

UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN

**DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO CON
ADICIÓN DE CAUCHO, RECICLADO DE LLANTAS,
PARA SU UTILIZACIÓN EN LA CONSTRUCCIÓN DE
UNIDADES ACUÍCOLAS**

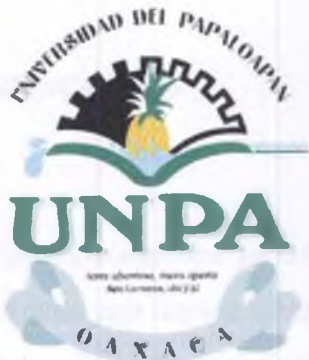
**Tesis Profesional para la obtención del Título de Ingeniero en Acuicultura
Presenta:**

ROCÍO LÓPEZ HINOJOSA

**Asesor:
DRA. LAURA PATRICIA RIVAS VÁZQUEZ**

**Coasesor:
M.C. EDWIN AQUINO BOLAÑOS**

LOMA BONITA, OAXACA, NOVIEMBRE 2014



UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN INGENIERÍA EN ACUICULTURA

LA PRESENTE TESIS TITULADA "DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO CON ADICION DE CAUCHO, RECICLADO DE LLANTAS, PARA SU UTILIZACION EN LA CONSTRUCCION DE UNIDADES ACUICOLAS", PRESENTADA POR LA PASANTE ROCÍO LÓPEZ HINOJOSA, BAJO LA ASESORIA DE LA DRA. LAURA PATRICIA RIVAS VÁZQUEZ, HA SIDO REVISADA Y ACEPTADA POR EL JURADO EXAMINADOR PARA SER DEFENDIDA EN EL EXAMEN PROFESIONAL Y OBTENER EL TÍTULO DE LICENCIADA EN INGENIERÍA EN ACUICULTURA.

JURADO EXAMINADOR

Laura Patricia Rivas Vázquez
DRA. LAURA PATRICIA RIVAS VAZQUEZ
ASESOR

M.C. EDWIN AQUINO BOLAÑOS
CO-ASESOR

DR. AXEL VILLAVICENCIO TORRES
REVISOR

M.C. RAUL MORENO DE LA TORRE
REVISOR

LOMA BONITA, OAXACA, NOVIEMBRE 2014.

DEDICATORIA

Este logro significa para mí, el término de un escalón en la escalera de la vida. Por supuesto, no atribuyo este logro a mi esfuerzo propio, sino a Dios y a todas las personas que estuvieron a mi lado, que de alguna manera me ayudaron a alcanzar este objetivo.

Esta tesis la dedico primeramente a Dios, por estar presente en mi vida a cada momento de manera incondicional, por ser mi esperanza y mi fuerza.

A las personas que han sido muy importantes en mi vida, que siempre me ayudaron con su ejemplo, apoyo y motivación. Que prefirieron sacrificarse ellos por darme a mí los medios para tener una carrera: Mis padres (Roberto y Ernestina) y hermanos.

A mi esposo Rodolfo y mi hijo Gamaliel por ser mi motivación, a mis suegros, a mi amiga Rosalía, al MVZ Madín, a los compañeros de servicio social que me apoyaron en la elaboración de las mezclas. La lista es larga de las personas a quien quisiera devolverles un poco de lo mucho que he recibido de ellos, que este espacio no sería suficiente para nombrarlos a todos.

¡A todos ustedes dedico este logro y les estaré siempre agradecida!

AGRADECIMIENTOS

A la **Universidad del Papaloapan**, por haberme brindado los apoyos y facilidades, con lo cual tuve la oportunidad de terminar una carrera universitaria.

Agradezco al **fondo sectorial CONAVI-CONACYT** por el apoyo económico brindado a través del proyecto **102139** para la adquisición de equipos, sin los cuales no hubiera sido posible realizar esta tesis. Agradezco también que me haya dado la oportunidad de participar como becario, lo cual fue de gran ayuda en la terminación de este proyecto.

A la **Dra. Laura Patricia Rivas Vázquez**, Asesora de tesis, que con paciencia y dedicación dirigió la presente tesis. Por su valiosa asesoría, motivación y por confiar en mí. Por darme la oportunidad de ser parte de este proyecto.

Al **M.C. Edwin Aquino Bolaños**, Co-asesor de tesis, por su colaboración y asesoría brindada en la estructura y revisión de este trabajo, gracias.

A los revisores de Tesis, **M.C. Raúl Moreno de la Torre** y **Dr. Axel Villavicencio Torres**.

Al MVZ Romel Jesús Ortiz Luna, gerente del COSIA AC, por su comprensión y por la disposición de tiempo concedido para que este trabajo pudiera llegar a culminarse.

A todos los profesores de la carrera de Ingeniería en Acuicultura, por ser parte medular en mi formación profesional. Gracias porque en su momento recibí de ustedes no sólo las cátedras que me formarían profesionalmente sino también orientación, amistad, comprensión. Gracias en especial a los profesores: Luis, Edwin, Raúl, Felipe, Juan Pablo y Cristóbal.

Resumen

Existen diversos materiales de construcción que se pueden usar para la fabricación de estanques de acuicultura. En las últimas décadas se está usando ampliamente el concreto como material de construcción y en la acuicultura no es la excepción.

El objetivo de este estudio fue elaborar diferentes proporcionamientos de mezcla de concreto adicionado con caucho, analizar el peso y los esfuerzos a la compresión y flexión y proponer como material de construcción a la mezcla que más se apegue a las solicitaciones de estanquería acuícola. Se partió de que los tipos de construcción usados en acuicultura, son normalmente muros y pisos para los cuales se especificó un requerimiento de 150 kgf/cm². Para cumplir con las especificaciones propuestas se hicieron proporcionamientos de mezclas, un diseño experimental factorial de 3 x 4 para el caso de la resistencia a la compresión y peso, en ambas variables los factores fueron: relación agua cemento (0.5, 0.6 y 0.7) e inclusión de caucho (0, 5 10 y 15 %). Se analizaron los datos de resistencia a la compresión y peso, el resultado de ambas variables fue determinante para el diseño experimental de resistencia a la flexión del concreto. Para la resistencia a la flexión se hizo un diseño experimental factorial de 2 x 2, los factores fueron relación agua cemento (0.5 y 0.6) e inclusión de caucho (0 y 10%), se eligieron estos niveles debido a que la media de la prueba de resistencia a la compresión a los 28 días de la relación agua/cemento 0.6 con inclusión de 10% de caucho fue de 167.067 kgf/cm², muy cercana a la resistencia a la compresión deseada. Se usó el paquete estadístico MINITAB 14 para la prueba de Kolmogorov-Smirnov de normalidad de datos, obteniendo un valor de $p > 0.150$. Las hipótesis de estudio fueron analizadas con el paquete estadístico SAS, obteniendo los siguientes resultados: Se encontraron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) de resistencia a la compresión en los niveles de relación agua/cemento (R a/c) y en el porcentaje de inclusión de caucho, así como en la interacción de ambos factores. La prueba Tukey de comparación de medias mostró diferencias significativas ($p \leq 0.05$) y 4 grupos diferentes de medias en la variable respuesta de resistencia a la compresión con el factor porcentaje de inclusión de caucho. Con respecto a la variable resistencia a la flexión, no se encontraron diferencias significativas ($p > 0.05$) en los niveles de porcentaje de inclusión de caucho; sin embargo, en los niveles de R a/c y en la interacción de estos factores sí se encontraron diferencias

significativas ($p \leq 0.05$). En la variable peso se encontraron diferencias significativas en los niveles de los factores R a/c y porcentaje de inclusión de caucho así como en la interacción de estos. En base a los resultados de las pruebas, la mezcla que se propone para ser usada en la construcción de estanques, es la mezcla con relación agua/cemento de 0.6 y 10% de inclusión de caucho, dado que esta mezcla tiene como promedio una resistencia de 167.067 kgf/cm².

Abstract

A variety of building materials can be used for making aquaculture ponds. In recent decades concrete has been widely used as a building material and is no exception in the construction of aquaculture ponds.

The objective of this study was to develop a concrete mixture with rubber added to the cement, analyze weight, compressive strength and flexion and to propose the mixture as the building material that most adheres to the solicitations aquaculture ponds. To begin with the construction types used in aquaculture are usually walls and floors of which a requirement of 150 kgf/cm^2 is specified. In order to comply with these specifications a proportioning of mixtures made were proposed, an experimental design with a factorial of 3×4 in the case of compression strength and weight, in both variables the factors were: a ratio of (0.5, 0.6 and 0.7) water cement and an inclusion of (0, 5, 10 and 15%) rubber. Data compression strength and weight were also analyzed; the result of both variables was decisive for the experimental design of resistance of flexion of concrete. For the resistance of flexion another experimental design with the factorial of 2×2 was made, the factors were a ratio of (0.5 and 0.6) water/cement and an inclusion of (0 and 10%) rubber, these levels were chosen due to the average of the test compressive strength at 28 days with a ratio of 0.6 water/cement and an inclusion of 10% rubber was of 167.067 kgf/cm^2 , very close to the resistance of the compression desired. The statistical package MINITAB 14 was used to test normality data of the Kolmogorov-Smirnov, obtaining a value of $p > 0.150$. The hypothesis of the study variables were analyzed with the SAS statistical package, obtaining the following results: significant differences were found ($p \leq 0.05$) in compressive strength in the levels of ratios of (R w/c) water/cement and rubber inclusion percentage as well as the interaction of both factors. The Tukey test for comparison of means showed significant differences ($p \leq 0.05$) and 4 different groups of means in the variable response of compressive strength with the factor of rubber inclusion percentage. With respect to the variable resistance to flexion there was not a significant difference found ($p > 0.05$) in the levels of rubber inclusion percentage; however, in the levels of R w/c and the interaction of these factors there were significant differences. Significant differences in the variable weight were also found in the levels of the factors R w/c and rubber inclusion percentage as

well as in the interaction of them. Based on test results, the mixture that is proposed to be used in pond construction is the mixture with a ratio of 0.6 water/cement and 10% inclusion of rubber, since this mixture has an average resistance of 167.067 kgf/cm².

Contenido

LISTA DE TABLAS	IX
LISTA DE FIGURAS.....	X
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 MARCO TEÓRICO.....	3
CAPÍTULO I. EL CONCRETO COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN Y SUS COMPONENTES	3
Cemento	3
Agregados	4
Agua.....	6
CAPÍTULO II: EL CAUCHO DE LLANTAS UTILIZADO COMO AGREGADO EN EL CONCRETO	8
Principales componentes de las llantas	8
CAPÍTULO III: PROPORCIONAMIENTO DE MEZCLAS DE CONCRETO	10
Elección de las características de la mezcla.....	10
Método Americano de Selección de Proporciones de la Mezcla (ACI)	15
CAPÍTULO IV: PROPIEDADES DEL CONCRETO	18
Propiedades del concreto fresco o recién mezclado.....	18
Propiedades del concreto endurecido.....	19
Pruebas de control de calidad y buenas prácticas en concreto fresco	20
Pruebas de control de calidad y buenas prácticas concreto endurecido.....	22
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	25
1.3 JUSTIFICACIÓN	25
1.4 ANTECEDENTES	26
1.5 HIPÓTESIS GENERAL	27
1.5.1 Hipótesis particulares.....	27
1.6 OBJETIVOS	27
2. MATERIALES Y MÉTODOS	29
Cálculos y supuestos preliminares a la elaboración de mezclas.	29
Determinación del proporcionamiento de mezclas usando como referencia el método ACI	31
Diseño de Experimento	35
a) Resistencia a la compresión	35

b)	Resistencia a la flexión.....	36
c)	Peso volumétrico del concreto fresco.....	37
	Elaboración y ensayo de especímenes de prueba.....	37
a)	Cilindros.....	37
b)	Vigas	38
3.	RESULTADOS.....	40
a)	Muestreo de los agregados.....	40
a)	Cálculo del módulo de finura.....	40
b)	Pruebas de resistencia a la compresión.....	41
c)	Pruebas de resistencia a la flexión	44
d)	Peso.....	45
4.	DISCUSIÓN	47
5.	CONCLUSIONES	48
6.	RECOMENDACIONES.....	48
7.	BIBLIOGRAFÍA	49

LISTA DE TABLAS

TABLA 1: CLASIFICACIÓN DE LOS CEMENTOS POR TIPO Y CLASE SEGÚN LA NORMA NMX-C-414-ONNCCE-2004	4
TABLA 2 COMPOSICIÓN DE LAS LLANTAS	9
TABLA 3: COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS CENIZAS DE LLANTAS INCINERADAS.....	9
TABLA 4: RELACIONES AGUA-CEMENTO MÁXIMAS PARA DIVERSAS CONDICIONES DE EXPOSICIÓN	12
TABLA 5: RELACIÓN ENTRE LA RELACIÓN AGUA-CEMENTO Y LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL CONCRETO A LOS 28 DÍAS (KG/CM ²)(REFERENCIA ACI 211.1-91)	12
TABLA 6: EJEMPLO DE MEZCLAS DE PRUEBA PARA CONCRETO SIN AIRE INCLUIDO DE CONSISTENCIA MEDIA, REVENIMIENTO DE 7.5 A 10 CM (TOMADO Y ADAPTADO DE STEVEN H. K. Y W. C. PANARESE, 1992).	13
TABLA 7: REVENIMIENTOS RECOMENDADOS PARA DIVERSOS TIPOS DE CONSTRUCCIÓN. REFERENCIA ACI 211.1-91.....	14
TABLA 8: REQUISITOS APROXIMADOS DE AGUA DE MEZCLADO Y CONTENIDO DE AIRE PARA DIFERENTES REVENIMIENTOS Y TAMAÑOS NOMINALES MÁXIMOS DE AGREGADOS EN EL ACI 211.1-91, ADAPTADO POR NEVILLE A.M., 1999	16
TABLA 9: ESFUERZO DE COMPRESIÓN EN LAS PAREDES DE LOS ESTANQUES	30
TABLA 10: DISEÑO EXPERIMENTAL DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN A 28 DÍAS.....	36
TABLA 11: DATOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN PROMEDIO DE CILINDROS DE CONCRETO A LOS 28 DÍAS (KGF/CM ²).....	42
TABLA 12: CUADRO ANOVA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	43
TABLA 13: COMPARACIÓN DE MEDIAS CON DATOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.....	43
TABLA 14: DATOS DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN CON VIGAS DE CONCRETO	44
TABLA 15: CUADRO ANOVA DE LA PRUEBA DE FLEXIÓN	44
TABLA 16: PESO VOLUMÉTRICO (KG) DE LOS CILINDROS DE PRUEBA CON SUS RESPECTIVOS PORCENTAJES DE CAUCHO Y DE RELACIÓN AGUA /CEMENTO.	45
TABLA 17: CUADRO ANOVA PARA EL PESO	45
TABLA 18: CUADRO DE COMPARACIÓN DE MEDIAS DE PESO VOLUMÉTRICO	46

