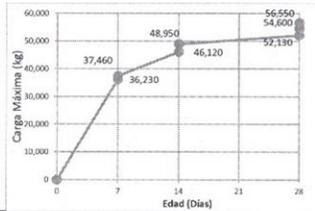
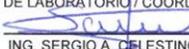
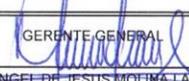
OBRA: ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE CONCRETO CON PARTICULAS DE CAUCHO										ELEMENTO			
UBICACION: VILLAHERMOSA, TABASCO.										MUESTRA "B"			
CONTRATISTA: INSTITUTO TECNOLÓGICO DE VILLAHERMOSA										FECHA DE ENTREGA:	FOLIO:		
DOMICILIO: CARRETERA VHSA.- FRONTERA KM 3.5 CD INDUSTRIAL.										23-abr.-16	21-CMG12-16		
DATOS DEL MUESTREO													
FECHA DE MUESTREO	MUESTRA No	PROVEEDOR DEL CONCRETO	TIPO DE CEMENTO	TIPO DE CONCRETO	F'c kg/cm ²	ADITIVO UTILIZADO	TAMAÑO MAXIMO DEL AGREGADO	REVENIMIENTO (cm)					
								DE PROYECTO	EN OBRA				
25-mar.-16	3	HECHO EN OBRA	CPC 30	NORMAL A 28 DIAS	300	S/A	19 mm	12	12				
DATOS DEL ENSAYE													
CILINDRO No	EDAD DIAS	FECHA DE ENSAYE	PESO DEL CILINDRO kg	DIAMETRO cm	ALTURA cm	AREA cm ²	VOLUMEN cm ³	Y VOLUM. DEL CILINDRO kg/m ³	CARGA MAXIMA		RESISTENCIA A LA COMPRESION		% DE LA RESISTENCIA
									kgf	N	kgf/cm ²	MPa	
15	7	1-abr.-16	12.360	15.00	30.00	176.72	5.301	2.331	32,870	322,455	186	18.24	62
16	7	1-abr.-16	12.220	15.00	29.90	176.72	5.284	2.313	34,110	334,619	193	18.93	64
17	14	8-abr.-16	12.270	15.00	30.10	176.72	5.319	2.307	44,350	435,074	251	24.61	84
18	14	8-abr.-16	12.290	15.00	30.00	176.72	5.301	2.318	47,890	469,801	271	26.58	90
19	28	22-abr.-16	12.170	14.90	29.90	174.37	5.214	2.334	49,170	482,358	282	27.65	94
20	28	22-abr.-16	12.210	15.00	30.00	176.72	5.301	2.303	51,250	502,763	290	28.44	97
21	28	22-abr.-16	12.180	15.00	30.00	176.72	5.301	2.297	53,190	521,794	301	29.52	100
METODOS DE PRUEBAS APLICADOS: NMX-C-083-ONNCC-2014, NMX-C-109-ONNCC-2013, NMX-C-156-ONNCC-2010, NMX-C-160-ONNCC-2004, NMX-C-161-ONNCC-2013													
OBSERVACIONES													
LA MUESTRA ENSAYADA CUMPLE CON EL F'C DE PROYECTO													
JEFE DE LABORATORIO / COORDINADOR DE LABORATORIO  ING. SERGIO A. CELESTINO COVARRUBIAS				GERENTE GENERAL  ING. ANGEL DE JESUS MOLINA LAZARO				DIRECTOR GENERAL  ING. ARTURO MEZQUITA PEREZ					
CIRCUITO LAGUNA EL TOCOAL, MANZANA 4J, LOTE 13, FRACC. LAGUNAS, VILLAHERMOSA, CENTRO, TABASCO													

LOS RESULTADOS DEL PRESENTE INFORME SE REFIEREN A LA MUESTRA Y EL ESPECIMEN ENSAYADO.
 PROHIBIDA LA REPRODUCCION Y/O MODIFICACION TOTAL O PARCIAL DEL PRESENTE INFORME.

Revisión:	Vigente a partir de:	Página 1 de 1
06	01 DE JULIO DE 2014	



	CMG LABORATORIO PARA CONSTRUCCION	F-REC-01
	INFORME DE RESISTENCIA A LA COMPRESION DE CILINDROS DE CONCRETO	

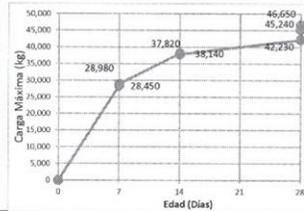
OBRA: ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE CONCRETO CON PARTICULAS DE CAUCHO UBICACION: VILLAHERMOSA, TABASCO CONTRATISTA: INSTITUTO TECNOLÓGICO DE VILLAHERMOSA DOMICILIO: CARRETERA VHSA.- FRONTERA KM 3.5 CD INDUSTRIAL.										ELEMENTO MUESTRA "C"			
										FECHA DE ENTREGA: 23-abr.-16	FOLIO: 28-CMG12-16		
													
DATOS DEL MUESTREO													
FECHA DE MUESTREO	MUESTRA No	PROVEEDOR DEL CONCRETO	TIPO DE CEMENTO	TIPO DE CONCRETO	F'c kg/cm ²	ADITIVO UTILIZADO	TAMAÑO MÁXIMO DEL AGREGADO	REVENIMIENTO (cm)					
25-mar.-16	4	HECHO EN OBRA	CPC 30	NORMAL A 28 DIAS	300	S/A	19 mm	12	12				
DATOS DEL ENSAYE													
CILINDRO No	EDAD DIAS	FECHA DE ENSAYE	PESO DEL CILINDRO kg	DIAMETRO cm	ALTURA cm	AREA cm ²	VOLUMEN cm ³	Y VOLUM. DEL CILINDRO kg/m ³	CARGA MAXIMA		RESISTENCIA A LA COMPRESION		% DE LA RESISTENCIA
									kgf	N	kgf/cm ²	MPa	
22	7	1-abr.-16	12.260	15.00	30.00	176.72	5,301	2.313	36,230	355,416	205	20.11	68
23	7	1-abr.-16	12.230	15.00	30.00	176.72	5,301	2.307	37,460	367,483	212	20.79	71
24	14	8-abr.-16	12.270	15.00	30.00	176.72	5,301	2.314	46,120	452,437	261	25.59	87
25	14	8-abr.-16	12.150	15.00	29.90	176.72	5,284	2.299	48,950	480,200	277	27.16	92
26	28	22-abr.-16	12.190	15.00	29.90	176.72	5,284	2.307	52,130	511,395	295	28.93	98
27	28	22-abr.-16	12.180	15.00	30.00	176.72	5,301	2.297	54,600	535,626	309	30.30	103
28	28	22-abr.-16	12.250	15.00	29.90	176.72	5,284	2.318	56,550	554,756	320	31.38	107
MÉTODOS DE PRUEBAS APLICADOS: NMX-C-083-ONNCCE-2014, NMX-C-109-ONNCCE-2013, NMX-C-156-ONNCCE-2010, NMX-C-160-ONNCCE-2004, NMX-C-161-ONNCCE-2013													
OBSERVACIONES LA MUESTRA ENSAYADA CUMPLE CON EL F'c DE PROYECTO													
JEFE DE LABORATORIO / COORDINADOR DE LABORATORIO  ING. SERGIO A. CELESTINO COVARRUBIAS				GERENTE GENERAL  ING. ANGEL DE JESUS MOLINA LAZARO				DIRECTOR GENERAL  ING. ARTURO MEZQUITA PEREZ					

LOS RESULTADOS DEL PRESENTE INFORME SE REFIEREN A LA MUESTRA Y EL ESPECIMEN ENSAYADO.
 PROHIBIDA LA REPRODUCCION Y/O MODIFICACION TOTAL O PARCIAL DEL PRESENTE INFORME.

