



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO



**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

CONCRETO ECOLÓGICO ELABORADO A PARTIR DE DESECHOS DE VIDRIO COMO SUSTITUTO PARCIAL DE LOS AGREGADOS FINOS Y GRUESOS

Tesis que para obtener el grado de:

Maestro en Ciencias en Ingeniería Ambiental

PRESENTA:

ING. MIGUEL ANGEL CONTRERAS FLOTA

ASESOR:

DR. WILFRIDO MARTÍNEZ MOLINA

CO-ASESOR:

DRA. ELIA MERCEDES ALONSO GUZMÁN

Morelia, Michoacán, octubre de 2023



MCIA
Maestría en Ciencias
en Ingeniería Ambiental
UMSNH



RESUMEN

En la actualidad nuestro planeta enfrenta posiblemente uno de los niveles de contaminación más altos registrados hasta ahora, el equilibrio ecológico se ve constantemente afectado por una multitud de factores contaminantes generados irresponsablemente por el ser humano. La idea del concreto ecológico surge principalmente de la necesidad de combatir la contaminación que generamos diariamente, y básicamente se propone utilizar residuos de envases de vidrio en la producción de este tipo de concreto, incorporando una parte de estos residuos en su composición. La presente investigación se enfocará en estudiar y analizar el comportamiento del concreto adicionado con desechos de vidrio, en sustitución parcial de sus agregados pétreos, buscando no afectar sus prestaciones físicas, mecánicas y químicas. Se elaboraron 11 mezclas: la testigo, A10%, A20%, A30%, G10%, G20%, G30%, A-G10%-10%, A-G15%-15%, A- G10%-20% Y A-G20%-10%, en donde las de nomenclatura A son las de sustitución del agregado fino por vidrio molido, las de G son las de sustitución de agregado grueso por vidrio triturado y las de A-G son las de sustitución de ambos agregados, todos con los porcentajes respectivamente indicados; para cada mezcla se elaboraron especímenes cilíndricos de 10 x 20 cm para la prueba de resistencia a compresión. De las 11 mezclas mencionadas se escogieron las 4 de mejor comportamiento a resistencia a compresión para elaborar especímenes cilíndricos de 10 x 20 cm, de 15 x 30 cm y vigas de 15 x 15 x 60 cm para pruebas no destructivas y destructivas a edades de 7, 28, 60 y 90 días, y las de durabilidad a 190 días. Dichas pruebas se hicieron con el fin de poder encontrar el porcentaje óptimo de sustitución de agregado pétreo por desechos de vidrio, el cual mantenga o incluso mejore las características para las que fue diseñado el concreto hidráulico. Se realizó un Análisis de Ciclo de Vida para comparar nuestro concreto ecológico comparándolo contra un concreto tradicional, en el cual los resultados nos dicen que nuestro concreto disminuye significativamente varios impactos ambientales en comparación con el tradicional. De todas las pruebas realizadas y de acuerdo al análisis de ciclo de vida, se encontró que resulta viable el sustituir los agregados pétreos por desechos de vidrio hasta un 20%, ya que cumple con lo especificado en las normas y además se reduciría el impacto ambiental al reciclar el vidrio y disminuir la sobreexplotación de los bancos de materiales pétreos.

Palabras Clave: Concreto hidráulico, desechos, vidrio, agregados pétreos, reciclaje.



SUMMARY

Our planet is currently facing possibly one of the highest levels of pollution ever recorded, the ecological balance is constantly affected by a multitude of polluting factors irresponsibly generated by human beings. The idea of ecological concrete arises mainly from the need to combat the pollution that we generate daily, and basically proposes to use waste glass containers in the production of this type of concrete, incorporating a part of these wastes in its composition. This research will focus on studying and analyzing the behavior of concrete added with glass waste, in partial substitution of its stone aggregates, seeking not to affect its physical, mechanical and chemical performance. Eleven mixtures were prepared: the control, A10%, A20%, A30%, G10%, G20%, G20%, G30%, A-G10%-10%, A-G15%-15%, A-G10%-20% AND A-G20%-10%, where those of nomenclature A are those of substitution of fine aggregate by ground glass, those of G are those of substitution of coarse aggregate by crushed glass and those of A-G are those of substitution of both aggregates, all with the percentages respectively indicated; for each mix, cylindrical specimens of 10 x 20 cm were prepared for the compressive strength test. Of the 11 mixtures mentioned above, the 4 with the best compressive strength performance were chosen to prepare cylindrical specimens of 10 x 20 cm, 15 x 30 cm and beams of 15 x 15 x 60 cm for non-destructive and destructive tests at ages of 7, 28, 60 and 90 days, and durability tests at 190 days. These tests were carried out in order to find the optimum percentage of stone aggregate substitution for glass waste, which would maintain or even improve the characteristics for which the hydraulic concrete was designed. A Life Cycle Analysis was performed to compare our ecological concrete against a traditional concrete, in which the results tell us that our concrete significantly decreases several environmental impacts compared to the traditional one. From all the tests carried out and according to the life cycle analysis, it was found that it is feasible to replace the stone aggregates with glass waste up to 20%, since it complies with the specified standards and would also reduce the environmental impact by recycling glass and reducing the overexploitation of the banks of stone materials.

Keywords: Hydraulic concrete, wastes, glass, stone aggregates, recycling



DEDICATORIAS

Primero que nada, quiero agradecer a Dios por guiarme en mi camino, darme la oportunidad, el tiempo, la vida y las fuerzas necesarias para poder lograr una meta más en mi vida y ayudarme a crecer como persona.

A mis padres **Miguel Angel Contreras Parra** y **Maricela Flota Sánchez**, cuya constante dedicación, sabiduría y ejemplo de perseverancia han sido una brújula en mi vida. Su apoyo inquebrantable y su confianza en mis capacidades han sido el cimiento sobre el cual he construido este trabajo y a través de sus enseñanzas, he aprendido el valor del esfuerzo y la importancia de nunca dejar de buscar el conocimiento. Han sido mi guía a lo largo de este proceso y porque sin ellos nada de esto habría sido posible, porque les debo cada una de mis metas conseguidas en mi vida y porque los amo con todo mi corazón.

A mis hermanos **Luis Fernando Contreras Flota** y **Oscar Rafael Contreras Flota** por siempre estar para apoyarme en todo lo que hago, por creer en mí y por ser los mejores hermanos que Dios me pudo dar. ¡Los amo!

A mi tía **Paula Guadalupe Contreras Parra**, por ser como mi segunda madre y quien ha sido un faro de apoyo, cariño y amor a lo largo de mi vida. Tu ejemplo de determinación y tu inquebrantable devoción son fuentes inagotables de admiración y a través de esta tesis, deseo honrar no solo tu influencia en mi crecimiento académico, sino también expresar cuánto te admiro y lo mucho que te amo.

A mi padrino **Juan Pablo González Valdés**, por apoyarme siempre en todo, por ser un gran amigo para mí, y esta dedicación es un humilde reconocimiento a tu influencia en mi crecimiento y desarrollo. Agradezco sinceramente por tu presencia constante en los buenos y malos momentos, te quiero mucho.

A mi esposa **Fátima Alejandra Pérez Jacobo**, su apoyo inquebrantable, paciencia y comprensión han sido el viento bajo mis alas a lo largo de este viaje. Tu presencia ilumina cada paso que doy, y tu aliento ha sido mi combustible en los momentos de desafío. ¡Te amo muchísimo, hermosa!



“CONCRETO ECOLÓGICO ELABORADO A PARTIR DE DESECHOS DE VIDRIO COMO SUSTITUTO PARCIAL DE LOS AGREGADOS FINOS Y GRUESOS”

En especial, hay una figura que brilla con una luz eterna, una presencia que ha dejado una huella indeleble en mi ser: mi querida abuelita **María Julia Aida Parra Reyes**. Aunque el tiempo y la distancia nos separaron, su amor y sabiduría siguen vivos en cada rincón de mi corazón y en cada paso que doy.

Recuerdo con cariño los momentos mágicos que compartimos. Las historias que tejías con tus palabras, llenas de experiencias y lecciones de vida, se convirtieron en las bases de mi propia comprensión del mundo. Tu sabiduría, adquirida a lo largo de años de vivencias, siempre se manifestaba como un faro de orientación en los momentos de incertidumbre.

Tu amor incondicional es un regalo que atesoro. A pesar de las tormentas y los desafíos que la vida a veces presentaba, siempre estabas ahí, con una sonrisa tierna y un abrazo cálido, recordándome que tenía en ti un apoyo inquebrantable. Tu amor fue el bálsamo que curó heridas y el refugio en tiempos de turbulencia.

Tu partida dejó un vacío profundo en mi vida, pero también me recordó la importancia de aprovechar cada momento con aquellos que amamos. Me inspiras a vivir plenamente y a apreciar los lazos que compartimos mientras estemos juntos en este mundo.

Hoy, en esta página dedicada a tu memoria, quiero expresar mi sincero agradecimiento. Gracias por ser mi guía, mi confidente y mi amiga. Gracias por cada sonrisa, cada consejo y cada abrazo apretado.

Aunque ya no puedo verte con mis ojos, siento tu presencia en cada logro y en cada desafío superado. Cada vez que abrazo a un ser querido, cada vez que pruebo una receta tuya, siento como si estuvieras junto a mí, guiándome con amor silencioso.

Abuelita, este agradecimiento apenas puede capturar la magnitud de lo que significas para mí. Permíteme honrar tu legado viviendo una vida llena de amor, compasión y aprendizaje, valores que me enseñaste con tu ejemplo. Que tu espíritu siga iluminando mi camino mientras avanzo en esta jornada llamada vida. Siempre te extrañaré y te llevaré en mi corazón hasta que nos encontremos nuevamente.