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: LAS CURVAS INDICAN LOS LÍMITES ESPECIFICADOS EN LA NORMA ASTM C 33, PARA AGREGADO FINO Y PARA UN TAMAÑO DE AGREGADO GRUESO TÍPICO (FIGURA TOMADA DEL LIBRO: DISEÑO Y CONTROL DE MEZCLAS DE CONCRETO. STEVEN H. K. Y W. C. PANARESE. 1992).	6
FIGURA 2: CONO DE ABRAMS.	22
FIGURA 3: PROTOTIPO DE ESTANQUE CIRCULAR.	29
FIGURA 4: PRUEBA DE REVENIMIENTO	31
FIGURA 5: AGREGADOS. A) AGREGADO FINO (CAUCHO), B) AGREGADO GRUESO (GRAVA), C) AGREGADO FINO (ARENA), D) CUARTEO.	32
FIGURA 6: GRANULOMETRÍA. TAMICES	33
FIGURA 7: VIGAS DE 60 X 15 X 15 CM.	39
FIGURA 8: VIGA DE PRUEBA CON APLICACIÓN DE UNA CARGA EN LOS TERCIOS.	39
FIGURA 9: CURVAS DE GRANULOMETRÍA ELABORADAS CON DATOS DE LOS AGREGADOS DE PRUEBA	40
FIGURA 10: RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CONCRETO	41
FIGURA 11: RESISTENCIAS PROMEDIO DE LOS ESPECÍMENES DE PRUEBA A DIFERENTES RELACIONES AGUA/CEMENTO.	42
FIGURA 12: PESO VOLUMÉTRICO PROMEDIO DE LOS ESPECÍMENES A DIFERENTES RELACIONES AGUA-CEMENTO E INCLUSIÓN DE CAUCHO.	46

1. INTRODUCCIÓN

Los primeros indicios de acuicultura se realizaron en forma de encierros dentro del medio natural, posteriormente se lograron cultivos fuera de los cauces naturales, en sistemas extensivos (FAO 2003). La FAO define varios tipos de acuicultura, basándose en la tecnología de producción utilizada. Las definiciones de acuicultura comúnmente empleadas son las que se refieren a la acuicultura extensiva e intensiva, dependiendo del grado de tecnología empleada se definen otras variantes. La tecnología a emplear depende de varios factores, de los cuales los principales son: la especie a cultivar, factores climatológicos, sociales, ambientales y económicos (Castello Orvay F., 1993).

Actualmente la acuicultura representa el segmento de mayor crecimiento dentro de la agricultura y la industria de producción de alimentos animales, principalmente en China y el resto de Asia donde se lleva a cabo más del 90 por ciento de la producción global de acuicultura. En este escenario, la tendencia de la acuicultura, es depender lo menos posible del medio natural; en la alimentación, crías, reproductores y uso de los cauces naturales como medio de vida. En el afán de reducir los daños al ambiente surge la acuicultura sustentable, con la cual se pretende establecer un equilibrio ambiental, social y económico.

En la industria de la construcción también se han adoptado tecnologías innovadoras de sustentabilidad, donde se ha optado por el reciclaje, haciendo uso de los materiales de reciclaje como plástico, caucho y escombros (Gaggino Rosana, 2003; Abdel-Gawad *et al.*, 2010 y González G., 2007).

Las llantas de desecho han sido utilizadas ampliamente alrededor del mundo para construir arrecifes artificiales, por ser un material ampliamente disponible, bajo costo de adquisición, durable y con grandes espacios vacíos disponibles (Collins *et al.*, 2002).

En vías de desarrollar tecnologías amigables utilizando el reciclaje de llantas, en el presente trabajo se plantea evaluar las propiedades físicas de diferentes combinaciones de mezclas de concreto incluyendo en su composición, un porcentaje de caucho. Una vez evaluado las diferentes mezclas resultantes de las combinaciones propuestas, se propondrá la mezcla que cumpla con las características requeridas en estanques de concreto frecuentemente usados en la acuicultura.

No obstante, para determinar la idoneidad de un material para la construcción de estanques acuícolas se deben considerar otros factores como: disponibilidad del material, factibilidad económica, durabilidad, permeabilidad y su grado de toxicidad en los organismos que se cultiven en ellos.

1.1 MARCO TEÓRICO

CAPÍTULO I. EL CONCRETO COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN Y SUS COMPONENTES

El concreto es una mezcla de agregados y pasta. La pasta está compuesta de cemento portland, agua y aire que al unirse con los agregados (arena y grava) forma una pasta endurecida debido a la reacción química entre el cemento y el agua. Generalmente la pasta constituye del 25 al 40 por ciento del volumen total del concreto, dentro del cual el cemento puede ocupar del 7 al 15 por ciento, el agua entre el 14 y 21 por ciento y el aire incluido puede ser de hasta 8 por ciento, dependiendo del tamaño máximo del agregado grueso. Los agregados constituyen aproximadamente del 60 al 75 por ciento del volumen total del concreto.

Cemento

El cemento portland está compuesto principalmente de clinker, el cual contiene silicatos de calcio hidráulicos, aluminatos de calcio, aluminoferritos de calcio y diversas formas de calcio (yeso), adicionados en la molienda (Steven H. K. y W. C. Panarese, 1992). En la Tabla 1 se muestran los diferentes tipos de cemento.

Para fabricar el cemento se muele primero finamente la materia prima, se mezcla en las proporciones adecuadas y se calcina en un horno rotatorio a una temperatura aproximada de 1,450 °C y se funde parcialmente, formando bolas de clinker. El clinker se enfría y se tritura hasta obtener un polvo fino, al polvo se le adiciona yeso y el producto que resulta es el cemento portland que se usa a nivel mundial en la industria de la construcción (Matthew Neville A, 1998).

Tipos de cemento

Cemento Portland Ordinario (CPO): Es el cemento producido a base de clinker Portland y usualmente contiene sulfato de calcio.

Cemento Portland Puzolánico (CPP): Es el conglomerado hidráulico que resulta de la molienda de clinker Portland, materiales puzolánicos y usualmente contiene sulfato de calcio.

Cemento Portland con Escoria Granulada de alto horno (CPEG): Es el conglomerado hidráulico que resulta de la molienda conjunta de clinker Portland, escoria granulada de alto horno y usualmente contiene sulfato de calcio.

Tabla 1: Clasificación de los cementos por tipo y clase según la norma NMX-C-414-ONNCCE-2004

Tipo	Clase resistente	Características especiales
CPO	20	RS Resistente a los sulfatos
CPP	30	BRA Baja Reactividad Alkali agregado
CPEG	30 R	BCH Bajo calor de hidratación
CPC	40	B Blanco
CPS	40 R	-
CEG	-	-

CPO: Cemento portland ordinario; CPP: Cemento Portland puzolánico; CPEG: Cemento Portland con Escoria Granulada de alto horno; CPC: Cemento portland compuesto; CPS: cemento portland con humo de sílice; CEG: Cemento con escoria granulada de alto horno.

Agregados

Los agregados son un factor muy importante en las mezclas debido a que ocupan al menos tres cuartas partes del volumen del concreto, influyen en las propiedades del concreto recién mezclado y endurecido, en las proporciones de la mezcla y en la economía. Los agregados se dividen en finos y gruesos (Steven H. K. y W. C. Panarese, 1992).

Anteriormente los agregados eran considerados como material inerte, que se repartían en la pasta de cemento para economizar. Sin embargo, actualmente los agregados son considerados como un material de construcción que se unen cohesivamente con el concreto que no son inertes y sus propiedades físicas, térmicas y en ocasiones químicas, influyen en

el comportamiento del concreto. Con frecuencia los agregados son más baratos que el cemento por lo que en algunas mezclas con especificaciones menores de resistencia se pone más agregados que cemento. La economía no es la única característica que se favorece con la introducción de agregados a la pasta, sino que además se tiene mejor ventaja técnica, al darle mayor estabilidad volumétrica y más durabilidad que si se emplea únicamente pasta de cemento (Matthew Neville A., 1998).

Clasificación de los agregados

Se denomina granulometría a la distribución de los tamaños de las partículas de un agregado, la cual se determina mediante un análisis con tamices y el procedimiento normativo se describe en la American Society for Testing and Materials 136 (ASTM 136) y la Norma Oficial Mexicana NMX-C-077-1997-ONNCCE. El tamaño de partícula del agregado se determina con tamices de malla de alambre graduados. Los 7 tamices estándar ASTM C 33 para agregado fino con aberturas cuadradas que varían desde la malla No. 100 (150 micras) hasta 9.52 mm. Para el agregado grueso se usan tamices con aberturas que varían desde 1.18 mm hasta 102 mm, los tamaños de granulometría para el agregado grueso se aplican a las cantidades de agregado en porcentajes que pasan a través de un arreglo de mallas. En la Figura 1 se muestran las curvas de los límites especificados en la norma ASTM C 33, para agregado fino y para un tamaño de agregado grueso típico.

AGREGADOS FINOS: Los agregados finos consisten en arenas naturales o manufacturadas con tamaños de partícula de hasta 10 mm.

AGREGADOS GRUESOS: Los agregados gruesos ó grava, son partículas que se retienen en la malla No. 16 y pueden ser hasta de 152 mm. Los tamaños máximos de agregados más comúnmente empleados en el concreto son el de 19 y 25 mm. (Steven H. K. y W. C. Panarese, 1992).

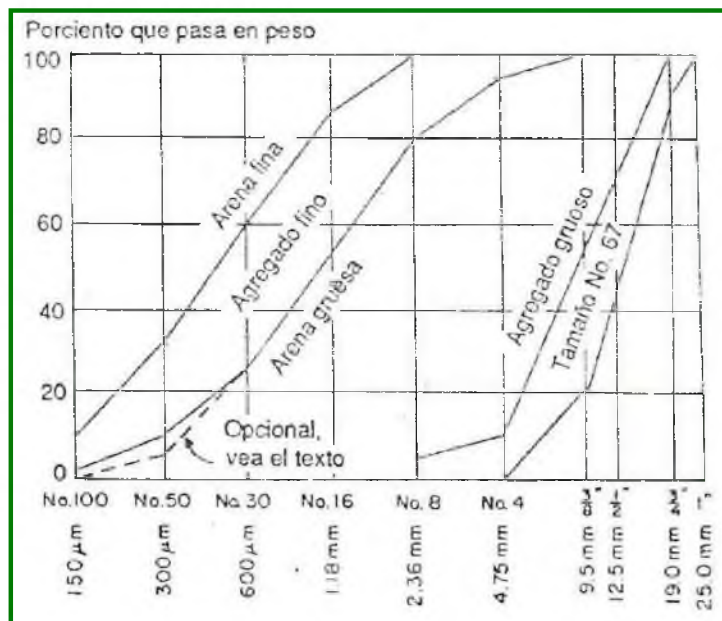


FIGURA 1: Las curvas indican los límites especificados en la norma ASTM C 33, para agregado fino y para un tamaño de agregado grueso típico (Figura tomada del libro: Diseño y control de mezclas de concreto. Steven H. K. y W. C. Panarese. 1992).

Módulo de finura

El módulo de finura se define como la suma de los porcentajes acumulados retenidos en los tamices de la serie normada: 150, 300, 600 μm , 1.18, 2.36, 5mm (ASTM Nos. 100, 50, 30, 16, 8, 4) y hasta el tamaño máximo del tamiz usado. El valor del módulo de finura es tanto más alto cuanto más grueso es el agregado. El módulo de finura no se puede usar como una descripción de la granulometría de un agregado, pero es útil para medir variaciones ligeras en agregados de la misma fuente. Sin embargo, con ciertas limitaciones, el módulo de finura da un indicio del posible comportamiento de una mezcla de concreto hecha con agregado de cierta granulometría. Por otro lado, algunos autores apoyan el uso del módulo de finura para la evaluación de agregados y el diseño de mezclas.

Agua

El agua apta para producir concreto, debe ser un agua natural que sea potable y que no tenga un sabor u olor pronunciado; sin embargo, también se pueden utilizar algunas aguas no potables con las mismas características. Las excesivas impurezas en el agua afecta no solo el tiempo de fraguado y la resistencia del concreto, sino que además puede causar

eflorescencia, manchado, corrosión del refuerzo, inestabilidad volumétrica y menor durabilidad. Para evitar tales daños al concreto se deben establecer los límites permisibles en el contenido de cloruros, sulfatos, álcalis y sólidos en el agua o se pueden desarrollar ensayos adecuados para determinar el efecto que la impureza provoque sobre ciertas propiedades. El agua que contiene menos de 2000 partes por millón (ppm) de sólidos disueltos totales generalmente es apta para ser utilizada de manera satisfactoria en la elaboración de concreto. El agua que contiene más de 2000 ppm de sólidos disueltos se analiza para investigar su efecto sobre la resistencia y el tiempo de fraguado.