Revisión:	Vigente a partir de:	Página 1 de 1
06	01 DE JULIO DE 2014	



 Servicios, Proyectos y Construcciones	CMG LABORATORIO PARA CONSTRUCCION	F-REC-01
	INFORME DE RESISTENCIA A LA COMPRESION DE CILINDROS DE CONCRETO	

OBRA: ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE CONCRETO CON PARTICULAS DE CAUCHO										ELEMENTO MUESTRA "D"			
UBICACION: VILLAHERMOSA, TABASCO.										FECHA DE ENTREGA: 6-may.-16		FOLIO: 35-CMG12-16	
CONTRATISTA: INSTITUTO TECNOLOGICO DE VILLAHERMOSA													
DOMICILIO: CARRETERA VHSA.- FRONTERA KM 3.5 CD INDUSTRIAL.													
DATOS DEL MUESTREO													
FECHA DE MUESTREO	MUESTRA No	PROVEEDOR DEL CONCRETO	TIPO DE CEMENTO	TIPO DE CONCRETO	F'c kg/cm ²	ADITIVO UTILIZADO	TAMAÑO MAXIMO DEL AGREGADO	REVENIMIENTO (cm)					
7-abr.-16	5	HECHO EN OBRA	CPC 30	NORMAL A 28 DIAS	300	S/A	19 mm	DE PROYECTO	EN OBRA				
								12	13				
DATOS DEL ENSAYE													
CILINDRO No	EDAD DIAS	FECHA DE ENSAYE	PESO DEL CILINDRO kg	DIAMETRO cm	ALTURA cm	AREA cm ²	VOLUMEN cm ³	Y VOLUM. DEL CILINDRO kg/m ³	CARGA MAXIMA		RESISTENCIA A LA COMPRESION		% DE LA RESISTENCIA
									kgf	N	kgf/cm ²	MPa	
29	7	14-abr.-16	12.140	15.00	29.90	176.72	5.284	2.298	28,450	279,095	161	15.79	54
30	7	14-abr.-16	12.300	15.00	30.10	176.72	5.319	2.312	28,980	284,294	164	16.08	55
31	14	21-abr.-16	12.300	15.10	30.20	179.08	5.408	2.274	38,140	374,153	213	20.89	71
32	14	21-abr.-16	12.160	15.00	30.00	176.72	5.301	2.294	37,820	371,014	214	20.99	71
33	28	5-may.-16	12.210	15.00	30.20	176.72	5.337	2.288	42,230	414,276	239	23.44	80
34	28	5-may.-16	12.140	15.00	30.00	176.72	5.301	2.290	45,240	443,804	256	25.11	85
35	28	5-may.-16	12.160	15.00	30.10	176.72	5.319	2.286	46,650	457,637	264	25.89	88
METODOS DE PRUEBAS APLICADOS: NMX-C-083-ONNCC-2014, NMX-C-109-ONNCC-2013, NMX-C-156-ONNCC-2010, NMX-C-160-ONNCC-2004, NMX-C-161-ONNCC-2013													
OBSERVACIONES													
LA MUESTRA ENSAYADA EVOLUCIONA SATISFACTORIAMENTE, LA MUESTRA ENSAYADA NO CUMPLE CON EL F'c DE PROYECTO													
JEFE DE LABORATORIO / COORDINADOR DE LABORATORIO ING. SERGIO A. CELESTINO COVARRUBIAS			GERENTE GENERAL ING. ANGEL DE JESUS MOLINA LAZARO				DIRECTOR GENERAL ING. ARTURO MEZQUITA PEREZ						
CIRCUITO LAGUNA EL TOCOAL, MANZANA 4J, LOTE 1B, FRACC. LAGUNAS, VILLAHERMOSA, CENTRO, TABASCO													

LOS RESULTADOS DEL PRESENTE INFORME SE REFIEREN A LA MUESTRA Y EL ESPECIMEN ENSAYADO.
 PROHIBIDA LA REPRODUCCION Y/O MODIFICACION TOTAL O PARCIAL DEL PRESENTE INFORME.

Revisión:	Vigente a partir de:	Página 1 de 1
06	01 DE JULIO DE 2014	



 CMG LABORATORIO PARA CONSTRUCCION Servicios, Proyectos y Construcciones	F-REC-01
	INFORME DE RESISTENCIA A LA COMPRESION DE CILINDROS DE CONCRETO

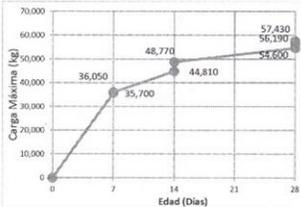
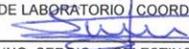
OBRA: ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE CONCRETO CON PARTICULAS DE CAUCHO UBICACION: VILLAHERMOSA, TABASCO. CONTRATISTA: INSTITUTO TECNOLÓGICO DE VILLAHERMOSA DOMICILIO: CARRETERA VHSA.- FRONTERA KM 3.5 CD INDUSTRIAL.										ELEMENTO MUESTRA "E"			
										FECHA DE ENTREGA: 7-may.-16	FOLIO: 42-CMG12-16		
DATOS DEL MUESTREO													
FECHA DE MUESTREO 8-abr.-16	MUESTRA No 6	PROVEEDOR DEL CONCRETO HECHO EN OBRA	TIPO DE CEMENTO CPC 30	TIPO DE CONCRETO NORMAL A 28 DIAS	F'c kg/cm ² 300	ADITIVO UTILIZADO S/A	TAMAÑO MÁXIMO DEL AGREGADO 19 mm	REVENIMIENTO (cm)					
								DE PROYECTO 12	EN OBRA 13				
DATOS DEL ENSAYE													
CILINDRO No	EDAD DIAS	FECHA DE ENSAYE	PESO DEL CILINDRO kg	DIAMETRO cm	ALTURA cm	AREA cm ²	VOLUMEN cm ³	Y VOLUM. DEL CILINDRO kg/m ³	CARGA MAXIMA		RESISTENCIA A LA COMPRESION		% DE LA RESISTENCIA
									kgf	N	kgf/cm ²	MPa	
36	7	15-abr.-16	12.230	15.00	29.90	176.72	5,284	2.315	31,450	308,525	178	17.45	59
37	7	15-abr.-16	12.090	15.00	29.90	176.72	5,284	2.288	32,510	318,923	184	18.04	61
38	14	22-abr.-16	12.150	14.90	29.80	174.37	5,196	2.338	39,060	383,179	224	21.97	75
39	14	22-abr.-16	12.170	15.00	30.00	176.72	5,301	2.296	42,060	412,609	238	23.34	79
40	28	6-may.-16	12.130	15.00	30.00	176.72	5,301	2.288	48,770	478,434	276	27.06	92
41	28	6-may.-16	12.120	15.00	30.00	176.72	5,301	2.286	49,480	485,399	280	27.46	93
42	28	6-may.-16	12.180	15.00	30.10	176.72	5,319	2.290	50,360	494,032	285	27.95	95
METODOS DE PRUEBAS APLICADOS: NMX-C-083-ONNCCE-2014, NMX-C-109-ONNCCE-2013, NMX-C-156-ONNCCE-2010, NMX-C-160-ONNCCE-2004, NMX-C-161-ONNCCE-2013													
OBSERVACIONES													
LA MUESTRA ENSAYADA EVOLUCIONA SATISFACTORIAMENTE, LA MUESTRA ENSAYADA NO CUMPLE CON EL F'C DE PROYECTO.													
JEFE DE LABORATORIO / COORDINADOR DE LABORATORIO ING. SERGIO A. CELESTINO COVARRUBIAS				GERENTE GENERAL ING. ANGEL DE JESUS MOLINA LAZARO				DIRECTOR GENERAL ING. ARTURO MEZQUITA PEREZ					

LOS RESULTADOS DEL PRESENTE INFORME SE REFIEREN A LA MUESTRA Y EL ESPECIMEN ENSAYADO.
 PROHIBIDA LA REPRODUCCION Y/O MODIFICACION TOTAL O PARCIAL DEL PRESENTE INFORME.