Todos mis logros te los dedico a ti, y estoy seguro que desde el cielo sonríes, de la misma forma que siempre los hacías. ¡Te amo mucho, Mi July!



AGRADECIMIENTOS

A la **Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo** y a la **Facultad de Ingeniería Civil** por haberme brindado lo necesario para poder ser un buen ingeniero; a la **Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental** por brindarme todo lo necesario para seguir adquiriendo conocimiento en la ingeniería; al **Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT)** por otorgarme una beca durante el transcurso de mis estudios de maestría; y al **laboratorio de materiales “Ing. Luis Silva Ruelas”** por haberme brindado el espacio y equipo necesario para la experimentación de la tesis.

A mi asesor **Dr. Wilfrido Martínez Molina**, por su inestimable guía y apoyo a lo largo de todo este proceso de investigación y redacción de mi tesis. Su compromiso con mi crecimiento académico y su profundo conocimiento en el campo han sido fundamentales para el éxito de este trabajo. Porque me permitió aprender mucho más de lo estudiado en el trabajo de tesis y por ser un hombre lleno de buenos deseos.

A mi co-asesora **Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán**, por sus valiosos comentarios y sugerencias, las cuales han enriquecido enormemente mi enfoque y han contribuido a la calidad y profundidad de mi investigación. Siempre estuvo dispuesta a escuchar mis ideas, aportando perspectivas únicas que me permitieron abordar los desafíos con una visión renovada y por ser una mujer maravillosa, llena de buenos deseos.

A mis compañeros **Luis Alberto González Luna** y **Fabricio Ali Hernández Ferreyra**, por su apoyo incondicional desde el inicio hasta el final de la experimentación de la tesis, porque sin duda alguna sin su apoyo este trabajo no hubiera sido posible y por ser unos grandes amigos a los cuales aprecio muchísimo.

A mis amigos y compañeros que siempre me brindaron todo su apoyo de alguna u otra manera: **José Jesús Zauno Zamudio, Carlos Uriel Espino González, Noel Díaz González, Marcos Ariel Villanueva Guzmán, Juan Manuel Chávez, Alan Calixto Saavedra, José Eduardo Aguilar López, Aldo Darío Uribe, Luis Angel Cortes Melgarejo, Cesar García, Christian André Gómez Mesa** y a todos aquellos que siempre me brindaron su apoyo y amistad.



ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	I
SUMMARY	II
DEDICATORIAS	III
AGRADECIMIENTOS	V
ÍNDICE GENERAL	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
ÍNDICE DE TABLAS	XVIII
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Justificación	2
1.2. Hipótesis	4
1.3. Objetivos	4
1.3.1. Objetivo general	4
1.3.2. Objetivos específicos	4
2. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE	5
3. ANTECEDENTES	7
3.1. Impacto del sector de la construcción en el medio ambiente	7
3.2. Sostenibilidad en los materiales de construcción.....	8
3.3. Importancia de la sustentabilidad en la construcción	9
4. MARCO TEÓRICO	10
4.1. Concreto hidráulico.....	10
4.1.1. Conceptos generales sobre el concreto	11
4.1.1.1. Durabilidad	11
4.1.1.2. Relación agua/cemento.....	12
4.2. Cemento Portland.	14
4.2.1. Fabricación del Cemento Portland.	15
4.2.1.1. Proceso Húmedo.....	16
4.2.1.2. Procesos Seco y Semi-seco	17
4.2.2. Componentes de los cementos.....	18
4.2.3. Hidratación del cemento Portland.	19
4.3. Agregados pétreos.....	20
4.3.1. Agregado grueso (grava)	21



4.3.2. Agregado fino (Arena).....	22
4.3.3. Clasificación de los agregados pétreos.....	23
4.4. Desechos de vidrio.....	24
4.4.1. Vidrio.....	24
4.4.2. Ventajas del reciclaje del vidrio.....	25
4.4.3. Componentes del vidrio.....	26
4.4.4. Proceso de fabricación del vidrio.....	26
4.4.5. Propiedades del vidrio.....	26
4.4.5.1. Propiedades Físicas.....	27
4.4.5.2. Propiedades mecánicas.....	27
4.4.5.3. Propiedades químicas.....	27
4.4.6. Antecedentes del uso de desechos de vidrio en concreto.....	28
4.4.6.1. Antecedentes de uso de vidrio como sustituto parcial de agregado grueso.....	28
4.4.6.2. Antecedentes de uso de vidrio como sustituto parcial de agregado fino.....	28
4.4.7. Reciclaje y reutilización del vidrio.....	29
4.4.8. Recomendaciones para manipular el vidrio triturado y molido.....	29
4.4.9. Desafío del uso de desechos de vidrio en el concreto hidráulico.....	30
4.4.10. Aplicaciones potenciales del concreto con desechos de vidrio.....	31
4.5. Análisis de Ciclo de Vida (ACV).....	32
4.5.1. Software “SimaPro”.....	34
4.5.1.1. Impactos ambientales que mide “SimaPro”.....	34
5. METODOLOGÍA.....	36
5.1. Caracterización de los agregados pétreos.....	37
5.1.1. Agregado fino (arena).....	37
5.1.1.1. Obtención de la muestra.....	37
5.1.1.2. Cuarteo de agregado finos.....	38
5.1.1.3. Masa volumétrica seca y suelta.....	42
5.1.1.4. Masa volumétrica seca y compactada.....	45
5.1.1.5. Humedad de absorción en arenas.....	47
5.1.1.6. Densidad relativa saturada en arenas.....	49
5.1.1.7. Análisis granulométrico.....	52
5.1.1.8.- Impurezas orgánicas en la arena.....	57



5.1.1.9. Sedimentación en arenas	58
5.1.1.10. Reporte del agregado fino.....	60
5.1.2. Agregado grueso (grava)	60
5.1.2.1. Obtención de la muestra	60
5.1.2.2. Cuarteo de agregados gruesos	61
5.1.2.3. Masa volumétrica seca y suelta	62
5.1.2.3. Masa volumétrica seca y compactada	64
5.1.2.4. Humedad de absorción en gravas	66
5.1.2.5. Densidad en gravas.....	69
5.1.2.6. Análisis granulométrico.....	70
5.1.2.7. Reporte del agregado grueso	73
5.2. Caracterización de los desechos de vidrio	74
5.2.2. Modalidades a emplear de los desechos de vidrio.....	74
5.2.2.1. Vidrio Molido.....	74
5.2.2.2. Vidrio triturado.....	77
5.3. Caracterización del cemento	77
5.3.1. Consistencia normal del cemento.....	78
5.3.2. Tiempos de fraguado del cemento.....	80
5.3.3. Densidad del cemento.....	81
5.4. Diseño de concreto por el método “ACI”	83
5.4.1. Elección del revenimiento	84
5.4.2. Elección del tamaño máximo del agregado	85
5.4.3. Cálculo del agua de mezclado y contenido de aire.....	85
5.4.4. Selección de la relación agua/cemento.....	86
5.4.5. Cálculo del contenido de cemento.....	87
5.4.6. Estimación del contenido de agregado grueso	88
5.4.7. Estimación del contenido del agregado fino	89
5.4.8. Ajustes por humedad de absorción del agregado	90
5.5. Análisis del ciclo de vida (ACV).....	91
5.5.1. Definición de objetivo del ACV.....	91
5.5.2. Alcance del análisis del ciclo de vida.....	91
5.5.2.1. Unidad funcional y flujo de referencia	91



5.5.2.2. Límites del sistema	92
5.5.2.3. Criterios de cohorte y asignación para cada escenario	92
5.5.3. Inventario de ciclo de vida (ICV)	96
5.5.3.1. Obtención de materias primas	97
5.5.3.2. Transporte de materias primas	98
5.5.3.3. Manufactura del concreto	99
5.5.3.4. Transporte y entrega del producto	100
5.5.4. Evaluación del impacto del ciclo de vida (ICV)	101
5.6. Fabricación de las mezclas en estudio y de los especímenes	101
5.6.1. Primera etapa	101
5.6.2. Segunda etapa	103
5.6.3. Elaboración de las mezclas en el laboratorio	105
5.6.4. Fabricación y curado de los especímenes	107
5.7. Pruebas de calidad para el concreto en estado fresco y endurecido	109
5.7.1. Pruebas al concreto en estado fresco	110
5.7.1.1. Revenimiento	110
5.7.2. Pruebas al concreto endurecido	111
5.7.2.1. Pruebas no destructivas	111
5.7.2.1.1. Resistividad eléctrica	111
5.7.2.1.2. Velocidad de pulso ultrasónico (VPU)	114
5.7.2.2. Pruebas destructivas	116
5.7.2.2.1. Resistencia a compresión	116
5.7.2.2.2. Módulo de elasticidad estático	119
5.7.2.2.3. Resistencia a la tensión por compresión diametral	121
5.7.2.2.4. Resistencia a la flexión (módulo de ruptura)	123
5.7.2.3. Ensayos de durabilidad	125
5.7.2.3.1. Determinación de la absorción capilar	126
5.7.2.3.2. Determinación de la porosidad total	130
5.7.2.3.3. Determinación de la profundidad de carbonatación	133
6. RESULTADOS Y DISCUSIONES	136
6.1. Análisis de ciclo de vida (Evaluación del impacto)	136
6.1.1. Caracterización del impacto ambiental global	137