Contenido de agua

El contenido de agua del concreto puede ser alterado por factores como el tamaño y forma del agregado, revenimiento, relación agua-cemento, contenido de aire, contenido de cemento, aditivos y condiciones ambientales. La demanda de agua puede disminuir con un mayor contenido de aire y tamaño de agregado, una reducción en la relación agua-cemento y en el revenimiento, agregados redondeados y el uso de aditivos reductores de agua o de ceniza volante. La demanda de agua puede aumentar con incrementos en la temperatura, en los contenidos de cemento, de revenimiento, en la relación agua-cemento, en la angularidad de los agregados, así como la disminución en la proporción de agregado grueso a fino.

CAPÍTULO II: EL CAUCHO DE LLANTAS UTILIZADO COMO AGREGADO EN EL CONCRETO

En la fabricación de llantas de automóviles se usa principalmente caucho natural, caucho sintético, cuerdas textiles, cargas de refuerzo (Negro de humo, sílices y caolines), antioxidantes, plastificantes, activadores de vulcanización, agentes vulcanizantes, aceleradores de vulcanización, azul ultramarino. El caucho bruto se amasa en molinos de masticación y mezcla, que consiste en dos rodillos que giran a diferentes velocidades para romper las moléculas largas en moléculas más cortas. Después de que se amasa el caucho se le agrega negro de carbón, óxido de zinc, azufre, cauchos regenerados y ablandadores.

Principales componentes de las llantas

Los diferentes ingredientes que se usan en la fabricación de llantas varían en proporción según el tipo de llanta que se desee fabricar. Los suavizantes aumentan la trabajabilidad del caucho, antes de la vulcanización. El óxido de Zinc y el Magnesio se utilizan como activadores y reducen el tiempo de vulcanización. Los antioxidantes son para dar mayor vida al caucho sin que se degrade por la acción del oxígeno y el ozono; y el negro de humo, que se obtiene a partir de la combustión incompleta de gases naturales, para proporcionar mayor resistencia a la abrasión y a la tensión. Los tipos de caucho más empleados en la fabricación de llantas son: Cauchos naturales (NR), estireno-butadieno (SBR), polibutadienos (BR) y polisoprenos sintéticos (IR); sin embargo, la matriz de caucho más utilizada es el copolímero SBR, en el que la proporción es de aproximadamente un 25% en peso de estireno, o una mezcla de caucho natural y SBR (Castro G., 2008).

En la Tabla 2 se muestran los diferentes elementos químicos y sus porcentajes presentes en las llantas, puede variar según el tipo de llanta y el país de fabricación. El porcentaje para algunos elementos está dado en rango, por lo que la suma de los elementos es mayor a 100.

En el proceso de vulcanización para fabricar llantas, los componentes del caucho son sometidos a altas temperaturas ($\approx 170^\circ\text{C}$) lo cual provoca cambios en su estructura química interna y en sus propiedades físicas. Estos cambios son irreversibles y es el principal motivo de que las llantas usadas no se pueden reciclar para ser utilizadas nuevamente en la fabricación de llantas.

Tabla 2 Composición de las llantas

Elemento o compuesto	Porcentaje
Carbono (C)	70
Hidrógeno (H)	7
Azufre (S)	1.3
Cloro (Cl)	0.2-0.6
Hierro (Fe)	15
Óxido de zinc (ZnO)	2
Dióxido de Silicio (SiO ₂)	5
Cromo (Cr)	97 ppm
Níquel (Ni)	77 ppm
Plomo (Pb)	60-760 ppm
Cadmio (Cd)	5-10 ppm
Talio (Tl)	0.2-0.3 ppm

Fuente: Combustibles alternativos, Holderbank 1997 (citado en Castro G., 2008)

Una de las alternativas más usadas en el reciclaje de llantas es la incineración de llantas en los hornos de fabricación de cemento, debido a que este proceso genera calor, agua y cenizas. Las cenizas producto de la incineración de llantas contienen componentes similares a los del cemento (Tabla 3), por lo que estas son absorbidas y capturadas en la estructura cristalina del cemento durante el proceso de fabricación.

Tabla 3: Composición química de las cenizas de llantas incineradas

Elemento o compuesto	Porcentaje
Dióxido de Silicio (SiO ₂)	22.00
Dióxido de Aluminio (Al ₂ O ₃)	9.09
Óxido de Hierro (Fe ₂ O ₃)	1.45
Óxido de Calcio (CaO)	10.61
Dióxido de Titanio (TiO ₂)	2.57
Óxido de Magnesio (MgO)	1.35
Óxido de Sodio (Na ₂ O)	1.10
Óxido de Potasio (K ₂ O)	0.92
Azufre (SO ₃)	15.68
Fósforo (P ₂ O ₅)	1.03
Óxido de Azufre (ZnO)	34.50

Fuente: Combustibles alternativos, Holderbank 1997 (citado en Andrés Quezada V. D., 2001).

CAPÍTULO III: PROPORCIONAMIENTO DE MEZCLAS DE CONCRETO

El objetivo de diseñar una mezcla de concreto es determinar la combinación más práctica y económica de los materiales con los que se dispone, para producir un concreto que satisfaga los requisitos de comportamiento bajo las condiciones particulares de uso. Para lograr tal objetivo, una mezcla de concreto bien proporcionada deberá poseer las propiedades siguientes:

1. En el concreto fresco, trabajabilidad aceptable.
2. En el concreto endurecido, durabilidad, resistencia y presentación uniforme.
3. Economía.

Todo prefabricado requiere un diseño de mezcla óptimo para cumplir con los requerimientos para lo cual es diseñado. Una mezcla para prefabricados está principalmente compuesta de agregados gruesos (grava), finos (arena), agua y cemento portland; de modo que el diseño de una nueva mezcla implica la sustitución parcial de alguno de estos componentes por el nuevo material (Neville, 1989).

Elección de las características de la mezcla

Para hacer un buen proporcionamiento de la mezcla primeramente se seleccionan las características deseables en el concreto resultante en base al uso que se propone dar al concreto, a las condiciones de exposición, al tamaño y forma de los miembros y a las propiedades físicas del concreto.

El primer paso para proporcionar una mezcla de concreto es la selección de una relación agua-cemento de acuerdo con la durabilidad y resistencia requerida.

Relación entre la relación agua-cemento y la resistencia

La resistencia a la compresión se relaciona inversamente con la relación agua-cemento. Además la resistencia de la pasta de cemento en el concreto, depende de la calidad y cantidad de los componentes reactivos y del grado al cual se completa la reacción de hidratación. El concreto se vuelve más resistente con el tiempo, siempre que exista humedad disponible y temperatura que la favorezcan. Por lo tanto, la resistencia a cualquier edad particular del concreto está más ligada al grado de hidratación que alcance el cemento que a la relación agua-cemento original. La diferencia en la resistencia para una relación agua-cemento dada, puede estar mayormente influenciada por cambios en el tamaño de

agregado, granulometría, textura superficial, forma, resistencia y rigidez, diferencia en los tipos y fuentes del cemento, contenido de aire incluido, presencia de aditivos y de la duración del periodo de curado

Resistencia

En un proporcionamiento de mezclas se espera que la resistencia a la compresión especificada a los 28 días para una clase individual de concreto sea igualada o sobrepasada por el promedio de cualquier conjunto de tres pruebas consecutivas, sin que ninguna prueba individual quede por debajo de 35 kg/cm^2 de la resistencia especificada cuando los especímenes son curados en condiciones de laboratorio.

La resistencia promedio debe igualar a la resistencia especificada más una tolerancia que se le atribuye a las variaciones en los materiales, el método de mezclado, transporte y colocación del concreto, variaciones en la elaboración, curado y prueba de los cilindros de concreto.

Relación agua-cemento

La relación agua-cemento es la razón que resulta de dividir el peso del agua entre el peso del cemento, presentes en una mezcla. Cuando se elige la relación agua-cemento se debe considerar el menor valor requerido para cubrir las consideraciones de exposición de diseño. En la Tabla 4 se muestran datos de referencia de tipos de concretos y sus relaciones agua-cemento para cumplir con las especificaciones requeridas. La Tabla 5 puede usarse para escoger una relación agua-cemento, con respecto a la resistencia promedio requerida para mezclas de prueba, cuando no se dispone de información necesaria. Cuando en el diseño de mezcla la durabilidad no es el factor más importante, la relación agua-cemento debe elegirse con base en la resistencia a compresión requerida en el concreto.

El tamaño máximo del agregado influye en la relación agua cemento, debido a que entre más grande sea la partícula de agregado menor será el área superficial para ser humedecida por masa unitaria. El tamaño máximo de agregado desde el punto de vista de resistencia es una función de la riqueza de la mezcla (Adam M Neville, 1999).

Tabla 4: Relaciones agua-cemento máximas para diversas condiciones de exposición

Condición de exposición	Relación agua-cemento máxima (en peso) para concreto de peso normal
Concreto diseñado para ser hermético	
a. Concreto expuesto a agua dulce	0.50
b. Concreto expuesto a agua salobre o agua de mar	0.45
Concreto expuesto a congelación y deshielo en condición húmeda	
a. Guarniciones, cunetas, guardarríes, o secciones delgadas.	0.45
b. Otros elementos.	0.50
c. En presencia de productos químicos descongelantes	0.45

Tabla 5: Relación entre la relación agua-cemento y la resistencia a compresión del concreto a los 28 días (Kg/cm^2)(Referencia ACI 211.1-91)

Resistencia a Compresión (kg/cm^2)	Relación agua-cemento en peso	
	Concreto sin aire incluido	Concreto con aire incluido
420	0.41	-
350	0.48	0.40
280	0.57	0.48
210	0.68	0.59
140	0.82	0.74

Agregados

La granulometría y la naturaleza de las partículas en los agregados tienen una influencia importante sobre el proporcionamiento de las mezclas de concreto, debido a que afectan la trabajabilidad del concreto fresco. La granulometría es importante para lograr una mezcla económica, porque afecta la cantidad de concreto que puede fabricarse con una cantidad determinada de cemento y agua. La tabla 6 ilustra el cambio en las proporciones de las

mezclas para varios tipos de mezclas de concreto que utilizan fuentes de agregado particulares.

Tabla 6: Ejemplo de mezclas de prueba para concreto sin aire incluido de consistencia media, revenimiento de 7.5 a 10 cm (tomado y adaptado de Steven H. K. y W. C. Panarese, 1992).

Relación Agua-cemento, / (kg/kg)	Tamaño máximo de agregado, mm(pulg)	Contenido de aire (aire atrapado %)	Agua, (kg/m ³ de concreto)	Cemento, (kg/m ³ de concreto)	Con arena fina, módulo de finura= 2.50			Con arena gruesa, módulo de finura=2.90		
					Agregado fino (% del agregado total)	Agregado fino (kg/m ³ de concreto)	Agregado grueso (kg/m ³ de concreto)	Agregado fino (%) del agregado total)	Agregado fino (kg/m ³ de concreto)	Agregado grueso (kg/m ³ de concreto)
0.50	9.5(3/8")	3	228	457	53	831	748	57	896	682
	12.7 (1/2")	2.5	217	433	45	742	902	49	813	831
	19.0 (3/4")	2	202	403	38	653	1068	42	724	997
	25.4(1")	1.5	193	386	35	623	1151	39	688	1086
	38.1 (1 1/2")	1	178	356	32	599	1252	36	670	1181
0.60	9.5(3/8")	3	228	380	55	896	748	58	961	682
	12.7 (1/2")	2.5	217	362	47	801	902	51	872	831
	19.0 (3/4")	2	202	335	40	712	1068	44	783	997
	25.4(1")	1.5	193	320	37	676	1151	41	742	1086
	38.1 (1 1/2")	1	178	297	34	647	1252	38	718	1181
0.70	9.5(3/8")	3	228	326	56	943	748	60	1009	682
	12.7 (1/2")	2.5	217	308	48	848	902	53	920	831
	19.0 (3/4")	2	202	288	41	754	1068	45	825	997
	25.4(1")	1.5	193	276	38	718	1151	42	783	1086
	38.1 (1 1/2")	1	178	255	35	682	1252	39	754	1181

La cantidad de agua de mezclado que se requiere para producir un metro cúbico de concreto con un revenimiento dado depende del tamaño máximo, forma y cantidad de agregado grueso.

Los tamaños mayores minimizan el requisito de agua y por lo tanto permiten que el contenido de agua se reduzca. También un agregado redondeado requiere menos agua que un agregado triturado en concretos de igual revenimiento.

Revenimiento

El revenimiento es un indicador de la trabajabilidad cuando se evalúan mezclas similares. Un cambio de revenimiento en las diferentes mezclas de la misma proporción indica un cambio en la consistencia y en las características de los materiales, en las proporciones de la mezcla o en el contenido de agua. Se requieren distintos revenimientos para los diversos tipos de construcción con concreto (Tabla 7). Usualmente en las especificaciones de obra se trabaja en un rango de entre 5 a 10 cm o con un valor máximo. Para los ajustes de mezclas, el revenimiento se puede elevar aproximadamente 2.5 cm agregando 6 kg de agua por metro cúbico de concreto.

**Tabla 7: Revenimientos recomendados para diversos tipos de construcción.
Referencia ACI 211.1-91**

Construcción de concreto	Revenimiento (cm)	
	Máximo	Mínimo
Zapatas y muros de cimentación reforzados	7.5	2.5
Muros de subestructuras, cajones y zapatas 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	5.0	2.5

Contenido de agua

El contenido de agua del concreto puede ser alterado por varios factores tales como: tamaño y forma del agregado, revenimiento, relación agua-cemento, contenido de aire, contenido de cemento, aditivos y condiciones ambientales.