Revisión: 06	Vigente a partir de: 01 DE JULIO DE 2014	Página 1 de 1
-----------------	---	---------------



	CMG LABORATORIO PARA CONSTRUCCION	F-REC-01
	INFORME DE RESISTENCIA A LA COMPRESION DE CILINDROS DE CONCRETO	

OBRA: ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE CONCRETO CON PARTICULAS DE CAUCHO										ELEMENTO			
UBICACION: VILLAHERMOSA, TABASCO.										MUESTRA "F"			
CONTRATISTA: INSTITUTO TECNOLÓGICO DE VILLAHERMOSA										FECHA DE ENTREGA: 10-may.-16	FOLIO: 49-CM612-16		
DOMICILIO: CARRETERA VHSA.- FRONTERA KM 3.5 CD INDUSTRIAL.													
DATOS DEL MUESTREO													
FECHA DE MUESTREO	MUESTRA No	PROVEEDOR DEL CONCRETO	TIPO DE CEMENTO	TIPO DE CONCRETO	F'c kg/cm ²	ADITIVO UTILIZADO	TAMAÑO MÁXIMO DEL AGREGADO	REVENIMIENTO (cm)					
								DE PROYECTO	EN OBRA				
11-abr.-16	7	HECHO EN OBRA	CPC 30	NORMAL A 28 DIAS	300	S/A	19 mm	12	11				
DATOS DEL ENSAYE													
CILINDRO No	EDAD DIAS	FECHA DE ENSAYE	PESO DEL CILINDRO kg	DIAMETRO cm	ALTURA cm	AREA cm ²	VOLUMEN cm ³	Y VOLUM. DEL CILINDRO kg/m ³	CARGA MÁXIMA		RESISTENCIA A LA COMPRESION		% DE LA RESISTENCIA
									kgf	N	kgf/cm ²	MPa	
43	7	18-abr.-16	12.080	15.00	29.90	176.72	5,284	2.286	35,700	350,217	202	19.81	67
44	7	18-abr.-16	12.110	15.00	29.90	176.72	5,284	2.292	36,050	353,651	204	20.01	68
45	14	25-abr.-16	12.300	14.90	29.80	174.37	5,196	2.367	44,810	439,586	257	25.20	86
46	14	25-abr.-16	12.130	15.00	30.00	176.72	5,301	2.288	48,770	478,434	276	27.06	92
47	28	9-may.-16	12.090	15.00	30.00	176.72	5,301	2.281	54,600	535,626	309	30.30	103
48	28	9-may.-16	12.280	15.00	30.00	176.72	5,301	2.316	56,190	551,224	318	31.18	106
49	28	9-may.-16	12.080	15.00	30.10	176.72	5,319	2.271	57,430	563,388	325	31.87	108
METODOS DE PRUEBAS APLICADOS: NMX-C-083-ONNCCE-2014, NMX-C-109-ONNCCE-2013, NMX-C-156-ONNCCE-2010, NMX-C-160-ONNCCE-2004, NMX-C-161-ONNCCE-2013													
OBSERVACIONES													
LA MUESTRA ENSAYADA CUMPLE CON EL F'c DE PROYECTO													
JEFE DE LABORATORIO  ING. SERGIO A. CELESTINO COVARRUBIAS			COORDINADOR DE LABORATORIO _____ _____			GERENTE GENERAL  ING. ANGEL DE JESUS MOLINA LAZARO			DIRECTOR GENERAL  ING. ARTURO MEZQUITA PEREZ				
CIRCUITO LAGUNA EL TOCAL, MANZANA 4J, LOTE 13, FRACC. LAGUNAS, VILLAHERMOSA, CENTRO, TABASCO													

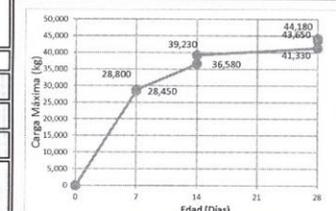
LOS RESULTADOS DEL PRESENTE INFORME SE REFIEREN A LA MUESTRA Y EL ESPECIMEN ENSAYADO.
 PROHIBIDA LA REPRODUCCION Y/O MODIFICACION TOTAL O PARCIAL DEL PRESENTE INFORME.

Revisión: 06	Vigente a partir de: 01 DE JULIO DE 2014	Página 1 de 1
-----------------	---	---------------



	CMG LABORATORIO PARA CONSTRUCCION	F-REC-01
	INFORME DE RESISTENCIA A LA COMPRESION DE CILINDROS DE CONCRETO	

OBRA: ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE CONCRETO CON PARTICULAS DE CAUCHO UBICACION: VILLAHERMOSA, TABASCO. CONTRATISTA: INSTITUTO TECNOLÓGICO DE VILLAHERMOSA DOMICILIO: CARRETERA VHSA.- FRONTERA KM 3.5 CD INDUSTRIAL.	ELEMENTO MUESTRA "G"
FECHA DE ENTREGA: 11-may.-16 FOLIO: 56-CMG12-16	



DATOS DEL MUESTREO										
FECHA DE MUESTREO	MUESTRA No	PROVEEDOR DEL CONCRETO	TIPO DE CEMENTO	TIPO DE CONCRETO	F'c kg/cm ²	ADITIVO UTILIZADO	TAMAÑO MÁXIMO DEL AGREGADO	REVENIMIENTO (cm)		
								DE PROYECTO	EN OBRA	
12-abr.-16	8	HECHO EN OBRA	CPC 30	NORMAL A 28 DIAS	300	S/A	19 mm	12	13	

DATOS DEL ENSAYE													
CILINDRO No	EDAD DIAS	FECHA DE ENSAYE	PESO DEL CILINDRO kg	DIAMETRO cm	ALTURA cm	AREA cm ²	VOLUMEN cm ³	Y VOLUM. DEL CILINDRO kg/m ³	CARGA MÁXIMA		RESISTENCIA A LA COMPRESION		% DE LA RESISTENCIA
									kgf	N	kgf/cm ²	MPa	
50	7	19-abr.-16	12.140	15.00	30.00	176.72	5,301	2.290	28,450	279,095	161	15.79	54
51	7	19-abr.-16	12.300	15.00	29.90	176.72	5,284	2.328	28,800	282,528	163	15.98	54
52	14	26-abr.-16	12.300	15.00	30.10	176.72	5,319	2.312	36,580	358,850	207	20.30	69
53	14	26-abr.-16	12.160	15.00	30.10	176.72	5,319	2.286	39,230	384,846	222	21.77	74
54	28	10-may.-16	12.210	14.90	30.00	174.37	5,231	2.334	41,330	405,447	237	23.24	79
55	28	10-may.-16	12.140	15.00	30.00	176.72	5,301	2.290	43,650	428,207	247	24.22	82
56	28	10-may.-16	12.160	15.00	30.10	176.72	5,319	2.286	44,180	433,406	250	24.52	83

MÉTODOS DE PRUEBAS APLICADOS: NMX-C-083-ONNCE-2014, NMX-C-109-ONNCE-2013, NMX-C-156-ONNCE-2010, NMX-C-160-ONNCE-2004, NMX-C-161-ONNCE-2013