6.1.2. Impacto ambiental por categoría	139
6.1.2.1. Ecotoxicidad marina	139
6.1.2.2. Ecotoxicidad en agua fresca	140
6.1.2.3. Eutrofización en agua fresca.....	142
6.1.2.4. Cambio climático.....	144
6.1.2.5. Acidificación terrestre	145
6.1.2.6. Agotamiento de recursos fósiles.....	146
6.1.2.7. Agotamiento de recursos minerales.....	148
6.2. Propiedades del concreto primera etapa	149
6.2.1. Propiedades del concreto en estado fresco	149
6.2.1.2. Revenimiento.....	150
6.2.2. Propiedades del concreto en estado endurecido	151
6.2.2.1. Resistencia a compresión.....	151
6.2.2.2. Velocidad de pulso ultrasónico (VPU).....	152
6.3. Propiedades del concreto segunda etapa.....	153
6.3.1. Propiedades del concreto en estado fresco	153
6.3.1.1. Revenimiento.....	153
6.3.2. Propiedades del concreto en estado endurecido	154
6.3.2.1. Resistividad eléctrica.....	154
6.3.2.2. Resistencia a compresión.....	156
6.3.2.3. Tensión por compresión diametral.	157
6.3.2.4. Módulo de ruptura	158
6.3.2.5. Módulo de elasticidad estático	159
6.3.2.6. Absorción capilar.....	160
6.3.2.7. Profundidad de carbonatación	160
7. CONCLUSIONES	163
8. BIBLIOGRAFÍA	166



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Composición de los RSU recolectados diariamente. (INEGI, 2014)	3
Figura 2.- Porcentaje de materiales usados en un concreto. (Propia).....	11
Figura 3.- Efecto de la relación agua/cemento en la durabilidad y porosidad del concreto. (Putzmeister, 2019).....	12
Figura 4.- La relación agua/cemento afecta la durabilidad del concreto. (Putzmeister, 2019)	12
Figura 5.- Efecto de la cantidad de agua en la resistencia del concreto. (Putzmeister, 2019)	13
Figura 6.- Requerimientos de granulometría para agregado grueso. (NMX-C-111-ONNCCE, 2018)	22
Figura 7.- Límites de Granulometría para el agregado fino. (NMX-C-111-ONNCCE, 2018)	23
Figura 8.- Diferencia entre el cristal de sílice y el vidrio (A) Cristal organizado de Sílice, (B) Sílice presente en el vidrio. (http://www.quimitube.com/por-que-los-cristales-no-son-cristales.)	25
Figura 9.- Etapas del ciclo de vida de un producto (SinCeO2, 2023).	33
Figura 10.- Marco de referencia de un análisis de ciclo de vida. (Gestipolis, 2023)	34
Figura 11.- Banco de material “Joyitas”. (Google Earth, 2022).....	38
Figura 12.- Toma de muestra de material almacenado de arena del banco de material “Joyitas”. (Contreras, 2022)	38
Figura 13.- Cuarteador mecánico. (NMX-C-030-ONNCCE, 2004)	40
Figura 14.- Cuarteado del agregado fino por el método A. (Contreras, 2023).....	40
Figura 15.- Cambiando el material de un lado a otro por paleado. (Contreras, 2023)	41
Figura 16.- Aplanado de la parte superior del montículo de arena, por medio de la pala. (Contreras, 2023)	41
Figura 17.- Cuarteado después de aplanar con el montículo. (NMX-C-170-ONNCCE, 2019).....	41
Figura 18.- Muestra de arena dividida en cuartos (Contreras, 2023)	41
Figura 19.- Vaciado de la arena en el recipiente con volumen y masa conocida. (Contreras, 2023).....	43



“CONCRETO ECOLÓGICO ELABORADO A PARTIR DE DESECHOS DE VIDRIO COMO SUSTITUTO PARCIAL DE LOS AGREGADOS FINOS Y GRUESOS”

Figura 20.- Llenado del recipiente sobrepasando el borde. (Contreras, 2023).....	43
Figura 21.- Enrasado del recipiente con ayuda de la varilla. (Contreras, 2023)	44
Figura 22.- Masa de la arena con el recipiente. (Contreras, 2023).....	44
Figura 23.- Compactación de la arena con ayuda de la varilla punta de bala. (Contreras, 2023).....	46
Figura 24.- Obtención de la masa de la arena con el recipiente. (Contreras, 2023).....	46
Figura 25.- Arena saturada con agua. (Contreras, 2023).....	48
Figura 26.- Compactando la arena con el pisón. (Contreras, 2023)	48
Figura 27.- Peso del frasco de Chapman. (Contreras, 2023).....	50
Figura 28.- Masa de la arena saturada y superficialmente seca. (Contreras, 2023)	50
Figura 29.- Frasco con arena y agua, hasta la marca de 450 ml. (Contreras, 2023).....	51
Figura 30.- Peso del frasco junto con la arena y el agua. (Contreras, 2023)	51
Figura 31.- Masa de la muestra de arena a utilizar. (Contreras, 2023).....	53
Figura 32.- Mallas acopladas en orden decreciente. (Contreras, 2023)	53
Figura 33.- Agitado de las mallas por medio de dispositivo mecánico (Raf-tap). (Contreras, 2023).....	53
Figura 34.- Peso retenido en la malla No. 16. (Contreras, 2023)	53
Figura 35.- Límites granulométricos del agregado fino para mezclas de concreto y mortero.	55
Figura 36.- Gráficas de la granulometría de las 2 muestras representativas de la arena.	56
Figura 37.- Frasco con la arena y la solución de sosa caustica. (Contreras, 2023)	58
Figura 38.- Comparación del color del líquido de la botella con la solución normalizada. (Contreras, 2023)	58
Figura 39.- Arena en la marca de los 414 ml y el agua en la marca de 828 ml. (Contreras, 2023).....	59
Figura 40.- Después de 24 horas se observa si el material fino rebasa o no la marca de 444 ml. (Contreras, 2023).....	59
Figura 41.- Banco de material “La Roka”. (Google Earth, 2022)	61
Figura 42.- Material almacenado de grava del banco de material “La Roka”. (Contreras, 2023).....	61
Figura 43.- Cuarteo manual por paleado. (Contreras, 2023).....	62



Figura 44.- Cuarteo por el divisor de muestras. (Contreras, 2023)	62
Figura 45.- Recipiente lleno y enrasado con la mano. (Contreras, 2023)	63
Figura 46.- Masa del recipiente más el peso del material. (Contreras, 2023)	63
Figura 47.- Compactado del material con la varilla punta de bala. (Contreras, 2023).....	65
Figura 48.- Masa del recipiente más el peso del material compactado. (Contreras, 2023)..	65
Figura 49.- Muestra de grava saturada en agua durante 24 horas. (Contreras, 2023)	67
Figura 50.- Masa del material saturado y superficialmente seco. (Contreras, 2023)	67
Figura 51.- Secado del material en la parrilla eléctrica. (Contreras, 2023)	67
Figura 52.- Masa del material completamente seco. (Contreras, 2023)	67
Figura 53.- Introduciendo el material dentro del picnómetro. (Contreras, 2023)	70
Figura 54.- Agua desalojada por el picnómetro. (Contreras, 2023)	70
Figura 55.- Masa de la muestra para la granulometría. (Contreras, 2023)	71
Figura 56.- Obtención del peso del material retenido en las mallas. (Contreras, 2023).....	71
Figura 57.- Desechos de vidrio empleados en la investigación. (Contreras, 2023)	74
Figura 58.- Máquina de los Ángeles y esferas de acero. (Contreras, 2023).....	75
Figura 59.- Desechos de vidrio dentro de la máquina con las esferas de acero. (Contreras, 2023).....	76
Figura 60.- Producto de la fragmentación de los desechos de vidrio. (Contreras, 2023).....	76
Figura 61.- Material pasado por la Malla #4 para obtener el vidrio molido. (Contreras, 2023).....	76
Figura 62.- Vidrio molido y de tamaño similar al agregado fino. (Contreras, 2023).....	76
Figura 63.- Vidrio triturado de tamaño similar al agregado grueso.	77
Figura 64.- Bulto de cemento de 50 kg CPC 30R RS, marca Tolteca.....	77
Figura 65.- Se enrasa la boca superior del anillo con ayuda de la espátula. (Contreras, 2023)	79
Figura 66.- Lectura de penetración del aparato de Vicat. (Contreras, 2023)	79
Figura 67.- Determinación del fraguado inicial con la aguja más ligera del aparato de Gillmore. (Contreras, 2023).....	81
Figura 68.- Determinación del fraguado final con la aguja más pesada del aparato de Gillmore. (Contreras, 2023).....	81
Figura 69.- Muestra de cemento de aproximadamente 64 gramos. (Contreras, 2023)	82