Contenido de cemento y tipo de cemento

El contenido de cemento se determina por lo regular a partir de la relación agua-cemento y el contenido de agua elegidos. Para lograr una mayor economía, el proporcionamiento debe

ser tal que el consumo requerido de cemento sea mínimo sin que se llegue a sacrificar la calidad del concreto.

Método Americano de Selección de Proporciones de la Mezcla (ACI)

La práctica estándar ACI 211.1-91 describe un método de selección de proporciones de la mezcla de concreto que contiene cemento portland solo o junto con otros materiales cementantes y que contiene también aditivos. Este método supone una secuencia de pasos donde se toman en cuenta las características de los materiales que se van a emplear.

Paso 1: Selección del Revenimiento

Para el proporcionamiento de la mezcla, el revenimiento se tendrá que determinar según las exigencias de construcción.

Paso 2: Selección del tamaño máximo de agregado

El tamaño máximo de agregado también se decidirá según la disponibilidad de éste que sea compatible con las dimensiones de la estructura a construir.

Paso 3: Estimación del contenido de agua y contenido de aire

El contenido de agua requerido para producir un revenimiento dado depende de varios factores: el tamaño máximo de agregado, su forma textura y granulometría, el contenido de aire incluido, el uso de aditivos con propiedades fluidizantes o reductoras de agua y la temperatura del concreto (véase Tabla 8). Se deben utilizar tablas que relacionen el revenimiento con estas propiedades a menos que se cuente con amplia experiencia en el proporcionamiento de mezclas.

Paso 4: Selección de la relación agua/cemento

Existen dos criterios para la selección de la relación agua/cemento: resistencia y durabilidad. En lo que corresponde a la resistencia a la compresión, el valor promedio que se busca debe exceder la resistencia mínima especificada por un margen apropiado. El cemento estará comprendido por el peso total de los materiales cementantes empleados en la mezcla.

Tabla 8: Requisitos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes revenimientos y tamaños nominales máximos de agregados en el ACI 211.1-91, adaptado por Neville A.M., 1999

Revenimiento, mm	Agua, kg/m ³ de concreto para tamaños máximos de agregado nominales indicados							
	9.5	12.5	19	25	37.5	50	75	150
Concreto sin aire incluido								
25 a 50	207	199	190	179	166	154	130	113
75 a 100	228	216	205	193	181	169	145	124
150 a 175	243	228	216	202	19	178	160	-
Cantidad de aire atrapado, por ciento	3	2.5	2	1.5	0.1	0.5	0.3	0.2
Concreto con aire incluido								
25 a 50	181	175	168	160	150	142	122	107
75 a 100	202	193	18	175	165	157	133	119
150 a 175	216	205	197	184	174	166	154	-
Contenido total de aire (%) para:								
Mejoramiento de trabajabilidad	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 extrema	7.5	7.0	6.0	6.0	5.5	5.0	4.5	4.0

Paso 5: Cálculo del contenido de cemento

Si a partir de las consideraciones de durabilidad, existe un requisito para cierto contenido mínimo de cemento, se debe utilizar el mayor valor.

Ocasionalmente, a partir de las consideraciones de desarrollo de calor, la especificación impone un contenido máximo de cemento.

Paso 6: Estimación de contenido de agregado grueso

En este paso se hace la suposición de que la relación óptima del volumen aparente de agregado grueso respecto del volumen total de concreto depende sólo del tamaño del agregado y de la granulometría del agregado fino. La forma de las partículas de agregado grueso no entra directamente en la relación, pero es tomado en cuenta automáticamente en la determinación de la densidad aparente.

Paso 7: Estimación del contenido de agregado fino

El volumen absoluto de esta masa se puede obtener substrayendo la suma de los volúmenes absolutos de agua, cemento, aire incluido y agregado grueso del volumen del concreto, por ejemplo, un metro cúbico. Para cada ingrediente, el volumen absoluto es igual a la masa dividida por la densidad absoluta del material (en kg/m^3).

Paso 8: Ajustes a las proporciones de la mezcla

En este paso se hacen ajustes a la mezcla con tal de cumplir con la resistencia de diseño. La trabajabilidad puede cambiar, pero para que la resistencia no se afecte se debe mantener sin alteración la relación agua/cemento. Se pueden hacer cambios en la relación agregado/cemento.

CAPÍTULO IV: PROPIEDADES DEL CONCRETO

Para el diseño de mezclas es muy importante tomar en cuenta algunas propiedades del concreto fresco y del concreto endurecido, para lograr que se cumplan las especificaciones de la mezcla propuesta.

Propiedades del concreto fresco o recién mezclado

El concreto recién mezclado deber ser plástico o semifluido y capaz de ser moldeado a mano; para que un concreto sea plástico éste deber ser plegable y capaz de ser moldeado como un terrón de arcilla para modelar. En una mezcla de concreto plástico todos los granos de arena y grava quedan encajonados y sostenidos en suspensión. Los ingredientes no están predispuestos a segregarse durante el transporte; y cuando el concreto endurece, se transforma en una mezcla homogénea de todos los componentes. El concreto de consistencia plástica no se desmorona y fluye como líquido viscoso sin segregarse. El revenimiento se utiliza como una medida de la consistencia del concreto. Un concreto de bajo revenimiento tiene una consistencia dura.

Sangrado

Al sangrado también se le conoce como ganancia de agua, es una forma de segregación en la cual una porción del agua de la mezcla tiende a subir a la superficie del concreto recién colado. Esto es causado por la incapacidad de los constituyentes sólidos de retener toda el agua de mezclado. El sangrado inicial avanza a una rapidez constante pero después decrece uniformemente. El sangrado del concreto continúa hasta que la pasta de cemento se ha endurecido terminando así el proceso de sedimentación.

Cohesión

Propiedad del concreto que describe la facilidad o dificultad que tiene la pasta de cemento y la mezcla con los agregados, de atraerse para mantenerse como suspensión en el concreto, evitando así la disgregación de los materiales.

Segregación

La segregación es la separación de los constituyentes de una mezcla heterogénea de modo que su distribución ya no es uniforme. En el concreto, las diferencias en el tamaño de las partículas y en el peso específico de los constituyentes de la mezcla son las causas

primarias de la segregación, pero su efecto puede controlarse con la selección de una granulometría adecuada y con el cuidado en el manejo de la mezcla.

Trabajabilidad

Propiedad del concreto o mortero acabado de mezclar que determina la facilidad y homogeneidad con las cuales se puede mezclar, colocar, compactar y acabar.

Propiedades del concreto endurecido

A continuación se describen algunas de las propiedades del concreto endurecido que son de importancia en el diseño de mezclas.

Estado endurecido

Este estado se inicia después del fraguado final y se determina con el penetrómetro, al presentar el concreto una resistencia a la penetración de 282 kg/cm^2 .

Resistencia a compresión

La resistencia a compresión del concreto, se puede definir como la máxima resistencia medida en un espécimen de concreto a carga axial. Generalmente se expresa en kilogramos por centímetro cuadrado (kg/cm^2) a la edad de 28 días y se le representa con el símbolo f'_c .

Permeabilidad

La permeabilidad del concreto no es únicamente una función sencilla de la porosidad del concreto, sino que además depende del tamaño, distribución, forma y continuidad de los poros. En el concreto, el valor del coeficiente de permeabilidad decrece en forma muy considerable con una disminución en la relación agua/cemento. A una relación agua/cemento de 0.75, el coeficiente de permeabilidad es comúnmente 10^{-10} m/s , y se considera representativo del concreto con alta permeabilidad. A una relación agua /cemento de 0.45 el coeficiente es comúnmente 10^{-11} ó 10^{-12} m/s ; las permeabilidades más bajas que este rango son propias de un concreto con permeabilidad muy baja. La permeabilidad del concreto se ve afectada también por las propiedades del cemento. Para la misma relación agua/cemento, el cemento grueso tiende a producir pasta de cemento endurecido con una porosidad más alta que con un cemento más fino. Si el agregado tiene una permeabilidad muy baja, su presencia reduce el área efectiva a través de la cual puede ocurrir el flujo; sin

embargo, la influencia del contenido de agregado en la mezcla es pequeña. Las partículas de agregado están envueltas con la pasta de cemento, por lo tanto, en el concreto compactado la permeabilidad de la pasta de cemento endurecido es la que tiene el efecto más grande sobre la permeabilidad del concreto (Adam M. Neville 1999).

Pruebas de control de calidad y buenas prácticas en concreto fresco

Mezclado

En el mezclado la secuencia de carga de los ingredientes en la mezcladora representa un papel importante en la uniformidad del producto terminado. Las diferentes secuencias requieren ajustes en el tiempo de adicionamiento de agua, en el número total de revoluciones del tambor de la mezcladora y en la velocidad de la revolución. Otros factores importantes en el mezclado son el tamaño de la revoltura en relación al tamaño del tambor de la mezcladora, el tiempo transcurrido entre la dosificación y el mezclado, el diseño, la configuración y el estado del tambor mezclador y las paletas.

Tiempo de mezclado

Es importante determinar el tiempo de mezclado necesario para producir un concreto de composición uniforme, para esperar producir un concreto de resistencia satisfactoria. El tiempo varía con el tipo de mezcladora, más estrictamente depende del número de revoluciones de la mezcladora, generalmente 20 revoluciones son suficientes. Cuando se usa agregado ligero el tiempo de mezclado debe ser no menor a 5 minutos, algunas veces dividido en 2 minutos para mezclar el agregado con agua, después se debe agregar el cemento y revolver 5 minutos. Por otra parte, el mezclado de larga duración favorece la evaporación y consecuentemente provoca una disminución en la trabajabilidad y la resistencia. En general, la duración del tiempo de mezclado requerido depende de la calidad de combinación de los materiales durante la carga de la mezcladora, para obtener resultados positivos se recomienda la alimentación simultánea (Adam M Neville, 1999).

Curado

El curado es el proceso mediante el cual se favorece la hidratación del cemento o de los materiales cementantes en la mezcla, en un ambiente específico de humedad y temperatura,

las especificaciones del curado se describen en la NMX-C-159-ONNCCE-2004 (IMCYC, Octubre 2011).

Curado húmedo

La resistencia del concreto continúa con el tiempo mientras esté presente algo de cemento sin hidratar siempre y cuando el concreto permanezca húmedo o tenga una humedad relativa superior a aproximadamente el 80% y permanezca favorable la temperatura del concreto. Cuando la humedad relativa dentro del concreto cae aproximadamente al 80% o la temperatura del concreto desciende por debajo del punto de congelación, la hidratación y el aumento de resistencia se detienen. Si se vuelve a reanudar el concreto luego de un periodo de secado, la hidratación se reanuda y la resistencia vuelve a aumentar. Sin embargo, lo mejor es aplicar el curado húmedo al concreto de manera continua desde el momento en que se coloca hasta que alcance la calidad deseada debido a que el concreto es difícil de restaurar.

Prueba de revenimiento del concreto

La prueba de revenimiento muestra la trabajabilidad del concreto y está normada por la NMX-C-156-ONNCCE-2010. El molde para la prueba es un cono truncado (Cono de Abrams, véase Figura 2) de 30 cm. Éste cono tiene una abertura menor y otra mayor. El cono se coloca sobre una superficie lisa, con la abertura menor en la parte superior, y se llena con concreto en tres capas. Cada capa se apisona 25 veces con una varilla de acero normal de 15 mm de diámetro. El concreto excedente en la cara superior se corta por medio de un movimiento de aserrar y rodar de la varilla de apisonar. El molde se debe sostener firmemente contra su base durante toda la operación. Inmediatamente después del llenado, el cono se levanta lentamente y el concreto sin soporte ahora se va a revenir. La disminución en la altura del concreto revenido se llama revenimiento y se mide hasta los 5 mm más cercanos. Si en lugar de revenirse en forma uniforme alrededor del revenimiento verdadero, la mitad del cono se desliza para abajo en un plano inclinado, se dice que ha ocurrido un revenimiento cortante y deberá repetirse la prueba. Si el revenimiento cortante persiste, tal es el caso de las mezclas ásperas, esto indica falta de cohesión en la mezcla.

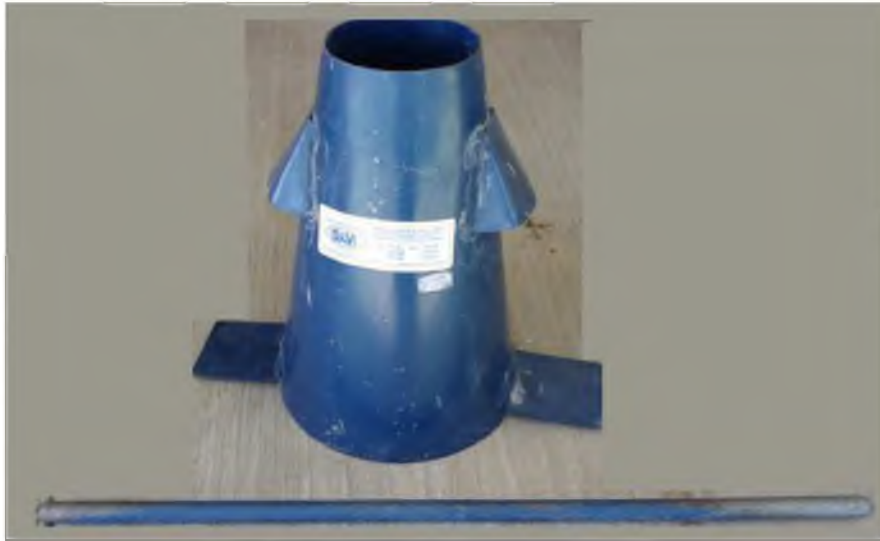


Figura 2: Cono de Abrams

Pruebas de control de calidad y buenas prácticas concreto endurecido

Cabeceo

Esta práctica se basa en la norma mexicana NMX-C-109-2004 ONNCCE y la ASTM-C-617. Se preparan las bases de los especímenes de concreto para su prueba, utilizando para ello el mortero de azufre. Se calienta en una olla a 140 °C la cantidad necesaria de mortero de azufre hasta fundirse, agitándolo constantemente. Se vacía el mortero de azufre fundido en los platos de cabeceo, habiendo lubricado con aceite el plato de cabeceo antes de utilizarlo. Posteriormente se coloca la base del espécimen sobre el plato de cabeceo poniéndolo en contacto con el mortero de azufre, utilizando una barra guía para centrarlo. Se deja transcurrir el tiempo suficiente para permitir el enfriamiento del azufre. Luego con golpes ligeros se despegla la base cabeceada del plato.