OBSERVACIONES
 LA MUESTRA ENSAYADA EVOLUCIONA SATISFACTORIAMENTE, LA MUESTRA ENSAYADA NO CUMPLE CON EL F'c DE PROYECTO

JEFE DE LABORATORIO / COORDINADOR DE LABORATORIO  ING. SERGIO CELESTINO COVARRUBIAS	GERENTE GENERAL  ING. ANGEL DE JESUS MOLINA LAZARO	DIRECTOR GENERAL  ING. ARTURO MEZQUITA PEREZ
--	--	---

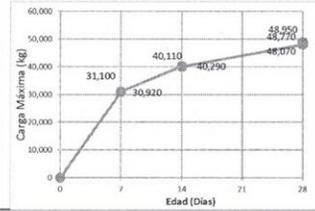
CIRCUITO LAGUNA EL TOCOAL, MANZANA 4J, LOTE 13, FRACC. LAGUNAS, VILLAHERMOSA, CENTRO, TABASCO

LOS RESULTADOS DEL PRESENTE INFORME SE REFIEREN A LA MUESTRA Y EL ESPECIMEN ENSAYADO.
 PROHIBIDA LA REPRODUCCION Y/O MODIFICACION TOTAL O PARCIAL DEL PRESENTE INFORME.

Revisión: 06	Vigente a partir de: 01 DE JULIO DE 2014	Página 1 de 1
-----------------	---	---------------



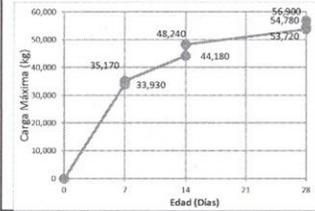
	CMG LABORATORIO PARA CONSTRUCCION	F-REC-01
	INFORME DE RESISTENCIA A LA COMPRESION DE CILINDROS DE CONCRETO	

OBRA: ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE CONCRETO CON PARTICULAS DE CAUCHO UBICACION: VILLAHERMOSA, TABASCO. CONTRATISTA: INSTITUTO TECNOLOGICO DE VILLAHERMOSA DOMICILIO: CARRETERA VHSA.- FRONTERA KM 3.5 CD INDUSTRIAL.										ELEMENTO MUESTRA "H"			
										FECHA DE ENTREGA: 12-may.-16	FOLIO: 63-CM612-16		
DATOS DEL MUESTREO													
FECHA DE MUESTREO	MUESTRA No	PROVEEDOR DEL CONCRETO	TIPO DE CEMENTO	TIPO DE CONCRETO	F'c kg/cm ²	ADITIVO UTILIZADO	TAMAÑO MAXIMO DEL AGREGADO	REVENIMIENTO (cm)					
								DE PROYECTO	EN OBRA				
13-abr-16	9	HECHO EN OBRA	CPC 30	NORMAL A 28 DIAS	300	S/A	19 mm	12	10				
DATOS DEL ENSAYE													
CILINDRO No	EDAD DIAS	FECHA DE ENSAYE	PESO DEL CILINDRO kg	DIAMETRO cm	ALTURA cm	AREA cm ²	VOLUMEN cm ³	VOLUMEN DEL CILINDRO kg/m ³	CARGA MAXIMA		RESISTENCIA A LA COMPRESION		% DE LA RESISTENCIA
									kgf	N	kgf/cm ²	MPa	
57	7	20-abr-16	12.100	15.00	29.90	176.72	5,284	2.290	30,920	303,325	175	17.16	58
58	7	20-abr-16	12.080	15.00	30.00	176.72	5,301	2.279	31,100	305,091	176	17.26	59
59	14	27-abr-16	12.010	15.00	29.90	176.72	5,284	2.273	40,290	395,245	228	22.36	76
60	14	27-abr-16	12.070	14.90	30.00	174.37	5,231	2.307	40,110	393,479	230	22.56	77
61	28	11-may-16	12.050	15.00	30.00	176.72	5,301	2.273	48,070	471,567	272	26.68	91
62	28	11-may-16	12.070	15.00	30.10	176.72	5,319	2.269	48,770	478,434	276	27.06	92
63	28	11-may-16	12.060	15.00	30.00	176.72	5,301	2.275	48,950	480,200	277	27.16	92
METODOS DE PRUEBAS APLICADOS: NMX-C-083-ONNCC-2014, NMX-C-109-ONNCC-2013, NMX-C-156-ONNCC-2010, NMX-C-160-ONNCC-2004, NMX-C-161-ONNCC-2013													
OBSERVACIONES LA MUESTRA ENSAYADA EVOLUCIONA SATISFACTORIAMENTE, LA MUESTRA ENSAYADA NO CUMPLE CON EL F'c DE PROYECTO													
JEFE DE LABORATORIO / COORDINADOR DE LABORATORIO  ING. SERGIO A. CELESTINO COVARRUBIAS				GERENTE GENERAL  ING. ANGEL DE JESUS MOLINA LAZARO				DIRECTOR GENERAL  ING. ARTURO MEZOQUITA PEREZ					
LOS RESULTADOS DEL PRESENTE INFORME SE REFIEREN A LA MUESTRA Y EL ESPECIMEN ENSAYADO. PROHIBIDA LA REPRODUCCION Y/O MODIFICACION TOTAL O PARCIAL DEL PRESENTE INFORME.													

Revisión: 06	Vigente a partir de: 01 DE JULIO DE 2014	Página 1 de 1
-----------------	---	---------------



	CMG LABORATORIO PARA CONSTRUCCION	F-REC-01
	INFORME DE RESISTENCIA A LA COMPRESION DE CILINDROS DE CONCRETO	

OBRA: ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE CONCRETO CON PARTICULAS DE CAUCHO								ELEMENTO					
UBICACION: VILLAHERMOSA, TABASCO.								MUESTRA "I"					
CONTRATISTA: INSTITUTO TECNOLÓGICO DE VILLAHERMOSA								FECHA DE ENTREGA: 13-sep.-16	FOLIO: 70-CMG12-16				
DOMICILIO: CARRETERA VHSA.- FRONTERA KM 3.5 CD INDUSTRIAL.													
DATOS DEL MUESTREO													
FECHA DE MUESTREO	MUESTRA No	PROVEEDOR DEL CONCRETO	TIPO DE CEMENTO	TIPO DE CONCRETO	F'c kg/cm ²	ADITIVO UTILIZADO	TAMAÑO MAXIMO DEL AGREGADO	REVENIMIENTO (cm)					
15-ago.-16	10	HECHO EN OBRA	CPC 30	NORMAL A 28 DIAS	300	S/A	19 mm	DE PROYECTO	EN OBRA				
								12	12				
DATOS DEL ENSAYE													
CILINDRO No	EDAD DIAS	FECHA DE ENSAYE	PESO DEL CILINDRO kg	DIAMETRO cm	ALTURA cm	AREA cm ²	VOLUMEN cm ³	Y VOLUM. DEL CILINDRO kg/m ³	CARGA MAXIMA		RESISTENCIA A LA COMPRESION		% DE LA RESISTENCIA
									kgf	N	kgf/cm ²	MPa	
64	7	22-ago.-16	12.010	15.00	29.90	176.72	5,284	2.273	33,930	332,853	192	18.83	64
65	7	22-ago.-16	12.010	15.00	30.00	176.72	5,301	2.265	35,170	345,018	199	19.52	66
66	14	29-ago.-16	12.240	15.00	29.90	176.72	5,284	2.317	44,180	433,406	250	24.52	83
67	14	29-ago.-16	12.240	15.00	30.00	176.72	5,301	2.309	48,240	473,234	273	26.77	91
68	28	12-sep.-16	11.990	15.00	29.90	176.72	5,284	2.269	53,720	526,993	304	29.81	101
69	28	12-sep.-16	12.010	15.00	30.10	176.72	5,319	2.258	54,780	537,392	310	30.40	103
70	28	12-sep.-16	12.000	15.00	30.00	176.72	5,301	2.264	56,900	558,189	322	31.58	107
METODOS DE PRUEBAS APLICADOS: NMX-C-083-ONNCE-2014, NMX-C-109-ONNCE-2013, NMX-C-156-ONNCE-2010, NMX-C-160-ONNCE-2004, NMX-C-161-ONNCE-2013													
OBSERVACIONES													
LA MUESTRA ENSAYADA CUMPLE CON EL F'c DE PROYECTO													
JEFE DE LABORATORIO / COORDINADOR DE LABORATORIO ING. SERGIO A. CELESTINO COVARRUBIAS				GERENTE GENERAL ING. ANGEL DE JESUS MOLINA LAZARO				DIRECTOR GENERAL ING. ARTURO MEZQUITA PEREZ					
CIRCULO LAGUNA EL TOCOAL, MANZANA 41, LOTE 13, FRACC. LAGUNAS, VILLAHERMOSA, CENTRO, TABASCO													