Figura 70.- Líquido que no reaccione con el cemento. (Contreras, 2023)	82
Figura 71.- Recipiente con agua, para mantener la temperatura constante durante la prueba. (Contreras, 2023).....	83
Figura 72.- Se introduce el cemento en el frasco para determinar su volumen. (Contreras, 2023).....	83
Figura 73.- Diagrama de procesos unitarios del concreto tradicional.	94
Figura 74.- Diagrama de procesos unitarios del concreto tradicional. (Contreras, 2023)....	96
Figura 75.- Preparación de los materiales. (Contreras, 2023)	106
Figura 76.- Cantidades de materiales necesarios para la mezcla de concreto. (Contreras, 2023).....	106
Figura 77.- 10% del agua con todo el agregado grueso. (Contreras, 2023)	106
Figura 78.- Concreto fresco con la consistencia deseada. (Contreras, 2023).....	106
Figura 79.- Vaciado de la mezcla de concreto en los especímenes cilíndricos de 10x20cm. (Contreras, 2023).....	109
Figura 80.- Varillado de los especímenes con la varilla de 3/8". (Contreras, 2023).....	109
Figura 81.- Vibrado suave con mazo de goma para eliminar las oquedades. (Contreras, 2023).....	109
Figura 82.- Curado de los especímenes en la pila de curado para evitar la pérdida de humedad. (Contreras, 2023)	109
Figura 83.- Figura 84.- Compactación de cada capa 25 veces con la varilla. (Contreras, 2023).....	111
Figura 84.- Obtención del revenimiento de la mezcla de concreto fresco. (Contreras, 2023)	111
Figura 85.- Resistómetro Nilson punteado. (Contreras, 2023).....	113
Figura 86.- Placas metálicas conectadas al resistómetro. (Contreras, 2023).....	113
Figura 87.- Obtención de la resistencia eléctrica en vigas y cilindros. (Contreras, 2023) .	113
Figura 88.- Equipo de VPU conectado y calibración de transductores. (Contreras, 2023)	115
Figura 89.- Transductores en las caras de la muestra para la obtención de la VPU. (Contreras, 2023)	115
Figura 90.- Espécimen en la máquina universal Forney. (Contreras, 2023).....	118
Figura 91.- Velocidad de carga para cilindros de 10 cm de diámetro. (Contreras, 2023)..	118



Figura 92.- Espécimen con los dos anillos junto con las barras separadoras. (Contreras, 2023).....	120
Figura 93.- Verificando la verticalidad con el nivel de burbuja. (Contreras, 2023).....	120
Figura 94.- Micrómetro colocado en los anillos. (Contreras, 2023).....	120
Figura 95.- Verificando el correcto funcionamiento del micrómetro. (Contreras, 2023) ..	120
Figura 96.- Espécimen centrado entre las placa de acero y las tiras de triplay. (Contreras, 2023).....	122
Figura 97.- Aplicando carga hasta la falla del espécimen. (Contreras, 2023).....	122
Figura 98.- Espécimen marcado a los tercios de claro, dejando 7.5 cm de los extremos. (Contreras, 2023)	124
Figura 99.- Espécimen en los aditamentos y centrado en la máquina de pruebas. (Contreras, 2023)	124
Figura 100.- Falla del espécimen. (Contreras, 2023)	124
Figura 101.- Especímenes fallados en el tercio medio del claro. (Contreras, 2023)	124
Figura 102.- Rodajas de concreto de 10 cm de diámetro por 5 cm de espesor. (Contreras, 2023).....	125
Figura 103.- Mitades de viga de 15 cm x 15 cm x 60 cm obtenidas de la prueba de MR. (Contreras, 2023)	125
Figura 104.- Rodajas de concreto en el horno de secado. (Contreras, 2023)	128
Figura 105.- Sellado de las rodajas de concreto con la parafina y brea.. (Contreras, 2023)	128
Figura 106.- Rodaja de concreto ya sellada. (Contreras, 2023)	128
Figura 107.- Esponja en el recipiente con nivel de agua a 3mm de la parte inferior de las rodajas. (Contreras, 2023)	128
Figura 108.- Rodajas de concreto selladas en el recipiente con agua. (Contreras, 2023) ..	128
Figura 109.- Lectura de masa de rodajas en intervalos de tiempo. (Contreras, 2023)	128
Figura 110.- Rodajas de concreto en la pila de curado para su saturado. (Contreras, 2023)	132
Figura 111.- Rodaja de concreto saturada y superficialmente seca. (Contreras, 2023)	132
Figura 112.- Muestra de concreto sumergida con la canastilla. (Contreras, 2023)	132



Figura 113.- Rodajas de concreto en el horno para su secado a 105 °C. (Contreras, 2023)	132
Figura 114.- Mitades de viga expuestas a la humedad del ambiente. (Contreras, 2023) ...	134
Figura 115.- Mitad de viga en la máquina de pruebas para fallarla transversalmente. (Contreras, 2023)	134
Figura 116.- Espécimen ya con la solución indicadora ácido-base. (Contreras, 2023).....	135
Figura 117.- Espécimen listo para la medición de la profundidad de carbonatación. (Contreras, 2023)	135
Figura 118.- Huella ambiental del escenario del concreto tradicional. (Contreras, 2023). 137	
Figura 119.- Huella ambiental del escenario del concreto ecológico. (Contreras, 2023)...	137
Figura 120.- Potenciales impactos ambientales del escenario de creación del concreto tradicional.	138
Figura 121.- Potenciales impactos ambientales del escenario de creación del concreto ecológico.....	139
Figura 122.- Impacto a toxicidad marina del concreto tradicional.	140
Figura 123.- Impacto a toxicidad marina del concreto ecológico.	140
Figura 124.- Impacto a ecotoxicidad de agua fresca del concreto tradicional.	141
Figura 125.- Impacto a ecotoxicidad en agua fresca del concreto ecológico.	142
Figura 126.- Impacto a eutrofización en agua fresca del concreto tradicional.	143
Figura 127.- Impacto a eutrofización en agua dulce del concreto ecológico.	143
Figura 128.- Impacto al cambio climático del concreto tradicional.	144
Figura 129.- Impacto al cambio climático del concreto ecológico.....	145
Figura 130.- Impacto a acidificación terrestre del concreto tradicional.	146
Figura 131.- Impacto a acidificación terrestre del concreto ecológico.....	146
Figura 132.- Impacto al agotamiento de recursos fósiles del concreto tradicional.	147
Figura 133.- Impacto al agotamiento de recursos fósiles del concreto ecológico.....	147
Figura 134.- Impacto a agotamiento de recursos minerales del concreto tradicional.	148
Figura 135.- Impacto a agotamiento de recursos minerales del concreto ecológico.....	149
Figura 136.- Resistencia a compresión en cilindros de 10 cm x 20 cm a los 28 días.....	151
Figura 137.- Resistencia a compresión en cilindros de 10 cm x 20 cm a los 28 días.....	152
Figura 138.- Resistividad eléctrica en cilindros de 10 x 20cm.....	154



Figura 139.- Resistividad eléctrica en vigas de 15 x 15 x60 cm.	155
Figura 140.- Resistividad eléctrica en cilindros de 15 x 30cm.....	155
Figura 141.- Resistencia a compresión en cilindros de 10 x 20 cm.	156
Figura 142.- Resistencia a la tensión por compresión diametral en cilindros de 15 x 30 cm.	157
Figura 143.- Módulo de ruptura en vigas de 15 x 15 x60 cm.....	158
Figura 144.- Módulo de elasticidad estático en cilindros de 10 x 20 cm.	159
Figura 145.- Profundidad de carbonatación en mitades de viga a 190 días.	160
Figura 146.- Constante de carbonatación a 190 días.	161
Figura 147.- Tiempo estimado para que la carbonatación alcance el acero de refuerzo con un recubrimiento de 35 mm.....	162



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Cantidad de CO2 emitido a la atmosfera por el proceso de construcción.	8
Tabla 2.- Cementos de acuerdo a su clase resistente.	15
Tabla 3.- Composición de los cementos Portland. (NMX-C-414-ONNCCE, 2017)	18
Tabla 4.- Dimensiones de los recipientes de acuerdo al tamaño máximo del agregado. (NMX-C-073-ONNCCE, 2004)	42
Tabla 5.- Resultados para Masa volumétrica seca y suelta de la arena.	44
Tabla 6.- Resultados para Masa volumétrica seca y compactada de la arena.	46
Tabla 7.- Resultados para humedad de absorción de la arena.	49
Tabla 8.- Resultados para densidad de la arena.	51
Tabla 9.- Límites granulométricos para agregado fino. (NMX-C-111-ONNCCE, 2014) ...	54
Tabla 10.- Análisis granulométrico para la muestra #1 de la arena.	55
Tabla 11.- Análisis granulométrico para la muestra #2 de la arena.	56
Tabla 12.- Resumen de las características físicas del agregado fino.	60
Tabla 13.- Resultados para Masa volumétrica seca y suelta de la grava.	64
Tabla 14.- Resultado para la Masa volumétrica seca y compactada de la grava.	65
Tabla 15.- Tamaño mínimo de la muestra a utilizar. (NMX-C-164-ONNCCE, 2014).	66
Tabla 16.- Tipos de absorción. (Colegio de Ingenieros Civiles de Michoacán, 1999)	68
Tabla 17.- Resultados para la absorción de la grava.	68
Tabla 18.- Resultados para la densidad de la grava.	70
Tabla 19.- Resultados de la granulometría de la muestra #1 de la grava.	72
Tabla 20.- Resultados de la granulometría de la muestra #2 de la grava.	73
Tabla 21.- Resumen de características físicas del agregado grueso.	73
Tabla 22.- Resultados para consistencia normal del cemento.	79
Tabla 23.- Resultados para tiempos de fraguado del cemento.	81
Tabla 24.- Resultados para densidad del cemento.	83
Tabla 25.- Características físicas de los materiales que conforman al concreto hidráulico.	84
Tabla 26.- Revenimientos recomendados para diversos tipos de construcción. (American Concrete Institute 211.1, 2009)	84



“CONCRETO ECOLÓGICO ELABORADO A PARTIR DE DESECHOS DE VIDRIO COMO SUSTITUTO PARCIAL DE LOS AGREGADOS FINOS Y GRUESOS”