Prueba de Resistencia a la compresión

Los resultados de las pruebas de resistencia a la compresión se usan fundamentalmente para determinar que la mezcla de concreto en cuestión, cumpla con los requerimientos de la resistencia especificada, f'_c . Los resultados de las pruebas de resistencia a partir de cilindros se pueden utilizar para fines de control de calidad, aceptación del concreto o para estimar la resistencia del concreto. Los cilindros sometidos a ensayo se elaboran y curan siguiendo los procedimientos descritos en probetas curadas de manera estándar según la

norma ASTM 31 “Práctica estándar para elaborar y curar cilindros de ensaye de concreto en campo”. La mezcla de concreto se diseña para producir una resistencia promedio superior a la resistencia especificada de manera tal que se pueda minimizar el riesgo de no cumplir la especificación de resistencia. Para cumplir con los requerimientos de resistencia de una especificación dada, se aplican los siguientes criterios de aceptación:

- El promedio de tres ensayos consecutivos es igual o supera a la resistencia especificada, f'_c .
- Ninguno de los ensayos de resistencia debe arrojar un resultado inferior a f'_c en más de 3.45 MPa, ni ser superior en más de 0.10 f'_c , cuando f'_c sea mayor de 35 MPa.

Los cilindros para pruebas deben tener un tamaño de 15x30 cm o 10x20 cm, cuando así se especifique. El diámetro del cilindro utilizado debe ser como mínimo tres veces el tamaño máximo nominal del agregado grueso que se emplee en el concreto. Para obtener datos confiables en ésta prueba se deben realizar las siguientes acciones:

Con la finalidad de conseguir una distribución uniforme de la carga, generalmente se cabecean los cilindros con mortero de azufre o con almohadillas de neopreno. El cabeceo de azufre se debe aplicar como mínimo dos horas antes y preferiblemente un día antes de la prueba.

Los cilindros no deben secarse antes de la prueba.

Se medirá el diámetro del cilindro en dos sitios en ángulos rectos entre sí a media altura de la probeta y deben promediarse para calcular el área de la sección. Si los diámetros medidos difieren en más de 2%, no se debe someter a prueba el cilindro.

Los extremos de las probetas no deben presentar desviación con respecto a la perpendicularidad del eje del cilindro en más de 0.5% y los extremos deben ser planos dentro de un margen de 0.002 mm.

Los cilindros se deben centrar en la máquina de ensayo de compresión y cargados hasta completar la ruptura. El régimen de carga con máquina hidráulica se debe mantener en un rango de 0.5 a 0.35 MPa/s durante la última mitad de la fase de carga. Se debe anotar el tipo de ruptura. La fractura cónica es un patrón común de ruptura.

La resistencia del concreto se calcula dividiendo la máxima carga soportada por la probeta para producir la fractura entre el área promedio de la sección.

El concreto de uso más generalizado tiene una resistencia a la compresión entre 210 y 350 kg/cm². Un concreto de alta resistencia tiene una resistencia a la compresión de al menos 420 kg/cm².

Prueba de Resistencia a la Flexión

La norma mexicana NMX-C-191-ONNCCE-2004 establece el método de prueba para la determinación de la resistencia a la flexión del concreto, usando una viga con cargas concentradas en los tercios del claro. Se debe utilizar un dispositivo capaz de aplicar cargas en los tercios del claro de prueba de tal modo que las fuerzas sean perpendiculares a las caras horizontales de la viga y se distribuyan y apliquen uniformemente en todo lo ancho. La longitud del espécimen debe ser la distancia entre apoyos más 50 mm como mínimo. La distancia entre apoyos debe ser de tres veces el peralte de la viga con una tolerancia de 2% esta distancia debe ser marcada en las paredes de la viga antes del ensaye.

Procedimiento de prueba: Se debe voltear el espécimen sobre un lado con respecto a la posición del moldeado. Se centra en los bloques de apoyo y estos a su vez deben estar centrados respecto a la fuerza aplicada. Los bloques de aplicación de carga se ponen en contacto con la superficie del espécimen en los puntos tercios entre los apoyos. Se debe tener contacto total entre la aplicación de la carga y los bloques de apoyo con la superficie del espécimen. Se debe lijar las superficies del espécimen o usar tiras de cuero si la separación de la línea de contacto entre ellas y los bloques es mayor de 0.1 mm.

Aplicación de la carga: La carga se debe aplicar a una velocidad uniforme, tal que el aumento de esfuerzo de las fibras extremas no exceda de los 10 kgf/cm² por minuto.

Medición del espécimen después de la prueba: Se determina el ancho promedio, el peralte y la localización de la línea de falla, con el promedio de tres medidas una en el centro y dos sobre las aristas del espécimen aproximándolas al milímetro.

Módulo de ruptura: Es el valor obtenido mediante el procedimiento indirecto para determinar la resistencia a la tensión del concreto por el ensaye a la flexión de una viga.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El Estado de Oaxaca cuenta con 65 000 hectáreas aptas para la acuicultura y con potencial para el cultivo de diversas especies; sin embargo los cultivos de tilapia y trucha son los más destacados por volumen de producción así como por el número de granjas establecidas. En el caso del cultivo de trucha se cuenta con el plan rector del sistema producto trucha en el cual se encuentra el diagnóstico de la industria trutícola del Estado. Entre las problemáticas encontradas en el diagnóstico se encontró que la truticultura se está desarrollando en sistemas de producción sencillos con poca planeación en el diseño de la granja y el material predominante de construcción de estanquería es mampostería de tabique, seguido del concreto y mampostería de piedra. Existen zonas con alto potencial para el desarrollo de la acuicultura pero existe la inconveniencia del alto costo de los elementos para producir una mezcla de concreto, así como de los prefabricados debido a la dificultad en el transporte.

Una alternativa en la reducción de costos, es la sustitución de los agregados finos y/o gruesos por otro material de menor costo de transporte por unidad de volumen. El caucho sintético podría ser un material acorde a dicha alternativa. En estudios anteriores se ha demostrado que la sustitución total o parcial de caucho por alguno de los agregados ha provocado la disminución de la resistencia a la compresión del concreto. Sin embargo, aún se desconocen los efectos que pueden producir en la resistencia diferentes niveles de relación agua-cemento en combinación con diferentes proporciones de caucho y si la combinación de ambos factores puede producir efectos que favorezcan las propiedades del concreto.

1.3 JUSTIFICACIÓN

La Asociación Nacional de Distribuidores de Llantas y Plantas Renovadoras (ANDELLAC 2010) menciona que México genera 26 millones de neumáticos al año, gran parte de éste residuo se acumula en basureros porque no se cuenta con la cultura, ni leyes que obliguen a productores y consumidores a reciclar (Abdel-Gawad *et al.* 2010). Por lo tanto, el encontrar una formulación adecuada de concreto-caucho-agregados podría traer beneficios ecológicos, y quizá en economías de escala una reducción en los costos, aunque de esto último no se puede afirmar hasta hacer un estudio minucioso de costos.

La propuesta de una mezcla que incluye en su composición un porcentaje de caucho permitirá la reducción del impacto negativo que las llantas generan al ser desechadas al ambiente. Por otro lado, se tendrá un material alternativo para la construcción de estanques acuícolas. Sin embargo, antes de emplearlo en la construcción de estanques acuícolas se tendrá que evaluar las propiedades de la mezcla, así como realizar evaluaciones en los peces que en ellos se cultiven.

1.4 ANTECEDENTES

Los estudios sobre mezclas de concreto en diferentes formulaciones de caucho han tomado importancia desde hace aproximadamente dos décadas. Actualmente se siguen haciendo estudios con diferentes proporciones de caucho para caracterizar las propiedades de dichas mezclas. Abdel-Gawad *et al.* (2010) sustituyeron caucho por agregado grueso (sustituciones del 100% por fibra) y fino (sustituyendo 100 y 50% por caucho). Ellos encontraron mejores propiedades para la mezcla de concreto con sustitución de polvo de caucho que con fibra y sugieren una sustitución de entre 10 y 25% de caucho para futuras investigaciones. Otros estudios han demostrado que mientras mayor sea la adición de caucho al concreto la resistencia de éste disminuye, sin embargo se ven favorecidas otras propiedades como: ductilidad, baja densidad, la permeabilidad, entre otras (Segre *et al.*, 2006; Snelson *et al.*, 2009; Abdel-Gawad *et al.*, 2010).

Las llantas se han usado por décadas como barrera rompeolas en las playas, así como arrecifes artificiales. En un estudio de arrecife artificial elaborado por Collins *et al.* (2002) tomaron como prueba empírica de idoneidad de sustrato, la pronta colonización de los epibiontes. Un estudio de metales pesados en organismos que estuvieron en contacto con llantas en comparación con organismos colonizadores de especímenes de concreto arrojó diferencias altamente significativas; Sin embargo una prueba Tukey de comparación de medias a posteriori mostró que se trataba de una sola especie en particular. Se demostró que la colonización de los epibiontes estaba relacionada más con el tipo de arreglo dado a los especímenes de prueba que con los metales pesados que estos contenían.

Por otro lado se han encontrado pequeñas cantidades de elementos de llantas en organismos de agua salada (Collins *et al.*, 2002) y dulce (Eurikur y Margareta, 2009), que estuvieron

en contacto con llantas y/o subproductos de éstas. Sin embargo Hartwell *et al.*, (1999) realizaron estudios de salinidad/toxicidad y encontraron que a mayor salinidad, la toxicidad del caucho de llantas disminuye. Los ensayos de lixiviación en llantas expuestas a la intemperie, no presentaron características de peligrosidad (Wallingford, 2005).

No existen estudios anteriores a este donde se realicen pruebas mecánicas a mezclas de concreto con adición de caucho, con la finalidad de cumplir con los requerimientos para la construcción de estanques para cultivo de peces.

1.5 HIPÓTESIS GENERAL

Las medias resultantes de la interacción de los factores, relación agua-cemento (0.5, 0.6 y 0.7) e inclusión de caucho (0%, 5%, 10% y 15%) en sus diferentes niveles de comparación, son iguales.

1.5.1 Hipótesis particulares

La interacción de los factores relación agua-cemento (0.5, 0.6 y 0.7) e inclusión de caucho (0%, 5%, 10% y 15%) no producirá diferencia en los esfuerzos a la compresión, en sus diferentes niveles de comparación.

La interacción de los factores relación agua-cemento (0.5, 0.6 y 0.7) e inclusión de caucho (0%, 5%, 10% y 15%) no producirá diferencia en la flexión en sus diferentes niveles de comparación.

La interacción de los factores relación agua-cemento (0.5, 0.6 y 0.7) e inclusión de caucho (0%, 5%, 10% y 15%) no producirá diferencia en el peso en sus diferentes niveles de comparación.

1.6 OBJETIVOS

Objetivo General:

Evaluar un proporcionamiento de mezclas que cumpla con las especificaciones de resistencia a la compresión y flexión requeridas en estanquería acuícola. Se sustituirá caucho por agregado fino en porcentajes de 0.5, 10 y 15 del peso total del agregado fino y relación agua-cemento (R a/c) de 0.5, 0.6 y 0.7 a partir de un proporcionamiento tipo para concreto con revenimiento de 7.5 a 10 cm

Objetivos particulares:

- 1.- Elaborar cilindros de prueba con los proporconamientos de mezcla resultado de la combinación de factores inclusión de caucho y R a/c y determinar la resistencia a la compresión de 3 ensayos para cada nivel.
- 2.- Elaborar vigas de prueba a la flexión con el tipo de mezclas que hayan resultado con mejores propiedades en el ensayo de resistencia a la compresión y realizar las pruebas de flexión.
- 3.- Determinar el peso volumétrico de cada grupo de mezclas resultante de la combinación de ambos factores y compararlas entre sí.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Cálculos y supuestos preliminares a la elaboración de mezclas.

Se hicieron cálculos preliminares para verificar que la mezcla propuesta se encuentre dentro del rango de presiones especificada para estanquería con dimensiones comúnmente usadas en la acuicultura. En la Figura 3 se muestra un prototipo de estanque circular al cual se le hacen los cálculos de presión por agua a través de una cuña de presiones, se hicieron los cálculos suponiendo estanques con alturas desde 80 cm hasta 2 metros de columna de agua. La Tabla 9 muestra las presiones calculadas que experimentarán las paredes ya sea de estanques circulares o rectangulares.