LOS RESULTADOS DEL PRESENTE INFORME SE REFIEREN A LA MUESTRA Y EL ESPECIMEN ENSAYADO.
 PROHIBIDA LA REPRODUCCION Y/O MODIFICACION TOTAL O PARCIAL DEL PRESENTE INFORME.

Revisión:	Vigente a partir de:	Página 1 de 1
06	01 DE JULIO DE 2014	



ANEXO 2

Reportes y gráficos del ANOVA y la prueba de Tukey a los 7, 14 y 28 días, realizados por el software MINITAB 17.1.0

20-04-17 09:10:30 a. m.

Bienvenido a Minitab, presione F1 para obtener ayuda.

Resultados para: Resistencias - 7 días.MTW

ANOVA unidireccional: T, A, B, C, D, E, F, G, H, I

Método

Hipótesis nula Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna Por lo menos una media es diferente
Nivel de significancia $\alpha = 0.05$

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor

Factor Niveles Valores
Factor 10 T, A, B, C, D, E, F, G, H, I

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Sec.	Contribución	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	9	6269.0	97.43%	6269.0	696.56	42.09	0.000
Error	10	165.5	2.57%	165.5	16.55		
Total	19	6434.5	100.00%				



Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	PRESS	R-cuad. (pred)
4.06817	97.43%	95.11%	662	89.71%

Medias

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
T	2	215.50	4.95	(209.09, 221.91)
A	2	175.50	6.36	(169.09, 181.91)
B	2	189.50	4.95	(183.09, 195.91)
C	2	208.50	4.95	(202.09, 214.91)
D	2	162.50	2.12	(156.09, 168.91)
E	2	181.00	4.24	(174.59, 187.41)
F	2	203.00	1.41	(196.59, 209.41)
G	2	162.00	1.41	(155.59, 168.41)
H	2	175.500	0.707	(169.090, 181.910)
I	2	195.50	4.95	(189.09, 201.91)

Desv.Est. agrupada = 4.06817

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Factor	N	Media	Agrupación
T	2	215.50	A
C	2	208.50	A B
F	2	203.00	A B C
I	2	195.50	B C D
B	2	189.50	C D E
E	2	181.00	D E
H	2	175.500	E F
A	2	175.50	E F
D	2	162.50	F
G	2	162.00	F

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.



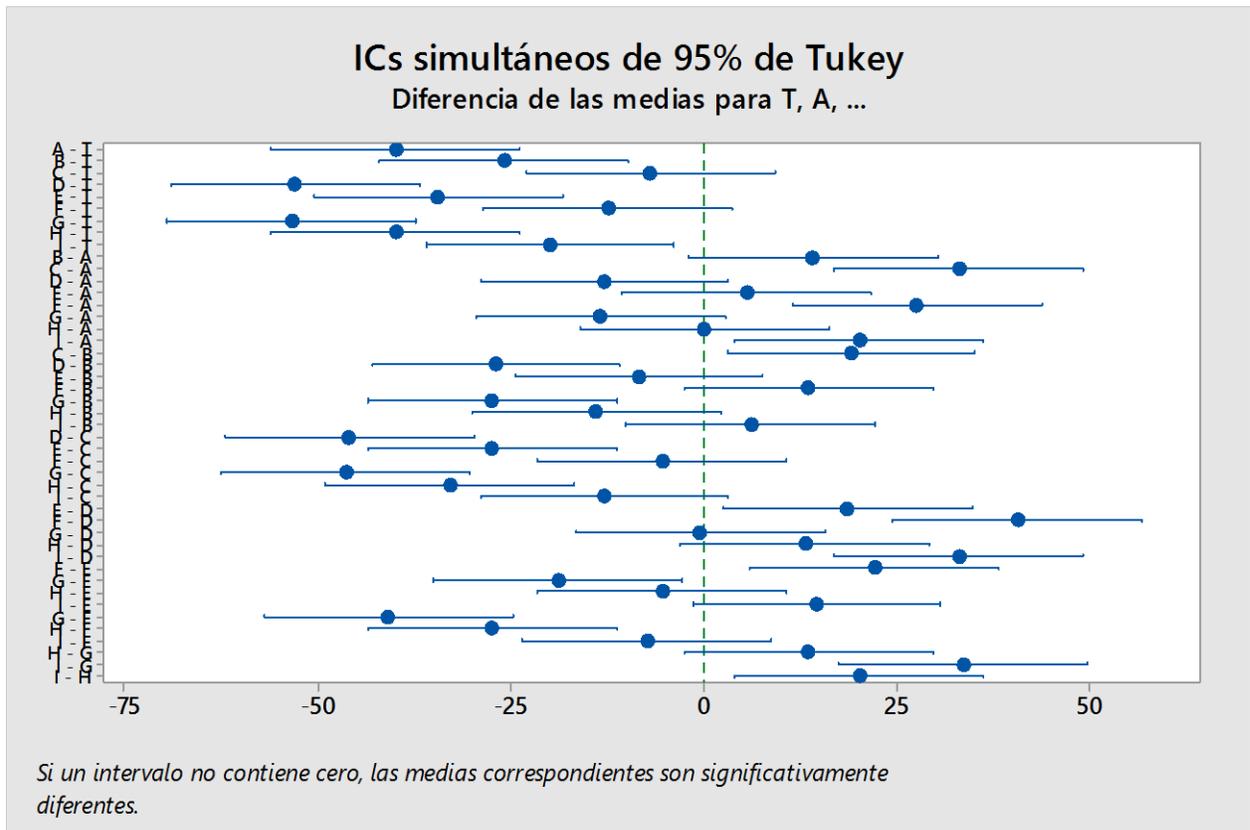
Pruebas simultáneas de Tukey para diferencias de las medias