Tabla 27.- Requisitos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes revenimientos y tamaños máximos nominales recomendados. (American Concrete Institute 211.1, 2009).....	86
Tabla 28.- Dependencia entre la relación agua/cemento y la resistencia a compresión del concreto. (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).....	87
Tabla 29.- Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto para diferentes módulos de finura del agregado fino (arena). (American Concrete Institute 211.1, 2009)..	88
Tabla 30.- Resumen de cantidades necesarias de material para un m ³ de concreto.	90
Tabla 31.- Cantidades corregidas necesarias para un m ³ de concreto.	90
Tabla 32.- Fuentes de obtención de datos para construir el ACV.	96
Tabla 33.- Materiales necesarios para una tonelada de concreto tradicional.	97
Tabla 34.- Materiales necesarios para una tonelada de concreto ecológico.	98
Tabla 35.- Toneladas por kilómetro del transporte de las materias primas para el concreto ecológico.....	98
Tabla 36.- Toneladas por kilómetro del transporte de las materias primas para el concreto tradicional.	98
Tabla 37.- Materiales y entradas necesarias para la manufactura del concreto tradicional..	99
Tabla 38.- Materiales y entradas necesarias para la manufactura del concreto ecológico.	100
Tabla 39.- Toneladas por kilómetro del transporte y entrega del concreto tradicional.	100
Tabla 40.- Toneladas por kilómetro del transporte y entrega del concreto tradicional.	101
Tabla 41.- Mezclas a realizar correspondientes a la primera etapa.	102
Tabla 42.- Cantidades requeridas de material para las mezclas de la primera etapa.....	103
Tabla 43.- Cantidad de especímenes para pruebas destructivas y no destructivas.....	104
Tabla 44.-“Cantidad de especímenes necesarios para módulo de ruptura.”.....	104
Tabla 45.- Cantidad de especímenes necesarios para prueba de tensión indirecta.....	105
Tabla 46.- Cantidad de especímenes necesarios para pruebas de durabilidad.	105
Tabla 47.- Número de capas requeridas para especímenes cilíndricos. (NMX-C-159-ONNCCE, 2016)	107
Tabla 48.- Diámetro de la varilla y número de penetraciones empleados para moldear los especímenes cilíndricos. (NMX-C-159-ONNCCE, 2016).....	108
Tabla 49.- Tolerancias para distintos revenimientos. (NMX-C-156-ONNCCE, 2010).....	111



Tabla 50.- Criterios para evaluar la resistividad eléctrica o riesgo de corrosión del acero de refuerzo. (NMX-C-514-ONNCCE, 2016); (NMX-C-530-ONNCCE, 2017).....	114
Tabla 51.- Criterios para evaluar la velocidad de pulso ultrasónico (VPU). (NMX-C-275-ONNCCE, 2004)	115
Tabla 52.- Velocidad de aplicación de carga. (NMX-C-083-ONNCCE, 2014).....	117
Tabla 53.- Tolerancias a edades de prueba especificadas. (NMX-C-083-ONNCCE, 2014)	117
Tabla 54.- Especificaciones de la calidad del concreto de acuerdo a su porosidad total. ..	133
Tabla 55.- Criterios de evaluación de la resistencia a la carbonatación del concreto.	136
Tabla 56.- Resultados del revenimiento en las mezclas de la primera etapa.....	150
Tabla 57.- Resultados del revenimiento en las mezclas de la segunda etapa.	153



1. INTRODUCCIÓN

El concreto es probablemente el material más utilizado en la industria de la construcción debido a que se puede adaptar a todas las formas y mezclas que se requieran, debido a su evidente versatilidad y rendimiento mecánico. Además, es un material relativamente económico en comparación con su rendimiento y durabilidad.

Durante el último siglo, el crecimiento de la urbanización y la industrialización ha llevado a un uso masivo de concreto tanto para estructuras civiles como para fines arquitectónicos. Por tanto, el consumo de agregados naturales para la mezcla de concreto hidráulico también se ha incrementado, ya que éstos representan aproximadamente desde el 60% hasta el 75% del volumen total de la mezcla (H. Kosmatka, Kerkhoff, & C. Panarese, 2002). La extracción de agregados naturales tiene graves consecuencias ambientales, la magnitud del impacto ambiental está en función del tipo de banco que se quiera explotar, ya sea que se trate de un banco virgen (nunca explotado) o de uno que ya ha sido utilizado con anterioridad, otra parte importante es de la maquinaria y/o equipo que se utilice para la extracción y triturado de los materiales. Los impactos más significativos a la naturaleza por la explotación de los bancos de material son principalmente la modificación de los drenajes naturales, la eliminación parcial o total de la flora característica del lugar, la alteración del suelo y hasta las emisiones de gases de efecto invernadero. (S. Winfield & Taylor, 2005) (Abbas, Fathifazl, & Isgor, 2006)

Es por ello que resulta urgente proponer el utilizar materiales alternativos reciclados para darles una segunda vida, los cuales pueden sustituir parcial o totalmente los agregados pétreos en la mezcla de concreto hidráulico y lograr reducir la explotación de bancos de material y así tener un menor impacto ambiental.

El problema se encuentra principalmente relacionado con cuatro aspectos fundamentales en el ámbito de la ingeniería y el desarrollo tecnológico, en primer lugar, se busca innovar en la reutilización de materiales reciclados como el vidrio, en las mezclas de concreto, en segundo lugar, se busca reducir los costos asociados al uso y producción de materias primas en la industria de la construcción, en tercer lugar, se busca abordar la problemática medioambiental mediante la reducción de residuos sólidos a nivel residencial e industrial, por último, se busca minimizar el impacto ambiental al disminuir la explotación de materiales pétreos. (Palacios Martínez, 2019)



1.1. Justificación

En México, el proceso para extraer y obtener las materias primas de los bancos de material pétreo ocasiona impactos ambientales que se deben de considerar debido a su potencial efecto sobre el medio natural. Por ejemplo, esta actividad afecta la calidad del aire debido a la generación de polvo, tiene consecuencias en la estructura del suelo, alterando sus procesos internos y dificultando o impidiendo su regeneración, también se producen efectos en las aguas superficiales y subterráneas, incluyendo la contaminación de acuíferos, afectación de los cauces de agua, alteración en los procesos y capacidad de filtración del suelo. Por último, la fauna y la flora se ven afectadas por la destrucción de la capa vegetal, el deterioro de los biotopos y la eliminación de la flora existente. (Hernández Z, López, Horta R., & Serrano G., 2017)

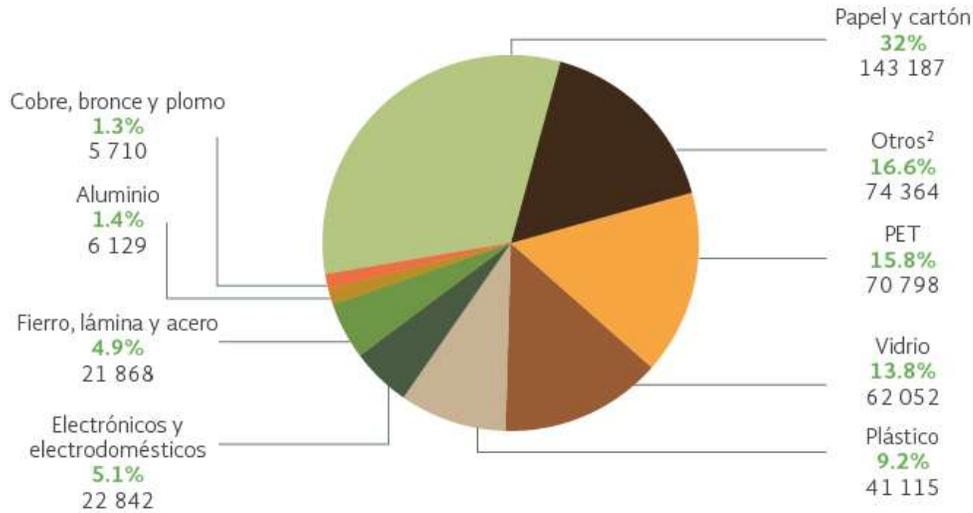
Se deben buscar opciones sobre la reutilización de materiales reciclables que puedan ser utilizados en la mezcla de concreto, dichos materiales de reciclaje pueden cumplir con el papel ya sea de agregado grueso o agregado fino. De acuerdo con investigaciones realizadas, los materiales reciclables pueden aportar en algunos casos mejores características que los agregados pétreos convencionales, esto ayudaría a que la explotación de los yacimientos de materiales pétreos se reduzca y aparte se les daría una segunda vida a materiales de reciclaje. (CSI, 2009)

Año tras año en nuestro país según datos proporcionados por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat), se generan alrededor de 15 millones de toneladas de residuos sólidos que podrían ser reutilizados. De dicha cantidad, el 39% corresponde a papel, cartón y materiales similares, el 30.7% a plásticos y el **16.6% a vidrio**. Algunas cámaras empresariales y la misma dependencia informan que aproximadamente el 56% del papel y cartón desechado se recicla, mientras que, en el caso de los plásticos, el porcentaje es del 50%, y en cuanto a los envases de vidrio, **de los más de 2.5 millones de toneladas desechadas año tras año en nuestro país, solo el 12% es reciclado**, este bajo porcentaje se debe principalmente a la falta de rentabilidad económica, lo cual dificulta el proceso de reciclaje del vidrio en México. Según INEGI se producen 62 toneladas de residuos sólidos de vidrio diariamente, lo cual representa casi un 14% del total de todos los residuos sólidos urbanos generados al día. La descomposición natural del vidrio puede llevar



“CONCRETO ECOLÓGICO ELABORADO A PARTIR DE DESECHOS DE VIDRIO COMO SUSTITUTO PARCIAL DE LOS AGREGADOS FINOS Y GRUESOS”

miles de años, por lo tanto, es de suma importancia su reutilización y reciclaje para evitar su acumulación en la naturaleza. En la figura 1 se observa los porcentajes de RSU recolectados diariamente. (Sánchez, 2019) (INEGI, 2015) (EFE, 2019)



Notas:

¹ La cantidad de residuos se expresa en kg/día.