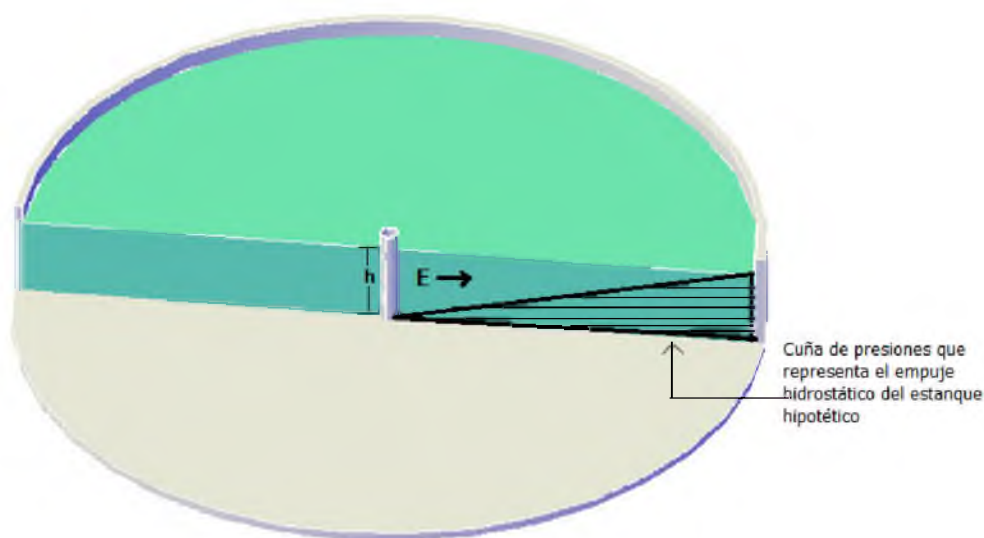


Figura 3: Prototipo de estanque circular

La presión que ejerce un fluido sobre las paredes del recipiente que lo contiene, se conoce como presión hidrostática. El empuje hidrostático que experimentarán las paredes se representa en la Figura 2 como un volumen de cuña de presiones, la cual resulta de la sumatoria de las fuerzas que actúan sobre el área de las paredes del estanque. Dado que la presión hidrostática está influenciada solo por la densidad del fluido, la gravedad y la presión atmosférica y no de la forma del recipiente, los datos de la Tabla 9 representan a

cualquier tipo de estanque siempre y cuando se cumpla con la altura aquí mencionada. La presión que ejercerá el agua sobre las paredes, se calcula con la siguiente fórmula:

$$P = \rho gh + P_0$$

Donde:

P = Presión hidrostática

ρ = Densidad del fluido (agua)

g = Gravedad

h = Altura

P₀ = Presión atmosférica

Tabla 9: Esfuerzo de compresión en las paredes de los estanques

Altura h (m)	Presión (Kgf/cm ²) en agua	
	dulce o salada	
0.8	0.08	
1	0.10	
1.2	0.12	
1.5	0.15	
1.6	0.16	
1.8	0.18	
2	0.20	

Como se muestra en la Tabla 9 la presión hidrostática ejercida en las paredes es mínima, por lo que se descartó ésta como condicionante en la elaboración de la mezclas. Se definieron como especificaciones de diseño de mezclas las que comúnmente se usan en la construcción: Resistencia de 100 kgf/cm^2 para muros y pisos y 150 kgf/cm^2 para traveses y dadas.

Determinación del proporcionamiento de mezclas usando como referencia el método ACI

Paso 1: Selección del Revenimiento

Dado que el Revenimiento está influenciado por el tamaño máximo, forma y cantidad de agregado grueso. Se eligió el revenimiento de acuerdo al tamaño máximo de agregado comúnmente en la región, que corresponde a 19 mm de tamaño máximo de agregado grueso. Además de que el proporcionamiento de las mezclas de prueba se basó en el ejemplo de la Tabla 6 donde el rango de revenimiento es de 7.5 a 10 cm; así como en ACI 211.1-91 de la Tabla 7 que también recomienda revenimientos similares.



Figura 4: Prueba de revenimiento

Paso 2: Selección del tamaño máximo de agregado

Se hizo la determinación del tamaño máximo de agregado mediante la caracterización y prueba de los agregados conforme a la ASTM 136.

Los agregados gruesos y finos que se utilizaron para la elaboración de los especímenes de prueba proceden del río Papaloapan (Figura 5b y 5c). Antes de elaborar las correspondientes mezclas se realizó la caracterización de los agregados que constó de las siguientes etapas:

Se tomó una muestra de los agregados y se elaboró el cuarteo (Figura 5d) para sacar una muestra representativa. Se realizó la granulometría de los agregados la cual consistió en usar tamices marca Davi (Figura 6). Para la granulometría del agregado grueso se usaron los tamices de 3/8", 1/2", 3/4", 1", 1 1/2", 2", 3" y 4". Para la granulometría de agregados finos se usaron los siguientes tamices: 3/8 (9.52 mm), 4 (4.75 mm), 8 (2.36 mm), 16 (1.18 mm), 30 (0.60 mm), 50 (0.30 mm) y 100 (0.15 mm).

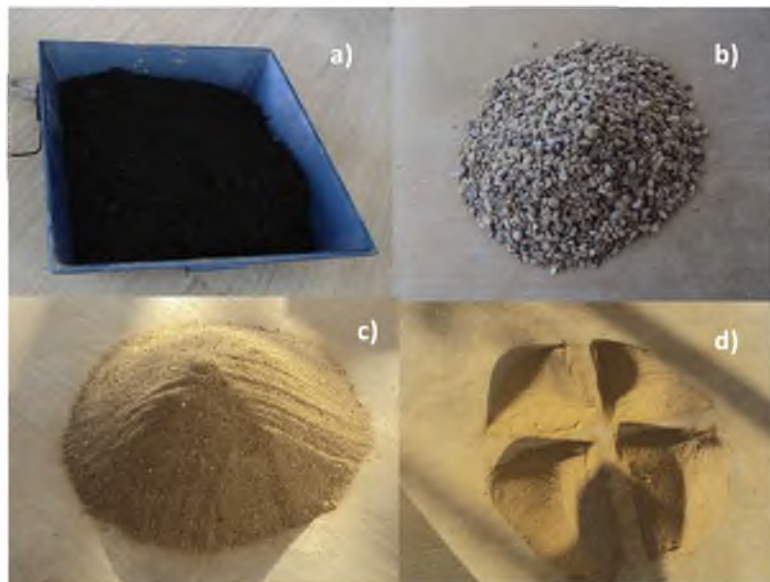


Figura 5: Agregados. a) agregado fino (caucho), b) agregado grueso (grava), c) agregado fino (arena), d) cuarteo.

- Cuarteo

El método del cuarteo (Figura 5d) consistió primeramente en mezclar la muestra original repetidas veces, posteriormente se recogió la muestra formando un cono invertido. El objetivo principal del método del cuarteo fue la obtención de una muestra representativa, para lo cual se dividió la muestra en cuatro partes y se extrajeron 2 de los cuartos opuestos. Los cuartos sobrantes se volvieron a mezclar y se repitió este procedimiento varias veces hasta lograr una muestra visiblemente homogénea. Al principio se tomaron 10 kilogramos de muestra para el caso del agregado fino y mediante el método del cuarteo se fue reduciendo ésta hasta quedar con aproximadamente 4 kilogramos. Todos los elementos se pesaron con una báscula electrónica con capacidad para 30 kilogramos de la marca Ohaus Modelo ES30R.

- Granulometría.

Se realizó haciendo pasar las partículas por todas las mallas y pesando la cantidad de material retenido en cada uno de los tamices. El dato de la granulometría se usó en la determinación del proporcionamiento óptimo de los materiales a usar en cada uno de las relaciones agua/cemento. Además se utilizó en la determinación del módulo de finura. Con los datos de la granulometría del agregado fino se elaboró un gráfico que muestra las curvas que indican los límites especificados en la norma ASTM C 33, para agregado fino y para un número de tamaño de agregado grueso típico (Figura 1).



Figura 6: Granulometría. Tamices

Paso 3: Estimación del contenido de agua y contenido de aire

El contenido de agua en la mezcla estuvo basado en el proporcionamiento para mezclas con R a/c de 0.5, 0.6 y 0.7, respectivamente que se muestra en el ejemplo de proporcionamiento de mezcla en la Tabla 6. Así mismo el contenido de agua en la mezcla se aproximó al valor de la Tabla 8 propuesto por la ACI 211.1-91 para un tamaño máximo de agregado de 19 mm y revenimiento de 7.5 a 10 sin aire incluido.

Paso 4: Selección de la relación agua-cemento

Para cumplir con las especificaciones del diseño de mezclas y considerando que el concreto estará expuesto a agua dulce y/salada, tomando como base las condiciones de exposición que se muestran en la Tabla 4 se elaboraron mezclas con R a/c de 0.5, 0.6 y 0.7.

Paso 5: Cálculo del contenido de cemento

El contenido de cemento incluido en las diferentes mezclas de R a/c 0.5, 0.6 y 0.7, respectivamente se calculó a partir del ejemplo mostrado en la Tabla 5 para un proporcionamiento de mezcla sin aire incluido, revenimiento entre 7.5 y 10 y con tamaño máximo de agregado grueso de 19 mm.

El cemento que se utilizó en el proporcionamiento de la mezclas fue un cemento gris portland CPC 30 R (Cemento Portland Compuesto con resistencia rápida 30).

Paso 6: Estimación de contenido de agregado grueso

El contenido de agregado grueso incluido en las diferentes mezclas de R a/c 0.5, 0.6 y 0.7, respectivamente se calculó a partir del ejemplo mostrado en la Tabla 6 para un proporcionamiento de mezcla sin aire incluido, revenimiento entre 7.5 y 10 cm y con tamaño máximo de agregado grueso de 19 mm.

Paso 7: Estimado del contenido de agregado fino

Cálculo del módulo de finura

El módulo de finura se calculó conforme a la Norma ASTM C 125, sumando los porcentajes retenidos acumulados en los tamices estándar y dividiendo la suma entre 100.

Como agregado fino se usó la arena y un porcentaje de caucho (0,5, 10 y 15%). Se decidieron estos porcentajes de inclusión debido a las recomendaciones que hacen los autores Abdel-Gawad *et al.* (2010) para futuras investigaciones; así como de estudios preliminares de resistencia que se llevaron a cabo con concreto-caucho antes de realizar el presente estudio. El contenido de agregado fino para cada uno de los tratamientos R a/c e inclusión de caucho se estimó de la siguiente manera: Se tomó como base el contenido de agregado fino que se muestra en el ejemplo de la Tabla 5 para cada una de las muestras de los grupos de tratamientos. Los tratamientos de R a/c de 0.5, 0.6 y 0.7 con una inclusión de 0% de caucho permanecieron con el mismo proporcionamiento de arena que el que se muestra en el ejemplo.

Los tratamientos con inclusión del 5, 10 y 15% de caucho, el agregado fino estuvo conformado de la siguiente manera. Del 100 % de agregado fino (arena) se hizo la sustracción en peso del 5, 10 y 15% para ser sustituido por 5, 10 y 15% de caucho para cada uno de los respectivos tratamientos. El caucho utilizado, fue a partir de fibras de 2 mm de grosor y 1 a 2 cm de largo (Figura 5a).

Paso 8: Ajustes a las proporciones de la mezcla

Siguiendo las recomendaciones del Método ACI para proporciones de la mezcla, se mantuvo constante la relación agua-cemento en todos los niveles con el mismo porcentaje de inclusión de caucho.

Diseño de Experimento

a) Resistencia a la compresión

Se utilizó un diseño factorial completamente al azar de 3 x 4 con 3 repeticiones. El diseño experimental constó de 2 factores: Relación agua/cemento (R a/c) y Contenido de Caucho (%). Por un lado se tiene al factor R a/c con tres niveles (0.5, 0.6 y 0.7) y por el otro al factor Contenido de caucho con 4 niveles (0, 5, 10 y 15). La interacción de ambos factores produjo 12 ensayos con 3 réplicas cada uno, probados a 7 y 28 días, esto dio como resultado 72 especímenes de prueba (cilindros). Los datos de resistencia a la compresión que se hicieron a los cilindros a los 7 días no participaron en el análisis estadístico del diseño experimental; sin embargo sirvieron como control en el curado del concreto. Porque

aunque los especímenes a edad temprana presentan baja resistencia con respecto a los de 28 días, se puede observar una tendencia de la reducción de ésta, a medida que se incrementa el porcentaje de caucho en la mezcla para una misma relación agua-cemento.

b) Resistencia a la flexión.

La prueba de resistencia a la flexión se realizó posterior a las pruebas de resistencia a la compresión. Se realizó de ésta manera debido a que las mezclas de concreto con relación agua-cemento de 0.6 y la inclusión de caucho de hasta 10% dio como resultado una resistencia a la compresión dentro del rango que se busca (150 kgf/cm^2). Teniendo los datos de resistencia a la compresión, la elección del diseño de mezcla estuvo en función de los datos de resistencia a la flexión que se obtuvieron de las pruebas.

Se probó el efecto combinado de la Relación agua/cemento con el contenido de caucho sobre la resistencia a la flexión. Se utilizó un diseño factorial completamente al azar de 2×2 con 3 repeticiones. La unidad experimental fueron vigas de $60 \times 15 \times 15 \text{ cm}$ sobre las cuales se aplicó una fuerza para determinar la resistencia a la flexión (variable de respuesta). Las pruebas se realizaron a especímenes curados a 28 días. Los tratamientos a probar fueron los que se indican en la Tabla 10.

Tabla 10: Diseño experimental de resistencia a la flexión a 28 días.

Contenido de caucho %	R a/c	
	0.5	0.6
0	0.5	0.6
10	0.5	0.6

El diseño experimental constó de 2 factores: Relación agua/cemento (R a/c) y Contenido de Caucho (%). Por un lado se tiene al factor R a/c con dos niveles (0.5 y 0.6) y por el otro al factor Contenido de caucho con 2 niveles (0 y 10). La interacción de ambos factores

produjo 4 ensayos con 3 réplicas cada uno, esto dio como resultado 12 especímenes de prueba (vigas).

c) Peso volumétrico del concreto fresco

Esta prueba se llevó a cabo inmediatamente después del mezclado. Para esta prueba se usaron unos moldes marca Davi cuyo volumen se calculó, posteriormente se llenó el molde con concreto fresco y se peso. De ambos resultados se hizo una razón peso/volumen para determinar el peso volumétrico del concreto.