Diferencia					
Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	EE de diferencia	IC de 95%	Valor T	Valor p ajustado
A - T	-40.00	4.07	(-56.11, -23.89)	-9.83	0.000
B - T	-26.00	4.07	(-42.11, -9.89)	-6.39	0.002
C - T	-7.00	4.07	(-23.11, 9.11)	-1.72	0.765
D - T	-53.00	4.07	(-69.11, -36.89)	-13.03	0.000
E - T	-34.50	4.07	(-50.61, -18.39)	-8.48	0.000
F - T	-12.50	4.07	(-28.61, 3.61)	-3.07	0.175
G - T	-53.50	4.07	(-69.61, -37.39)	-13.15	0.000
H - T	-40.00	4.07	(-56.11, -23.89)	-9.83	0.000
I - T	-20.00	4.07	(-36.11, -3.89)	-4.92	0.013
B - A	14.00	4.07	(-2.11, 30.11)	3.44	0.105
C - A	33.00	4.07	(16.89, 49.11)	8.11	0.000
D - A	-13.00	4.07	(-29.11, 3.11)	-3.20	0.148
E - A	5.50	4.07	(-10.61, 21.61)	1.35	0.918
F - A	27.50	4.07	(11.39, 43.61)	6.76	0.001
G - A	-13.50	4.07	(-29.61, 2.61)	-3.32	0.125
H - A	0.00	4.07	(-16.11, 16.11)	0.00	1.000
I - A	20.00	4.07	(3.89, 36.11)	4.92	0.013
C - B	19.00	4.07	(2.89, 35.11)	4.67	0.018
D - B	-27.00	4.07	(-43.11, -10.89)	-6.64	0.001
E - B	-8.50	4.07	(-24.61, 7.61)	-2.09	0.568
F - B	13.50	4.07	(-2.61, 29.61)	3.32	0.125
G - B	-27.50	4.07	(-43.61, -11.39)	-6.76	0.001
H - B	-14.00	4.07	(-30.11, 2.11)	-3.44	0.105
I - B	6.00	4.07	(-10.11, 22.11)	1.47	0.875
D - C	-46.00	4.07	(-62.11, -29.89)	-11.31	0.000
E - C	-27.50	4.07	(-43.61, -11.39)	-6.76	0.001
F - C	-5.50	4.07	(-21.61, 10.61)	-1.35	0.918
G - C	-46.50	4.07	(-62.61, -30.39)	-11.43	0.000
H - C	-33.00	4.07	(-49.11, -16.89)	-8.11	0.000
I - C	-13.00	4.07	(-29.11, 3.11)	-3.20	0.148
E - D	18.50	4.07	(2.39, 34.61)	4.55	0.022
F - D	40.50	4.07	(24.39, 56.61)	9.96	0.000
G - D	-0.50	4.07	(-16.61, 15.61)	-0.12	1.000
H - D	13.00	4.07	(-3.11, 29.11)	3.20	0.148



Diferencia						
Diferencia de niveles	de las medias	EE de diferencia	IC de 95%	Valor T	Valor p ajustado	
I - D	33.00	4.07	(16.89, 49.11)	8.11	0.000	
F - E	22.00	4.07	(5.89, 38.11)	5.41	0.007	
G - E	-19.00	4.07	(-35.11, -2.89)	-4.67	0.018	
H - E	-5.50	4.07	(-21.61, 10.61)	-1.35	0.918	
I - E	14.50	4.07	(-1.61, 30.61)	3.56	0.088	
G - F	-41.00	4.07	(-57.11, -24.89)	-10.08	0.000	
H - F	-27.50	4.07	(-43.61, -11.39)	-6.76	0.001	
I - F	-7.50	4.07	(-23.61, 8.61)	-1.84	0.701	
H - G	13.50	4.07	(-2.61, 29.61)	3.32	0.125	
I - G	33.50	4.07	(17.39, 49.61)	8.23	0.000	
I - H	20.00	4.07	(3.89, 36.11)	4.92	0.013	

Nivel de confianza individual = 99.73%



Resultados para: Resistencias - 14 días.MTW

ANOVA unidireccional: T, A, B, C, D, E, F, G, H, I

Método

Hipótesis nula Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna Por lo menos una media es diferente
Nivel de significancia $\alpha = 0.05$

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor

Factor Niveles Valores
Factor 10 T, A, B, C, D, E, F, G, H, I

Análisis de Varianza

				SC					
Fuente	GL	SC	Sec.	Contribución	Ajust.	MC	Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	9		9325	89.94%	9325		1036.1	9.94	0.001
Error	10		1043	10.06%	1043		104.3		
Total	19		10368	100.00%					

Resumen del modelo

		R-cuad.		R-cuad.
S	R-cuad.	(ajustado)	PRESS	(pred)
10.2103	89.94%	80.90%	4170	59.78%



Medias

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
T	2	271.50	4.95	(255.41, 287.59)
A	2	240.00	5.66	(223.91, 256.09)
B	2	261.0	14.1	(244.9, 277.1)
C	2	269.00	11.31	(252.91, 285.09)
D	2	213.500	0.707	(197.413, 229.587)
E	2	231.00	9.90	(214.91, 247.09)
F	2	266.50	13.44	(250.41, 282.59)
G	2	214.50	10.61	(198.41, 230.59)
H	2	229.00	1.41	(212.91, 245.09)
I	2	261.5	16.3	(245.4, 277.6)

Desv.Est. agrupada = 10.2103

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Factor	N	Media	Agrupación
T	2	271.50	A
C	2	269.00	A B
F	2	266.50	A B
I	2	261.5	A B
B	2	261.0	A B
A	2	240.00	A B C
E	2	231.00	B C
H	2	229.00	B C
G	2	214.50	C
D	2	213.500	C

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.



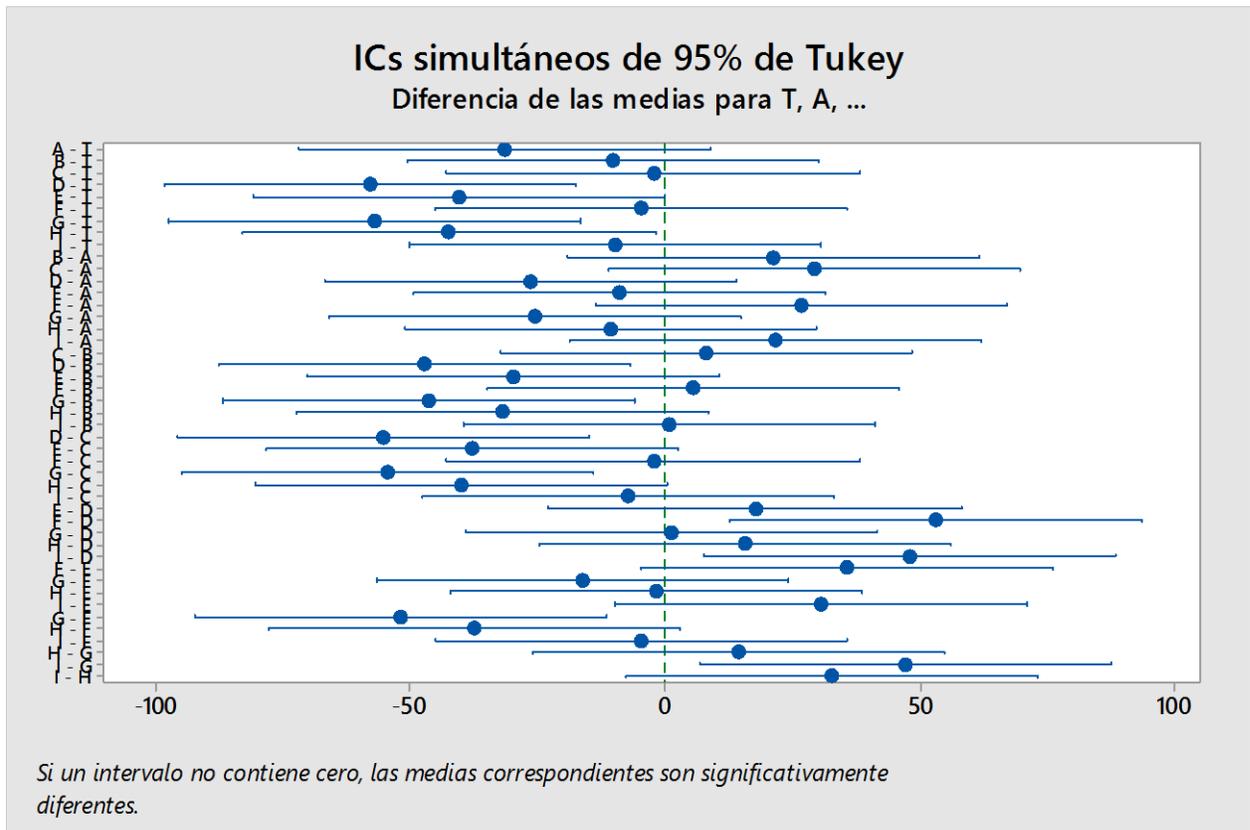
Pruebas simultáneas de Tukey para diferencias de las medias