² Otros: incluye pañales desechables, residuos finos, etc.

Figura 1.- Composición de los RSU recolectados diariamente. (INEGI, 2014)

Por lo anterior como premisa, se propone una alternativa, la cual es el reúso de granos de vidrio para su uso como sustituto parcial de los agregados gruesos y vidrio molido como sustituto de los finos en la mezcla de concreto. El vidrio es un material altamente reciclable con muchas posibilidades de reutilización, especialmente como agregado en mezclas de concreto hidráulico.

Esta investigación propone el análisis de un nuevo concreto hidráulico, mediante la realización de pruebas experimentales en laboratorio, para así obtener sus características físicas y mecánicas. Este nuevo concreto se realizará de 2 formas distintas una por vidrio triturado en sustitución parcial de los agregados gruesos y otra con vidrio molido como sustituto parcial de los agregados finos, y se analizará remplazando distintos porcentajes de agregado pétreo por vidrio, y analizar las ventajas y desventajas que se presenten en el concreto y, en base a los resultados obtenidos, proponer sus alternativas de uso para el sector de la construcción.



1.2. Hipótesis

Sustituyendo parcialmente las cantidades de agregado pétreo fino y agregado pétreo grueso por vidrio molido y granos de vidrio respectivamente, se pretende obtener un concreto hidráulico base cemento portland, con adecuadas prestaciones físicas, mecánicas y químicas, contribuyendo a disminuir la contaminación ambiental al reutilizar los desechos de vidrio y al mismo tiempo disminuir la explotación de los bancos de materiales pétreos.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

El objetivo general de esta investigación es la fabricación de un concreto ecológico a partir de desechos de vidrio como sustituto parcial de agregados pétreos, que aporte al usuario la seguridad suficiente en cuanto a sus prestaciones de desempeño, que sea económicamente factible de implementar, respetuoso con el medio ambiente y que contribuya a disminuir tanta explotación de los bancos de material pétreo.

1.3.2. Objetivos específicos

- Caracterizar los desechos de vidrio, en las modalidades a emplear.
- Diseñar una mezcla de concreto testigo.
- Innovar en el diseño de mezclas de concreto hidráulico, considerando diferentes proporciones de pétreos y desechos de vidrio. Se plantea emplear el Método del “American Concrete Institute” (ACI).
- Determinar las características de los agregados pétreos que se van a utilizar, dichas propiedades se obtendrán en laboratorio, todas las pruebas que se realicen se harán de acuerdo a la normativa mexicana vigente del ONNCCE.
- Obtener las propiedades del concreto en estado fresco por medio de pruebas de laboratorio tales como, revenimiento, para cada uno de los diseños realizados.
- Mejorar las propiedades térmicas del concreto.
- Obtener las propiedades del concreto en estado endurecido como son: la resistencia a la compresión a la edad de 3, 7, 21, 28, 45 y 90 días, pesos volumétricos, VPU, resistividad eléctrica, carbonatación, ataque acelerado por sulfato de sodio, flexión



“CONCRETO ECOLÓGICO ELABORADO A PARTIR DE DESECHOS DE VIDRIO COMO SUSTITUTO PARCIAL DE LOS AGREGADOS FINOS Y GRUESOS”

(MR) y módulo de elasticidad, para las mezclas testigo y las de mejor comportamiento mecánico.

- Analizar y comprender el comportamiento del concreto mediante el análisis de los resultados obtenidos en las pruebas realizados a diversas mezclas en su estado fresco y endurecido, y comparándolos con la mezcla testigo.

2. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

En la actualidad, es de suma importancia la reutilización de materiales provenientes de desechos con el objetivo de reducir el problema de contaminación en el medio ambiente. Esta práctica busca aprovechar dichos materiales para beneficiar las propiedades de diversos materiales de construcción, disminuyendo la necesidad de cemento, agua o agregados pétreos, en el caso del concreto. El objetivo es encontrar alternativas sostenibles y respetuosas con el medio ambiente que permitan reducir el impacto negativo que tiene la industria de la construcción sobre este.

La presente investigación busca lograr el poder incorporar los desechos de vidrio como sustituto parcial de los agregados pétreos en el concreto hidráulico, de tal forma que no afecten sus propiedades mecánicas y físicas.

De los trabajos desarrollados, respecto al uso de vidrio en el concreto hidráulico y en algunos otros materiales de construcción se tiene lo siguiente:

- ❖ **“Estudio de la influencia del vidrio molido en concretos de grado H15, H20, y H30”.**

En este estudio, Catalán Arteaga estudió la influencia que llega a tener el vidrio en concretos de diferentes grados de resistencia, cada uno con distintos porcentajes de desechos de vidrio como sustituto de una fracción de la arena, cuyos resultados demuestran que la utilización del vidrio no afecta las propiedades del concreto en estado fresco y endurecido, incluso se observa un leve aumento en la resistencia en los especímenes de concreto con un 10% de desechos de vidrio. (Catalán Aretaga, 2013)

- ❖ **“Strength and durability of recycled aggregate concrete containing milled glass as partial replacement for cement”.**



“CONCRETO ECOLÓGICO ELABORADO A PARTIR DE DESECHOS DE VIDRIO COMO SUSTITUTO PARCIAL DE LOS AGREGADOS FINOS Y GRUESOS”

El estudio realizado por Din Nassar y Parviz Soroushian menciona que su intención es el mejorar la resistencia y durabilidad del concreto utilizando vidrio molido como sustituto parcial del cemento. Las propiedades estudiadas son su resistencia mecánica, resistencia cuando hay presencia de agua y la durabilidad, utilizando para cada prueba la normativa ASTM. La cantidad de vidrio que se utilizó va desde el 10 hasta el 25% de sustitución, cuyos resultados han sido muy prometedores, produciendo ganancias significativas en la resistencia y durabilidad del concreto, se descubrió que el vidrio de desecho molido suprime las reacciones álcali-sílice, otra propiedad que mejoró fue la resistencia a la abrasión y la resistencia a largo plazo con un 20% de sustitución de cemento con desechos de vidrio molido. Se considera que los alentadores resultados de las pruebas facilitan el uso generalizado de agregados reciclados y el desvío de grandes cantidades de residuos de vidrio de colores mixtos destinados a vertederos para un uso de valor agregado para producir concreto con agregados reciclados. (Din Nassar & Parviz Soroushian, 2012)

❖ **“Investigación de la Utilización del Vidrio Molido como Material de Construcción y Técnicas Constructivas”.**

El estudio de Castillo Pazmiño presenta los efectos de los desechos de vidrio en diferentes materiales de construcción, tales como cilindros de concreto, adoquines y bloques de concreto, cada uno con distintas proporciones de vidrio, de los cuales se obtuvieron muy buenos resultados para el 20 % de vidrio molido, obteniendo iguales o mejores resultados que las probetas testigo. (Castillo Pazmiño, 2010)

❖ **“Obtención de adoquines fabricados con vidrio reciclado como agregado”.**

En esta investigación, Hidalgo Laguna y Poveda Calderón estudiaron la influencia del vidrio molido y grueso sobre la resistencia al desgaste de adoquines de concreto con distintas relaciones agua-cemento (A/C), el vidrio es utilizado en sustitución parcial de los agregados convencionales del concreto. Se elaboraron muestras con 5, 15, 25 y 35% de sustitución de agregados convencionales por vidrio molido, de acuerdo a los resultados obtenidos se llegó a la conclusión de que la adición de vidrio como sustituto del agregado en adoquines ayuda de manera positiva a la resistencia al desgaste. La resistencia a compresión es igualmente



“CONCRETO ECOLÓGICO ELABORADO A PARTIR DE DESECHOS DE VIDRIO COMO SUSTITUTO PARCIAL DE LOS AGREGADOS FINOS Y GRUESOS”

favorable para los adoquines que incluyen vidrio como agregado. Sin embargo, cabe destacar que los adoquines adicionados con vidrio resultan más costosos que los adoquines tradicionales. (Hidalgo Laguna & Poveda Claderón, 2013)

❖ **“Obtención de mezclas de concreto a partir de la utilización del vidrio como agregado grueso”.**

El estudio de Mejía Ojeda presenta los efectos de los residuos de vidrio como sustituto total de los agregados gruesos en el concreto hidráulico, de acuerdo a los resultados obtenidos en su investigación menciona que se ha podido comprobar que es posible hacer mezclas de concreto con vidrio en lugar del agregado grueso, y a pesar de no alcanzar las resistencias de diseño, se logró obtener resistencias promedio equivalentes al 85% de la de diseño, pero, algunos de los especímenes lograron alcanzar el 96% de la resistencia de diseño. Cabe mencionar que las limitaciones al utilizar el vidrio reciclado fueron determinantes a la hora de probar los especímenes, esto debido a que las fallas en la mayoría de los casos se presentaron debido a la forma laminar tipo laja que presenta el vidrio molido. (Mejía Ojeda, 2009)

3. ANTECEDENTES

3.1. Impacto del sector de la construcción en el medio ambiente

En la actualidad es de suma importancia conservar y reducir el impacto hacia nuestros recursos no renovables. En el sector de la construcción, los procesos constructivos requieren uso de combustibles fósiles y una muy alta demanda de energía, que son las fuentes principales de liberación de CO₂, es por ello que este sector provoca un gran impacto negativo sobre el medio ambiente, por lo mismo resulta importante la implementación de técnicas innovadoras y nuevos materiales que contribuyan a reducir el daño generado. En el mundo el sector de la construcción consume año con año aproximadamente el 25% de los recursos de madera, 40% de agregados pétreos y el 16% del agua. Así que el tema del ahorro de energía en la construcción, teniendo en cuenta cada uno de sus procesos y su ciclo de vida, puede convertirse en una nueva técnica para contribuir significativamente a la visión ambiental de las actividades de construcción.