Se calculó el peso volumétrico de cada uno de los tratamientos en la prueba de resistencia a la compresión.

Elaboración y ensayo de especímenes de prueba

a) Cilindros

Las pruebas se realizaron por la mañana entre las 10 y 12 horas del día.

- Engrasado de los moldes. Un día antes de elaborar los cilindros se engrasaron los moldes con aceite reutilizable.
- Pesado de los agregados gruesos y finos, agua, cemento y caucho con una balanza electrónica con capacidad de 30 kg, marca Ohaus Mod. ES30R.
- Mezclado. El tiempo de mezclado se estandarizó a 8 minutos en cada tratamiento. Los primeros 3 minutos fueron para agregar el material de la mezcla y los otros 5 para revolver todos los ingredientes. Se estandarizó el tiempo de mezclado a 8 minutos, hasta que se logró una consistencia y homogeneidad apropiada en la mezcla. La mezcla se hizo con una mezcladora eléctrica CM-150 1/3 saco Max-Mix-Joper de 23 RPM.
- Llenado del molde para hacer los cilindros. Se llenaron los cilindros en 3 capas, aproximadamente y se varilló 25 veces cada capa, además de dar pequeños golpes a la orilla del cilindro para lograr el acomodo de la mezcla, este procedimiento se repitió en el llenado de cada una de las capas. Una vez lleno el molde se enrasó el molde y se procedió a tapar el molde, colocando el cilindro en un lugar sombreado.

Los moldes usados fueron cilindros de 30 x15 cm con asa y tapa maquinada marca Davi.

- Fraguado del concreto. Después de elaborar los cilindros se dejaron transcurrir 24 horas antes de desmoldar los cilindros.
- Membrana de curado. Después de desmoldar los cilindros se aplicó la membrana de curado Curaconsa APD, Marca Proconsa.
- Cabeceo de cilindros. Un día antes de hacer los ensayos de resistencia se cabecearon los cilindros con un compuesto químico a base de azufre. El polvo del compuesto se fundió con una parrilla de plato caliente marca Cimarec con placa cerámica y rango de temperatura de 5 a 400 °C en una campana de extracción de humos marca Davi.
- Prueba de los cilindros. Una vez cabeceado los cilindros se probaron primeramente con una resistencia baja luego con mayor presión hasta que sucedió la fractura, se anotó la presión más alta registrada antes de la ruptura, se anotó el tipo de falla. En esta prueba se usó una prensa hidráulica de operación eléctrica de 120 T para realizar ensayos de compresión y flexión Marca Davi Modelo 1202F.

b) Vigas

- Se engrasaron los moldes para las vigas un día antes de la elaboración de estas.
- Una vez mezclado el concreto se llenaron los moldes y se colocaron en un lugar sombreado para esperar el fraguado del concreto, para después desmoldar las vigas y aplicar la membrana de curado como a los cilindros. Los moldes usados para las vigas fueron de 15 x 15 x 60 cm Marca Davi.
- Después del curado del concreto a los 28 días se llevó a cabo la prueba de resistencia a la flexión. Antes de someter a prueba las vigas se seccionó la viga en sus 3 claros (Figura 7) como lo estipula la norma mexicana NMX-C-191-ONNCCE-2004. Posterior a esto se aplicó la carga para determinar el módulo de ruptura como se muestra en la Figura 8.

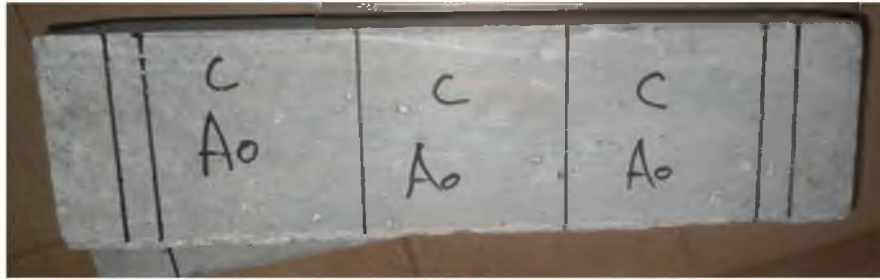


Figura 7: Vigas de 60 x 15 x 15 cm



Figura 8: Viga de prueba con aplicación de una carga en los tercios

3. RESULTADOS

a) Muestreo de los agregados

Con los datos de la granulometría se elaboraron las curvas que se muestran en la Figura 9, comparadas con las curvas de la Figura 1 se puede ver que las curvas de granulometría de los agregados considerados en el presente estudio, corresponden a un agregado fino y un número de tamaño típico de agregado grueso.

a) Cálculo del módulo de finura

Para el cálculo de módulo de finura la cantidad total de la muestra fue de 4.275 kg. Se perdió 0.02 Kg, por ser este material muy fino y volátil. Con los datos obtenidos de la granulometría de los agregados finos, se calculó el módulo de finura, el cual fue de 2.2. El módulo de finura del agregado fino se utilizó para determinar las proporciones de los agregados finos y gruesos en cada uno de las diferentes mezclas que se realizaron.

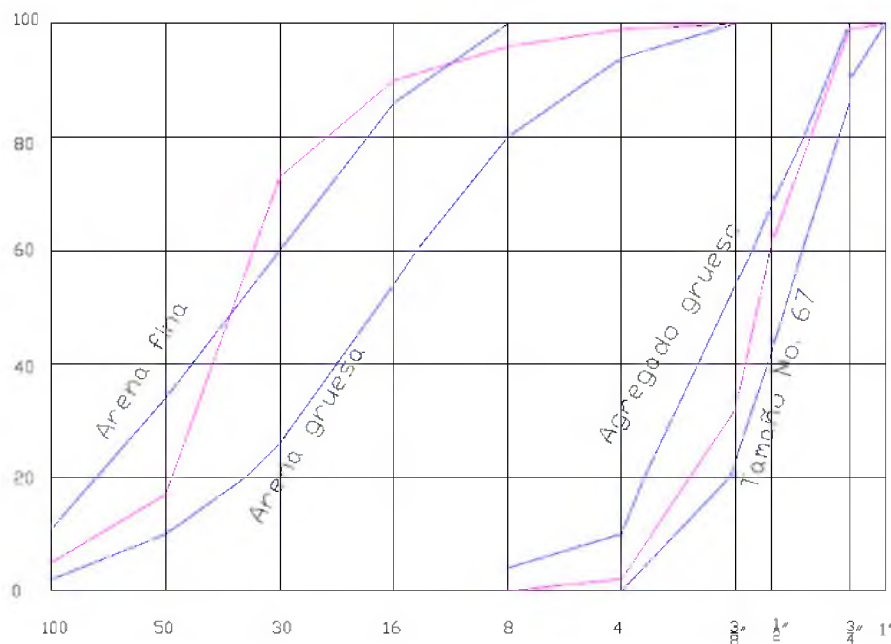


Figura 9: Curvas de granulometría elaboradas con datos de los agregados de prueba

b) Pruebas de resistencia a la compresión

En la Figura 10 se puede observar el comportamiento de las curvas de resistencia a la compresión del concreto de las pruebas a los 7 y 28 días, se observa como ésta tendencia es similar a edades diferentes del curado del concreto.

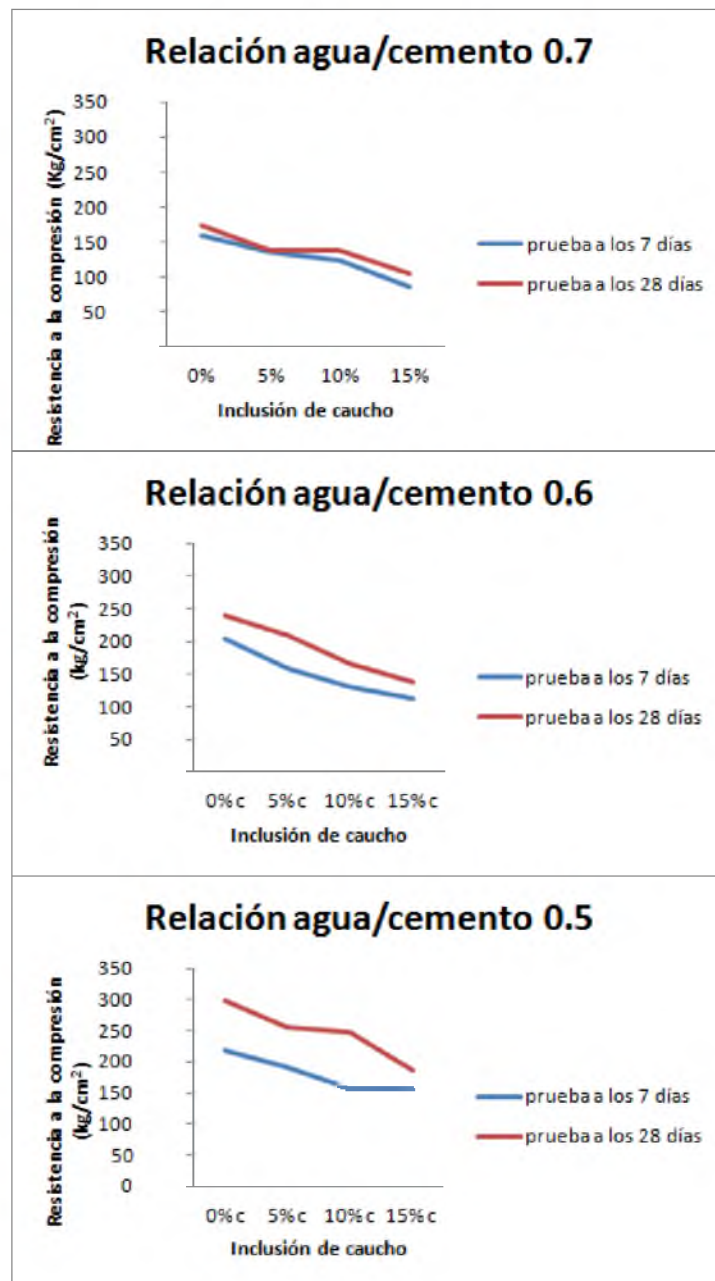


Figura 10: Resistencia a la compresión del concreto

En la Tabla 11 y Figura 11 se muestran los valores promedio de resistencia a la compresión de especímenes probados a los 28 días.

Tabla 11: Datos de resistencia a la compresión promedio de cilindros de concreto a los 28 días (Kgf/cm²)

Contenido de caucho	Relación Agua/Cemento		
	0.5	0.6	0.7
0%	296.926	240.736	174.892
5%	255.691	208.874	137.578
10%	246.275	167.067*	138.058
15%	186.078	138.984	105.926

* mezcla elegida para la elaboración de vigas

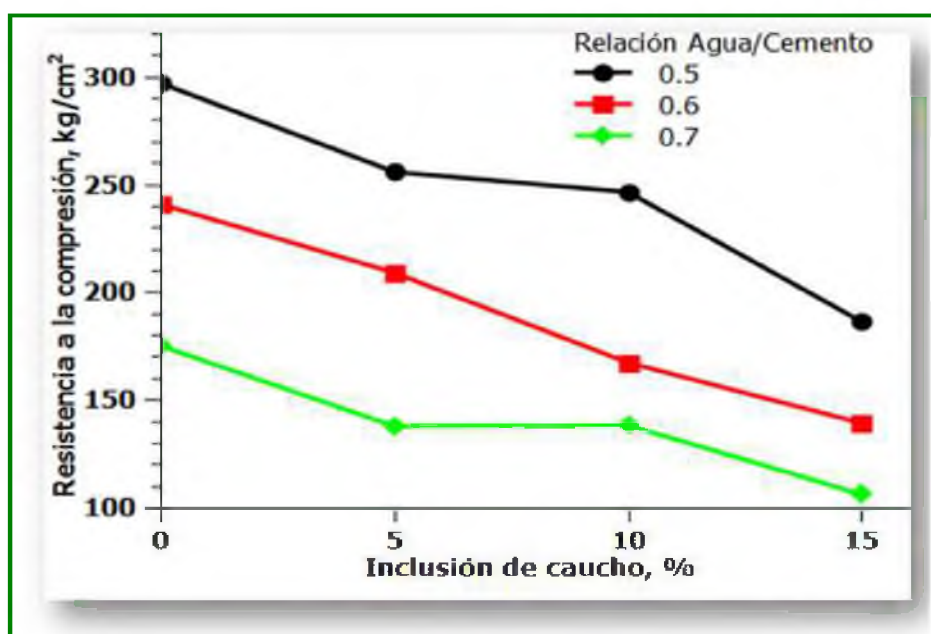


Figura 11: Resistencias promedio de los especímenes de prueba a diferentes Relaciones Agua/Cemento.

Se encontraron diferencias significativas de resistencia a la compresión tanto en los niveles de Relación agua/cemento como en los diferentes porcentajes de inclusión de caucho con $p \leq 0.05$. Así mismo en las interacciones de ambos factores con $p \leq 0.05$ (Tabla 12).

Tabla 12: Cuadro Anova de resistencia a la compresión

Fuente	DF	Tipo I SS	Cuadrado de la media	F-valor	Pr>F
Ra/c	2	68973.44	34486.72	375.73	<.0001***
% caucho	3	40952.09	13650.69	148.72	<.0001***
R a/c * % caucho	6	3199.10	533.18	5.81	0.0007***

Se realizó la comparación de medias usando la prueba Tukey los resultados se muestran en la Tabla 13. La comparación de medias también mostró diferencias significativas ($p \leq 0.05$) entre los diferentes niveles de inclusión de caucho con una tendencia a disminuir la resistencia a la compresión al aumentar el porcentaje de inclusión de caucho en las mezclas dentro del mismo nivel de relación agua/cemento.