Diferencia de niveles	Diferencia		IC de 95%	Valor T	Valor p ajustado
	de las medias	EE de diferencia			
A - T	-31.5	10.2	(-71.9, 8.9)	-3.09	0.172
B - T	-10.5	10.2	(-50.9, 29.9)	-1.03	0.982
C - T	-2.5	10.2	(-42.9, 37.9)	-0.24	1.000
D - T	-58.0	10.2	(-98.4, -17.6)	-5.68	0.005
E - T	-40.5	10.2	(-80.9, -0.1)	-3.97	0.049
F - T	-5.0	10.2	(-45.4, 35.4)	-0.49	1.000
G - T	-57.0	10.2	(-97.4, -16.6)	-5.58	0.005
H - T	-42.5	10.2	(-82.9, -2.1)	-4.16	0.037
I - T	-10.0	10.2	(-50.4, 30.4)	-0.98	0.987
B - A	21.0	10.2	(-19.4, 61.4)	2.06	0.586
C - A	29.0	10.2	(-11.4, 69.4)	2.84	0.239
D - A	-26.5	10.2	(-66.9, 13.9)	-2.60	0.326
E - A	-9.0	10.2	(-49.4, 31.4)	-0.88	0.994
F - A	26.5	10.2	(-13.9, 66.9)	2.60	0.326
G - A	-25.5	10.2	(-65.9, 14.9)	-2.50	0.367
H - A	-11.0	10.2	(-51.4, 29.4)	-1.08	0.977
I - A	21.5	10.2	(-18.9, 61.9)	2.11	0.559
C - B	8.0	10.2	(-32.4, 48.4)	0.78	0.997
D - B	-47.5	10.2	(-87.9, -7.1)	-4.65	0.019
E - B	-30.0	10.2	(-70.4, 10.4)	-2.94	0.210
F - B	5.5	10.2	(-34.9, 45.9)	0.54	1.000
G - B	-46.5	10.2	(-86.9, -6.1)	-4.55	0.021
H - B	-32.0	10.2	(-72.4, 8.4)	-3.13	0.161
I - B	0.5	10.2	(-39.9, 40.9)	0.05	1.000
D - C	-55.5	10.2	(-95.9, -15.1)	-5.44	0.006
E - C	-38.0	10.2	(-78.4, 2.4)	-3.72	0.070
F - C	-2.5	10.2	(-42.9, 37.9)	-0.24	1.000
G - C	-54.5	10.2	(-94.9, -14.1)	-5.34	0.007
H - C	-40.0	10.2	(-80.4, 0.4)	-3.92	0.053
I - C	-7.5	10.2	(-47.9, 32.9)	-0.73	0.998
E - D	17.5	10.2	(-22.9, 57.9)	1.71	0.768
F - D	53.0	10.2	(12.6, 93.4)	5.19	0.009
G - D	1.0	10.2	(-39.4, 41.4)	0.10	1.000
H - D	15.5	10.2	(-24.9, 55.9)	1.52	0.858



Diferencia					
Diferencia de niveles	de las medias	EE de diferencia	IC de 95%	Valor T	Valor p ajustado
I - D	48.0	10.2	(7.6, 88.4)	4.70	0.017
F - E	35.5	10.2	(-4.9, 75.9)	3.48	0.100
G - E	-16.5	10.2	(-56.9, 23.9)	-1.62	0.816
H - E	-2.0	10.2	(-42.4, 38.4)	-0.20	1.000
I - E	30.5	10.2	(-9.9, 70.9)	2.99	0.197
G - F	-52.0	10.2	(-92.4, -11.6)	-5.09	0.010
H - F	-37.5	10.2	(-77.9, 2.9)	-3.67	0.075
I - F	-5.0	10.2	(-45.4, 35.4)	-0.49	1.000
H - G	14.5	10.2	(-25.9, 54.9)	1.42	0.895
I - G	47.0	10.2	(6.6, 87.4)	4.60	0.020
I - H	32.5	10.2	(-7.9, 72.9)	3.18	0.150

Nivel de confianza individual = 99.73%



Resultados para: Resistencias - 28 días.MTW

ANOVA unidireccional: T, A, B, C, D, E, F, G, H, I

Método

Hipótesis nula Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna Por lo menos una media es diferente
Nivel de significancia $\alpha = 0.05$

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor

Factor Niveles Valores
Factor 10 T, A, B, C, D, E, F, G, H, I

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC	Sec.	Contribución	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	9	22469		94.13%	22469	2496.60	35.63	0.000
Error	20	1401		5.87%	1401	70.07		
Total	29	23871		100.00%				

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. PRESS	R-cuad. (pred)
8.37058	94.13%	91.49%	3153	86.79%



Medias

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
T	3	336.33	4.16	(326.25, 346.41)
A	3	283.33	7.09	(273.25, 293.41)
B	3	291.00	9.54	(280.92, 301.08)
C	3	308.00	12.53	(297.92, 318.08)
D	3	253.00	12.77	(242.92, 263.08)
E	3	280.33	4.51	(270.25, 290.41)
F	3	317.33	8.02	(307.25, 327.41)
G	3	244.67	6.81	(234.59, 254.75)
H	3	275.00	2.65	(264.92, 285.08)
I	3	312.00	9.17	(301.92, 322.08)

Desv.Est. agrupada = 8.37058

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Factor	N	Media	Agrupación
T	3	336.33	A
F	3	317.33	A B
I	3	312.00	B C
C	3	308.00	B C
B	3	291.00	C D
A	3	283.33	D
E	3	280.33	D
H	3	275.00	D E
D	3	253.00	E F
G	3	244.67	F

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.