En este sentido, desde nuestro punto de vista profesional y académico, la aportación que podemos hacer debe estar dirigida y comprometida principalmente a atender las necesidades más urgentes de nuestro planeta, teniendo muy en cuenta a las generaciones futuras, es decir, lograr poco a poco que la construcción sea lo más sostenible posible.

A continuación, se muestra una tabla con la cantidad dióxido de carbono que se emite a la atmosfera en algunos de los procesos utilizados en el sector de la construcción.

Tabla 1.- Cantidad de CO₂ emitido a la atmosfera por el proceso de construcción.

Procesos	Cantidad de CO ₂ emitido	
	Cantidad (Mt)	%
Diseño	1.3	0.43
Manufactura	45.2	15.09
Distribución	2.8	0.93
Operación en sitio	2.6	0.87
En uso	246.4	82.24
Remodelación/Demolición	1.3	0.43
Total	299.6	100

De acuerdo a la tabla anterior, debemos de darnos cuenta cuán importante es el escoger los materiales a utilizar, actualmente existen materiales producto de reciclaje que nos ayuden a disminuir el impacto negativo que tiene sobre el medio ambiente el sector de la construcción.

3.2. Sostenibilidad en los materiales de construcción

Los materiales sustentables o sostenibles son aquellos que tienen un menor impacto ambiental en nuestro planeta porque su fabricación implica menos uso de recursos o que contiene elementos naturales o reciclados, los cuales no agotan los recursos naturales no renovables. La importancia del desarrollo sostenible radica en garantizar los recursos necesarios para el progreso sin poner en riesgo su disponibilidad para las futuras generaciones. En la actualidad, este concepto ha adquirido una relevancia aún mayor debido al aumento significativo en la explotación de los recursos, resultado del crecimiento acelerado de la población.

Existen algunas técnicas para el manejo sostenible de los materiales de construcción:



- Reúso: Aprovechar los materiales sin necesidad de someterlos a algún proceso o inversión.
- Reciclaje: Recuperar los materiales por medio de métodos químicos o físicos para su reciclaje.
- Refabricación: Además de reciclar el material se puede apoyar de algún otro para así obtener un producto nuevo con mejores características.
- Recuperación: Obtener un combustible a partir de residuos de construcción que pueda generar energía.

3.3. Importancia de la sustentabilidad en la construcción

La construcción sostenible ha surgido como una respuesta esencial a los desafíos ambientales y sociales que enfrentamos en la actualidad. A medida que la población mundial sigue creciendo y los recursos naturales se vuelven más escasos, la industria de la construcción tiene la responsabilidad de adoptar prácticas más responsables y respetuosas con el medio ambiente. La sustentabilidad en la construcción se trata de crear estructuras que no solo sean duraderas y funcionales, sino también de reducir su impacto negativo en el entorno y la sociedad.

El concreto, como material ampliamente utilizado en la construcción, juega un papel clave en esta transformación hacia la sustentabilidad. Tradicionalmente, la producción de concreto ha estado asociada con una alta demanda de agregados pétreos, como la arena y la grava, que se extraen de manera intensiva en muchas regiones. Esta extracción de recursos naturales puede llevar a la degradación del paisaje, la destrucción de hábitats y la erosión del suelo, entre otros impactos ambientales.

La incorporación de desechos de vidrio en la producción de concreto ofrece una oportunidad valiosa para abordar estos problemas. Los desechos de vidrio, que a menudo se descartan en vertederos y contribuyen a la contaminación ambiental, pueden ser reciclados y utilizados como sustitutos parciales de los agregados pétreos. Esto no solo reduce la cantidad de residuos que llegan a los vertederos, sino que también disminuye la necesidad de extraer recursos naturales adicionales.



“CONCRETO ECOLÓGICO ELABORADO A PARTIR DE DESECHOS DE VIDRIO COMO SUSTITUTO PARCIAL DE LOS AGREGADOS FINOS Y GRUESOS”

La sustitución de los agregados pétreos por desechos de vidrio reciclado no solo aborda los problemas de gestión de residuos y la sobreexplotación de recursos, sino que también presenta ventajas desde el punto de vista técnico y económico. Los desechos de vidrio reciclado pueden mejorar ciertas propiedades del concreto, como su resistencia a la compresión y su durabilidad, si se aborda adecuadamente la adherencia entre el vidrio y la matriz de concreto.

En resumen, la utilización de desechos de vidrio como sustituto de los agregados pétreos en la producción de concreto responde directamente a la importancia creciente de la sustentabilidad en la construcción. Al reducir la demanda de recursos naturales, disminuir la cantidad de residuos y mejorar el rendimiento del concreto, esta práctica ejemplifica cómo la innovación en la construcción puede alinear los objetivos económicos con los ambientales y sociales, contribuyendo así a un futuro más sostenible.

4. MARCO TEÓRICO

4.1. Concreto hidráulico.

Una de las causas principales del acelerado desarrollo de la construcción es, sin lugar a dudas la aparición del concreto. Dicho material vino a revolucionar la práctica constructiva.

El concreto hidráulico es una mezcla de agregados pétreos, agua y cemento Portland, los cuales al ser combinados forman una masa semejante a una roca, esto gracias a la reacción química que sucede entre el agua y el cemento Portland, la cual produce la hidratación del cemento. La masa resultante posee una gran resistencia a los esfuerzos de compresión, es muy duradero y versátil que se utiliza ampliamente en proyectos de ingeniería civil y construcción debido a su resistencia, capacidad de conformado y facilidad de uso.

Según la composición básica del concreto hidráulico, se destaca en la figura 2 la relevancia de los agregados pétreos, como la arena y la grava, debido a que constituyen entre el 60% y tres cuartas partes del volumen total de una mezcla de concreto convencional. Las características inherentes de estos materiales pétreos son las que brindan un diseño duradero a la mezcla de concreto, y también pueden influir en la capacidad de hacer del concreto un material más sostenible.

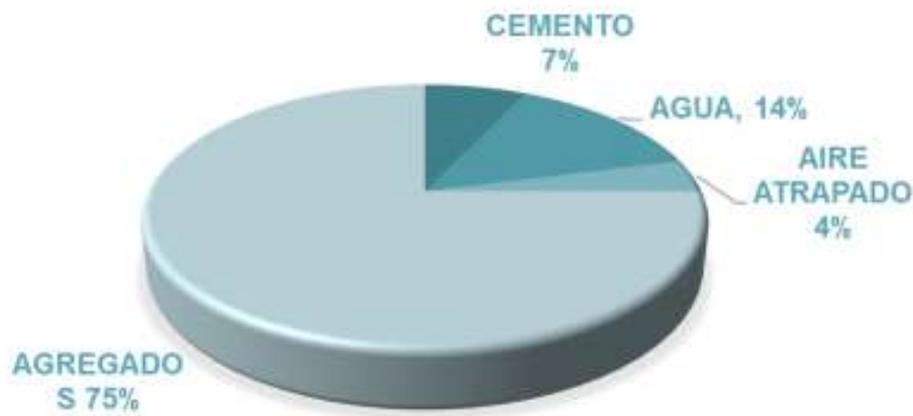


Figura 2.- Porcentaje de materiales usados en un concreto. (Propia)

4.1.1. Conceptos generales sobre el concreto

4.1.1.1. Durabilidad

Cuando hablamos de la durabilidad del concreto, nos referimos a su capacidad para aguantar las condiciones ambientales y los efectos del tiempo a los que se expone cualquier estructura de concreto, ya sea químico, físico o cualquier otro proceso y cualquier daño.

Cabe señalar que la durabilidad puede verse afectada si se cambia la relación agua/cemento, es decir, cuando la relación es alta, las partículas de cemento tienen un espaciamiento amplio, lo que hace que, al fraguar, el producto de hidratación del cemento no cubra por completo esta área y estos pequeños poros permanecen. Por lo tanto, cuanto mayor sea la relación agua/cemento, la porosidad del concreto hidráulico será mayor y, en consecuencia, menor será la durabilidad, como se muestra en la figura 4. (Putzmeister, 2019)



Figura 4.- La relación agua/cemento afecta la durabilidad del concreto. (Putzmeister, 2019)

De lo contrario, si se tiene una baja relación agua/cemento la porosidad y permeabilidad es menor y por lo tanto la durabilidad es mayor. En la siguiente figura se puede apreciar el efecto que tiene la relación agua/cemento en las propiedades del concreto.

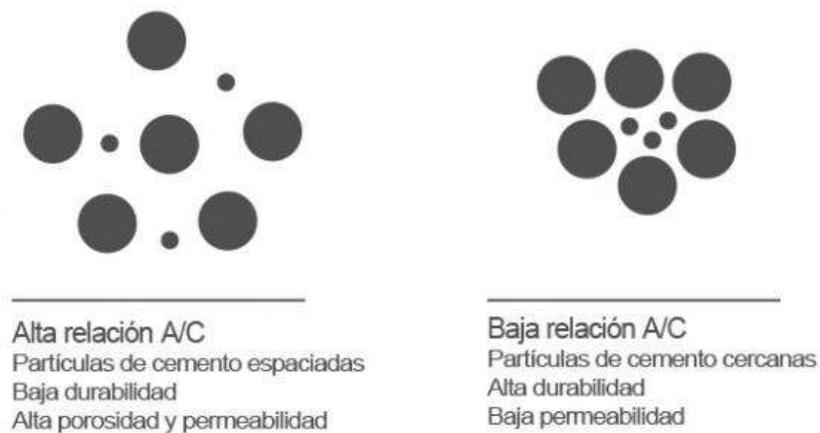


Figura 3.- Efecto de la relación agua/cemento en la durabilidad y porosidad del concreto. (Putzmeister, 2019)

4.1.1.2. Relación agua/cemento

La relación A/C es probablemente el factor más importante en la tecnología del concreto, ya que es un factor que afecta en gran medida la resistencia final del concreto.