Tabla 13: Comparación de medias con datos de resistencia a la compresión

Media	% Caucho
237.51 ^a	0%
200.71 ^b	5%
183.80 ^c	10%
143.66 ^d	15%

La mezcla que se eligió para la elaboración de vigas en la prueba de flexión fue la de R a/c 0.6 y 10% de inclusión de caucho por ser la más cercana a 150 kgf/cm^2 , para cumplir con las especificaciones de resistencia para los estanques.

c) Pruebas de resistencia a la flexión

En la Tabla 14 se muestran los valores promedio de resistencia a la flexión de especímenes probados a los 28 días.

Tabla 14: Datos de resistencia a la flexión con vigas de concreto

Contenido de Caucho	Relación Agua/Cemento	
	0.5	0.6
0%	13.86	9.45
10%	11.42	10.15

Se encontraron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) de resistencia a la flexión en los niveles de relación agua-cemento (0.5 y 0.6), pero no se encontraron diferencias significativas en los niveles de porcentaje de inclusión de caucho (Tabla 15). Se encontraron diferencias significativas en las interacciones de ambos factores.

Tabla 15: Cuadro Anova de la prueba de flexión

Fuente	DF	Tipo I SS	Cuadrado de la media	F-valor	Pr>F
R a/c	1	24.14	24.14	42.59	0.0002***
% caucho	1	2.25	2.25	3.98	0.0813
R a/c * % caucho	1	7.39	7.39	13.04	0.0069***

d) Peso

La tabla 16 muestra los datos de peso volumétrico húmedo y seco de los cilindros.

Tabla 16: Peso volumétrico (kg) de los cilindros de prueba con sus respectivos porcentajes de caucho y de relación agua /cemento.

Contenido de Caucho	Relación Agua/Cemento					
	0.5		0.6		0.7	
	PVH [*]	PVS ^{**}	PVH	PVS	PVH	PVS
0%	2,335.714	2,315.72	2,367.860	2,288.05	2,292.860	2,309.43
5%	2,260.714	2,274.84	2,303.570	2,239.62	2,264.286	2,252.83
10%	2,203.570	2,209.43	2,182.140	2,183.02	2,232.140	2,219.50
15%	2,153.570	2,174.21	2,167.860	2,132.08	2,100.000	2,124.53

^{*}PVH: Peso Volumétrico Húmedo; ^{**}PVS: Peso Volumétrico Seco

Se encontraron diferencias significativas de peso ($p \leq 0.005$) en al menos un nivel de relación agua/cemento y en la inclusión de caucho (Tabla 17); así como en la interacción de ambos factores.

Tabla 17: Cuadro Anova para el peso

Fuente	DF	Tipo I SS	Cuadrado de la media	F-valor	Pr>F
R a/c	2	6481.42	3240.71	25.13	<.0001
% caucho	3	128728.41	42909.47	332.77	<.0001
R a/c * % caucho	6	3111.21	518.53	4.02	0.0063

La prueba de comparación de medias muestra (Tabla 18) que sí hubo diferencias significativas entre los diferentes niveles de inclusión de caucho, mostrando además que con 0% de inclusión de caucho se tiene la media mayor para peso volumétrico y que con un 15% de inclusión de caucho se tiene una media menor en peso volumétrico. El contenido de caucho en las mezclas disminuye significativamente en la reducción del peso volumétrico del concreto seco.

Tabla 18: Cuadro de comparación de medias de peso volumétrico

Media	% Caucho
2304.404 ^a	0%
2255.766 ^b	5%
2203.982 ^c	10%
2143.607 ^d	15%

El peso volumétrico del concreto endurecido a los 28 días, disminuyó hasta en un 6% cuando se le adicionó 15% de caucho, para el caso de la mezcla con relación agua/cemento de 0.5%. La Figura 12 muestra los gráficos de los valores promedio de resistencia a la compresión.

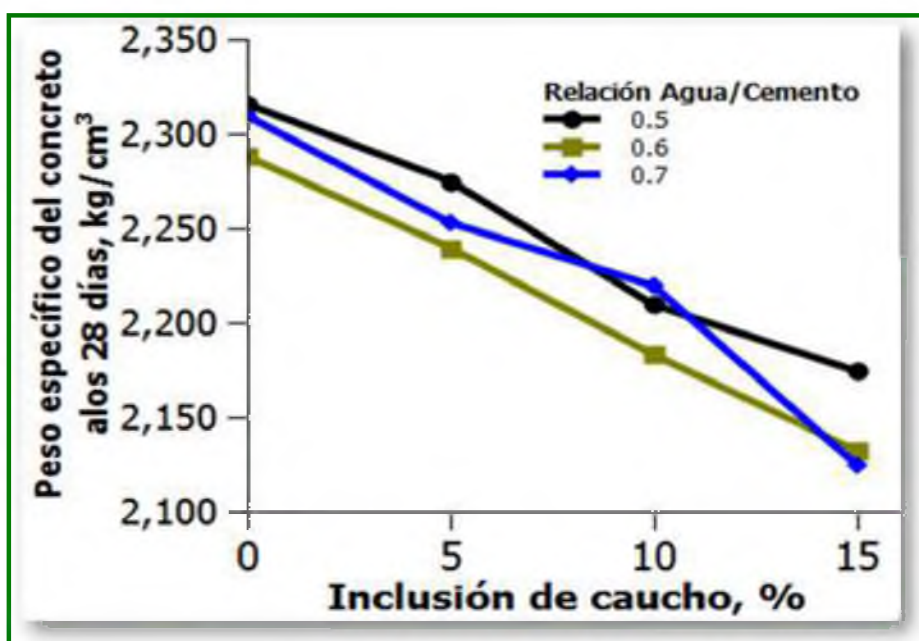


Figura 12: Peso volumétrico promedio de los especímenes a diferentes relaciones agua-cemento e inclusión de caucho

4. DISCUSIÓN

Desde la antigüedad se han usado las fibras ya sea naturales, sintéticas o de acero como refuerzo en las construcciones, es así como se usó el pasto en las construcciones de adobe o la malla metálica en las construcciones de concreto. Incluso existen las normas ASFM 1116, EN14889 las cuales regulan el uso de fibras en la construcción. Las fibras sintéticas que se han usado pueden estar compuestas principalmente por Acrílico, Aramid, Carbón, Polipropileno, Poliestileno, Nylon y Poliester, Sika® (Since, 1910).

El material a emplear en el concreto varía dependiendo de la finalidad que este tenga y la problemática que se desee resolver con ello. En la problemática de los sismos intervienen muchos factores dentro de los cuales la calidad de la construcción juega un papel muy importante ya que por las propiedades de los materiales de construcción se pueden afectar la resistencia a compresión, tensión y corte, peso unitario, módulo de elasticidad, llevando con esto al colapso o amortiguamiento sísmico (IAEE Y NICEE, 2004).

Siguiendo las recomendaciones de Abdel-Gawad *et al.* (2010) se realizaron mezclas a partir de 0 hasta 15% de sustitución del agregado fino por fibras de caucho. Los resultados obtenidos coinciden con los autores, que al agregar caucho a la mezcla se disminuye la resistencia a la compresión. Este comportamiento fue constante en todos los niveles de relación agua/cemento; sin embargo la resistencia a la flexión no se afectó de manera significativa ($p > 0.05$) al incluir 10% de fibras de caucho en mezclas con la misma Relación agua/cemento, es decir, R a/c 0.5 ó 0.6.

Con la inclusión de caucho el efecto de la ruptura no es explosiva. Después de que se registró el valor máximo de carga soportada en la prueba de resistencia a la compresión la falla no era visible aún. Pero al prolongar el tiempo de la carga sobre el espécimen la falla se hacía visible. Se observó que en los especímenes que contenían caucho a diferencia del testigo, la forma de ruptura fue ramificada sin desprendimiento de pequeñas piezas a manera de explosión.

5. CONCLUSIONES

En el presente estudio se encontró que al incluir caucho en la mezcla se logra disminuir el peso volumétrico del concreto, lo cual beneficiaría el acarreo del material, dado que se tendría mayor volumen por unidad de peso. Esto particularmente puede ser una alternativa para los sitios con potencial de desarrollar la acuicultura pero donde difícilmente se pueden conseguir y transportar los materiales de construcción por la falta de vías de acceso y lo accidentado de los terrenos. Con la inclusión de caucho en la mezcla se logra un concreto más ligero, pudiendo además disminuir el riesgo por contaminación de llantas de desecho, aunque esto no implique necesariamente una reducción de costos debido a que en la zona no existen bancos de llantas de desecho, ni de molienda de éstas.

En la presente tesis se propone las fibras de caucho con grosor de 2 mm y longitud de hasta 2 cm para reforzar las estanquerías de concreto. Esto basado en el resultado obtenido en la variable resistencia a la flexión donde no se encontraron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) en los especímenes de concreto con porcentajes de inclusión de caucho (0, 5 10 y 15%) para el mismo nivel de R a/c.

6. RECOMENDACIONES

Se recomienda que para próximas investigaciones se prueben las mejores combinaciones (relación agua-cemento de 0.6 y 10% de inclusión de caucho) de la mezcla concreto-caucho en la construcción de estanques, así como probar la toxicidad del concreto-caucho en organismos que se encuentren en contacto con estos materiales.

Con el presente trabajo se encontró que con la inclusión de caucho se disminuye el esfuerzo a la compresión, por lo que no se recomiendan inclusiones de caucho mayor al 10% ya que se podría sacrificar el esfuerzo a la compresión con lo cual la construcción se volvería más frágil.

Se recomienda también realizar pruebas de durabilidad y pruebas sísmicas en la mezcla resultante, derivado de los resultados obtenidos de la prueba de resistencia a la flexión.

7. BIBLIOGRAFÍA

Abdel-Gawad A. K., El-Gammal A., El-Sherbini Y. & A. Shalaby 2010. Compressive strength of concrete utilizing waste tire rubber. *Journal of emerging trends in engineering and applied sciences*. 1(1): 96-99.

ACI 211.1-91 Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete-Procedure for Mix Design.

ACI 211.2-98. Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete. Reported by ACI Committee 211.

Andres Quezada V. D. 2001. Tesis: La Recolección y Utilización de Neumáticos Desechados como Combustible Alternativo en Fábricas de Cemento. Universidad de Talca, Chile.

ASTM C33. Standard Specification for Concrete Aggregates.

ASTM C125. Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates.

ASTM C136-06. Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates.

ASTM C617/C617M-12. Standard Practice for Capping Cylindrical Concrete Specimens.

Castello Orvay F. 1993. Acuicultura Marina: Fundamentos Biológicos y Tecnología de la Producción. Editorial: Universidad de Barcelona.

Castro G. 2008. Materiales y Compuestos para la Industria del Neumático. Departamento de Ingeniería Mecánica F.I.U.B.A.

Determinación de la Resistencia a la Flexión del Concreto. Diciembre 2008. Sección coleccionable 16. Revista IMCYC.

Elaboración y curado de especímenes en el laboratorio. Octubre 2011. Revista IMCYC segunda parte.

FAO. 2003. Desarrollo de la Acuicultura (Procedimientos idóneos en la fabricación de alimentos para la acuicultura).

Gaggino Rosana. 2004. “Un Nuevo desafío: construir con materiales reciclados” *Revista Vivienda Popular*. Montevideo, Uruguay. Ed. Facultad de Arquitectura de la Universidad de la República. N° 14, pp. 59 a 62.

IAEE Y NICEE. 2004. Resistencia sísmica en edificaciones de autoconstrucción-Tipos de daño y planeación.

Juan Fernando González G. Febrero 2007, Reciclar es lo de hoy. Revista Construcción y Tecnología.

Matthew Neville A. 1998. Tecnología del Concreto. Editorial Trillas.

Metha K. Monteiro P. 1998. Concreto, Estructura, Propiedades y Materiales. Editado por el instituto Mexicano del Cemento y del Concreto.

Montalván L.R.S., Suárez M.D.L. y Téllez L.A.E. 2010. Estudio y Aplicación Normativa en la Fabricación del Cemento. Tesis de Ingeniero Industrial. Instituto Politécnico Nacional. SEP. México, D.F.

Neville A. M. 1999. Tecnología del concreto. IMCYC.

NMX-C-077-1997-ONNCCE. “Industria de la Construcción-agregados para concreto-análisis granulométrico-Método de prueba”.

NMX-C-109-ONNCCE-2004. Industria de la Construcción-Concreto-Cabeceo de Especímenes Cilíndricos.

NMX-C-191-ONNCCE-2004. Determinación de la Resistencia a la Flexión del Concreto Usando una Viga simple con Carga en los Tercios del Claro.

NMX-C-414-ONNCCE-2004. “Industria de la construcción-cementos hidráulicos-especificaciones y métodos de prueba”.

NMX-C-156-ONNCCE-2010. Industria de la Construcción-Concreto hidráulico-Determinación del revenimiento en el concreto fresco.

Pruebas de Resistencia a la Compresión. Junio 2006. Revista IMCYC.

Sika Informaciones Técnica. Concreto Reforzado con Fibras. Consultado en el sitio de internet

http://www.google.com.mx/url?sa=t&ret=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CCoQFjAA&url=http%3A%2F%2Fcol.sika.com%2Fdms%2Fgetdocument.get%2F7bef35eb-d2bb-3ea4-b51f-b5bc3c99b1e2%2FConcreto%2520reforzado%2520con%2520fibras.pdf&ei=IlVVU5S-H6b28AGxmYCgCA&usg=AFQjCNE-m6OVRaOpTN5VP3LnoQ_19AdF0A

Steven H. K. y W. C. Panarese. 1992. Diseño y control de mezclas de concreto traducido del original: *Design and Control of Concrete Mixtures* por Ing. Manuel Santiago Bringas. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. México.