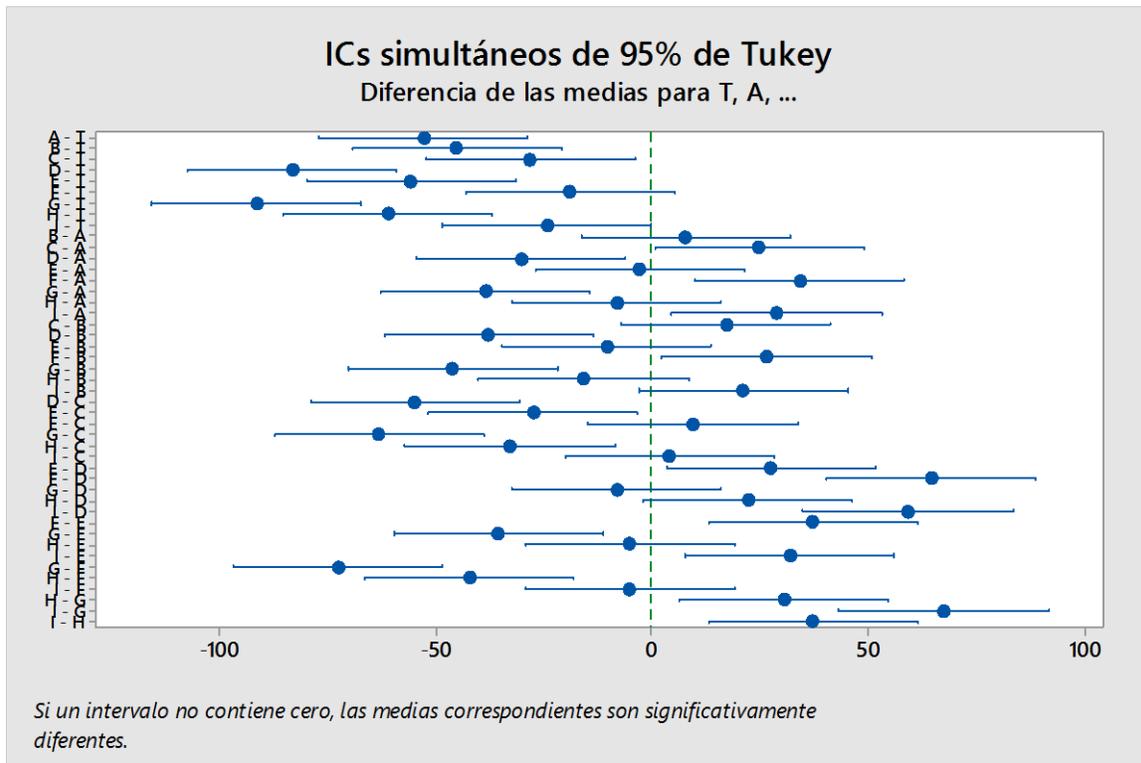
Pruebas simultáneas de Tukey para diferencias de las medias

Diferencia de niveles	Diferencia		IC de 95%	Valor T	Valor p ajustado
	de las medias	EE de diferencia			
A - T	-53.00	6.83	(-77.21, -28.79)	-7.75	0.000
B - T	-45.33	6.83	(-69.55, -21.12)	-6.63	0.000
C - T	-28.33	6.83	(-52.55, -4.12)	-4.15	0.014
D - T	-83.33	6.83	(-107.55, -59.12)	-12.19	0.000
E - T	-56.00	6.83	(-80.21, -31.79)	-8.19	0.000
F - T	-19.00	6.83	(-43.21, 5.21)	-2.78	0.209
G - T	-91.67	6.83	(-115.88, -67.45)	-13.41	0.000
H - T	-61.33	6.83	(-85.55, -37.12)	-8.97	0.000
I - T	-24.33	6.83	(-48.55, -0.12)	-3.56	0.048
B - A	7.67	6.83	(-16.55, 31.88)	1.12	0.976
C - A	24.67	6.83	(0.45, 48.88)	3.61	0.044
D - A	-30.33	6.83	(-54.55, -6.12)	-4.44	0.007
E - A	-3.00	6.83	(-27.21, 21.21)	-0.44	1.000
F - A	34.00	6.83	(9.79, 58.21)	4.97	0.002
G - A	-38.67	6.83	(-62.88, -14.45)	-5.66	0.001
H - A	-8.33	6.83	(-32.55, 15.88)	-1.22	0.960
I - A	28.67	6.83	(4.45, 52.88)	4.19	0.013
C - B	17.00	6.83	(-7.21, 41.21)	2.49	0.331
D - B	-38.00	6.83	(-62.21, -13.79)	-5.56	0.001
E - B	-10.67	6.83	(-34.88, 13.55)	-1.56	0.851
F - B	26.33	6.83	(2.12, 50.55)	3.85	0.026
G - B	-46.33	6.83	(-70.55, -22.12)	-6.78	0.000
H - B	-16.00	6.83	(-40.21, 8.21)	-2.34	0.407
I - B	21.00	6.83	(-3.21, 45.21)	3.07	0.124
D - C	-55.00	6.83	(-79.21, -30.79)	-8.05	0.000
E - C	-27.67	6.83	(-51.88, -3.45)	-4.05	0.017
F - C	9.33	6.83	(-14.88, 33.55)	1.37	0.924
G - C	-63.33	6.83	(-87.55, -39.12)	-9.27	0.000
H - C	-33.00	6.83	(-57.21, -8.79)	-4.83	0.003
I - C	4.00	6.83	(-20.21, 28.21)	0.59	1.000
E - D	27.33	6.83	(3.12, 51.55)	4.00	0.019
F - D	64.33	6.83	(40.12, 88.55)	9.41	0.000
G - D	-8.33	6.83	(-32.55, 15.88)	-1.22	0.960
H - D	22.00	6.83	(-2.21, 46.21)	3.22	0.094



Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	EE de diferencia	IC de 95%	Valor T	Valor p ajustado
I - D	59.00	6.83	(34.79, 83.21)	8.63	0.000
F - E	37.00	6.83	(12.79, 61.21)	5.41	0.001
G - E	-35.67	6.83	(-59.88, -11.45)	-5.22	0.001
H - E	-5.33	6.83	(-29.55, 18.88)	-0.78	0.998
I - E	31.67	6.83	(7.45, 55.88)	4.63	0.005
G - F	-72.67	6.83	(-96.88, -48.45)	-10.63	0.000
H - F	-42.33	6.83	(-66.55, -18.12)	-6.19	0.000
I - F	-5.33	6.83	(-29.55, 18.88)	-0.78	0.998
H - G	30.33	6.83	(6.12, 54.55)	4.44	0.007
I - G	67.33	6.83	(43.12, 91.55)	9.85	0.000
I - H	37.00	6.83	(12.79, 61.21)	5.41	0.001

Nivel de confianza individual = 99.80%



ANEXO 3

Cálculos manuales del valor crítico de la prueba de Tukey para los tratamientos del ANOVA, a los 7, 14 y 28 días.

La fórmula de cálculo del valor crítico de la prueba de Tukey es la siguiente:

$$T_{\alpha} = q_{\alpha}(k, N - k) \sqrt{\frac{CM_E}{n_i}}$$

donde:

CM_E = Cuadrado medio del error

n_i = Número de observaciones por tratamiento

k = Número de tratamientos

$N - k$ = Grados de libertad para el error

α = Nivel de significancia prefijado

$q_{\alpha}(k, N - k)$ = Puntos porcentuales de la distribución del rango *estudentizado* (se obtiene por tablas)

A. Valor crítico de la prueba de Tukey para especímenes ensayados a los 7 días

VALOR CRÍTICO DE LA PRUEBA DE TUKEY (7 DÍAS)					
CM_E	n_i	k	$N - k$	α	$q_{\alpha}(k, N - k)$
16.55	2	10	10	0.05	5.60
CÁLCULOS					
$T_{0.05} = 5.60 \sqrt{\frac{16.55}{2}} = 5.60 \sqrt{8.275} = 5.60(2.877) = 16.11$					

B. Valor crítico de la prueba de Tukey para especímenes ensayados a los 14 días

VALOR CRÍTICO DE LA PRUEBA DE TUKEY (14 DÍAS)					
CM_E	n_i	k	$N - k$	α	$q_\alpha(k, N - k)$
104.25	2	10	10	0.05	5.60
CÁLCULOS					
$T_{0.05} = 5.60 \sqrt{\frac{104.25}{2}} = 5.60\sqrt{52.125} = 5.60(7.22) = 40.43$					

C. Valor crítico de la prueba de Tukey para especímenes ensayados a los 28 días

VALOR CRÍTICO DE LA PRUEBA DE TUKEY (28 DÍAS)					
CM_E	n_i	k	$N - k$	α	$q_\alpha(k, N - k)$
70.07	3	10	20	0.05	5.01
CÁLCULOS					
$T_{0.05} = 5.01 \sqrt{\frac{70.07}{3}} = 5.01\sqrt{23.36} = 5.01(4.833) = 24.21$					