La relación A/C es un factor crucial en la composición del concreto fresco, ya que determina el contenido de agua y cemento en términos de masa. Este parámetro tiene una



“CONCRETO ECOLÓGICO ELABORADO A PARTIR DE DESECHOS DE VIDRIO COMO SUSTITUTO PARCIAL DE LOS AGREGADOS FINOS Y GRUESOS”

importancia significativa, ya que el agua y su relación con el cemento tienen un impacto en varias propiedades del material final obtenido. En general, al aumentar la cantidad de agua en la mezcla, se incrementa la fluidez y la trabajabilidad, lo cual es beneficioso para el manejo del concreto durante la construcción. Sin embargo, es importante tener en cuenta que un exceso de agua puede disminuir la resistencia del concreto, debido al aumento en el volumen de espacios generados por el exceso de agua. (Rojas Vega, Hidalgo Madrigal, Pizarro García, & Segura Guzmán, 2011)

Es correcto afirmar que la resistencia del concreto está estrechamente ligada con la relación agua/cemento. Esto se puede confirmar en la figura 5, donde se observa de manera clara que a medida que disminuye la cantidad de agua en relación al cemento, la resistencia del concreto aumenta, y viceversa.



Figura 5.- Efecto de la cantidad de agua en la resistencia del concreto.
(Putzmeister, 2019)



4.2. Cemento Portland.

En el siglo XIX, Joseph Aspdin y James Parker obtuvieron la patente del cemento Portland en 1824, denominado de esta manera debido a su tonalidad gris verdoso oscuro que se asemejaba a la piedra de Portland.

El cemento Portland es un material cementante que cuenta con propiedades adhesivas y cohesivas, está compuesto por silicatos de calcio, aluminatos de calcio, ferro aluminatos de calcio y sulfato de calcio (yeso). Para producir este cemento, se pulveriza el Clinker, que se obtiene mediante la calcinación en el horno de una mezcla de materiales crudos como piedra caliza y sílice, junto con el yeso; el cual se utiliza en la fabricación del concreto debido a su capacidad de fraguar y endurecer al entrar en contacto con el agua, esto se debe a una reacción química exotérmica conocida como hidratación del cemento, lo que lo clasifica como un cemento hidráulico. (Neville, 1999)

La elaboración del cemento Portland debe contener alúmina, cal, sílice y componentes de hierro en proporciones adecuadas.

De acuerdo a la norma mexicana NMX-C-414-ONNCCE-2017 los cementos se clasifican de la siguiente manera:

Por su composición:

- **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



Por su clase resistente:

Tabla 2.- Cements de acuerdo a su clase resistente. (NMX-C-414-ONNCCE, 2017)

Clase	Resistencia, MPa		
	3 días	28 días	
	Mínimo	Mínimo	Máximo
20	-	20	40
30	-	30	50
30R	20	30	50
40	-	40	-
40R	30	40	-

Por sus características especiales:

- **RS**, Resistente a los sulfatos
- **BRA**, Baja Reactividad Alcali agregado
- **BCH**, Bajo Calor de Hidratación
- **B**, Blanco

4.2.1. Fabricación del Cemento Portland.

El cemento Portland está compuesto principalmente de materiales calcáreos, como la caliza, y de alúmina y sílice, que pueden encontrarse en forma de arcilla o pizarra. Además, se utiliza la marga, una combinación de materiales calcáreos y arcillosos. La materia prima necesaria para fabricar cemento Portland se encuentra disponible en la mayoría de países del mundo.

Materias Primas:

- Materiales calcáreos: piedra caliza, conchas y marga.
- Materiales arcillosos: tales como escoria de altos hornos, pizarra o arcilla en el cual la sílice es el material más importante.

La fabricación de cemento implica una serie de pasos que incluyen la molienda fina de las materias primas, la mezcla cuidadosa en proporciones específicas y la quema en un horno rotatorio a una temperatura aproximada de 1450 °C, durante este proceso, los materiales se combinan y se funden parcialmente, formando una masa conocida como Clinker. Posteriormente el Clinker se enfría y se muele hasta obtener un polvo fino, se agrega una



“CONCRETO ECOLÓGICO ELABORADO A PARTIR DE DESECHOS DE VIDRIO COMO SUSTITUTO PARCIAL DE LOS AGREGADOS FINOS Y GRUESOS”

pequeña cantidad de yeso para evitar una filtración rápida, y el producto final obtenido es el cemento Portland comercial que se utiliza ampliamente en todo el mundo. (Neville, 1999)

El Clinker es el resultado de la fusión inicial de materias primas cuidadosamente seleccionadas y combinadas en proporciones adecuadas. Este producto está compuesto por silicatos y aluminatos de calcio.

Las materias primas pueden ser mezcladas y molidas en condiciones tanto húmedas como secas, lo cual da origen a los procesos denominados húmedos o secos. La elección del método de fabricación también depende de la dureza de las materias primas utilizadas y de su contenido de humedad.

4.2.1.1. Proceso Húmedo

En primer lugar, se considera el proceso húmedo. Si la materia prima es marga, se somete a una molienda fina y se dispersa en agua dentro de un molino. Este molino consta de un pozo circular equipado con agitadores de pistones radiales que se utilizan para desintegrar los conglomerados de materias primas. Por otro lado, la arcilla también se tritura y se mezcla con agua, generalmente en un molino de menor tamaño similar al anterior. Ambas mezclas se bombean de inmediato, se combinan en una proporción preestablecida y se someten a un proceso de tamizado a través de una serie de tamices. La suspensión resultante de este proceso se dirige hacia un tanque de almacenamiento.

En el caso de que la materia prima sea piedra caliza, se sigue un procedimiento ligeramente diferente, primero la piedra caliza se perfora y se tritura utilizando dos trituradoras, luego se deposita en un molino de bolas, donde se mezcla con agua para disolver la arcilla presente. En este punto, la piedra caliza se sigue triturando hasta alcanzar un tamaño de partícula fino, similar al polvo, y la suspensión resultante se bombea hacia los tanques de almacenamiento. A partir de este punto, el proceso continúa de manera similar, sin importar la naturaleza original de las materias primas utilizadas.

La lechada original es una sustancia de consistencia pastosa, con un contenido de agua que oscila entre el 35% y el 50%. En esta lechada, aproximadamente el 2% del material sólido con un tamaño superior a 90 μm se encuentra disuelto. Por lo general, se utilizan múltiples tanques de almacenamiento para guardar la lechada, y se evita la sedimentación de



“CONCRETO ECOLÓGICO ELABORADO A PARTIR DE DESECHOS DE VIDRIO COMO SUSTITUTO PARCIAL DE LOS AGREGADOS FINOS Y GRUESOS”

los sólidos mediante un proceso mecánico o mediante la inyección de burbujas de aire comprimido. (Neville, 1999)

Finalmente, la lechada con el contenido de cal necesario se introduce en el horno rotatorio. Este horno es un cilindro de acero de gran tamaño, revestido con un material resistente al calor, con un diámetro interno de 8 metros y una longitud de 230 metros. El cilindro gira lentamente alrededor de su eje longitudinal, inclinándose ligeramente hacia la horizontal. La lechada se introduce en el extremo superior del horno, mientras que el carbón pulverizado se inyecta mediante aire comprimido en el extremo inferior, donde la temperatura alcanza los 1450 a 1500 °C. Es importante destacar que el carbón utilizado debe tener un contenido de cenizas moderado, ya que aproximadamente se consumen 220 kg de carbón para producir una tonelada de cemento. Además del carbón, también se pueden utilizar petróleo (con un consumo de 125 litros por tonelada de cemento) o gas natural, aunque en la actualidad la mayoría de las plantas que antes utilizaban petróleo han cambiado a carbón como combustible.

A medida que la lechada atraviesa el horno, experimenta un aumento gradual de temperatura. En primer lugar, se elimina el agua y se libera dióxido de carbono. Luego, la materia seca sufre una serie de reacciones químicas hasta que, en la parte más caliente del horno, aproximadamente un 20-30% del material se convierte en una masa líquida compuesta por cal, sílice y alúmina. Esta masa se funde y se forma en bolas de diámetros variables, que se conocen como Clinker, con tamaños que van desde 3 hasta 25 mm. El Clinker cae sobre diferentes tipos de dispositivos refrigerantes, que a menudo mejoran el intercambio de calor con el aire, que posteriormente se utiliza para quemar el carbón pulverizado. Un horno de grandes dimensiones en una planta de procesamiento húmedo puede producir hasta 3600 toneladas de Clinker al día. (Neville, 1999)

4.2.1.2. Procesos Seco y Semi-seco

En estos procesos, las materias primas se trituran y se introducen en un molino de mezclador en proporciones exactas, donde se secan y se convierten en un polvo fino. Este polvo seco, conocido como grano molido crudo, se transporta al silo de mezcla de cemento para lograr una mezcla uniforme. El grano crudo se mezcla generalmente con aire comprimido, lo que genera un movimiento ascendente del polvo y disminuye su densidad



“CONCRETO ECOLÓGICO ELABORADO A PARTIR DE DESECHOS DE VIDRIO COMO SUSTITUTO PARCIAL DE LOS AGREGADOS FINOS Y GRUESOS”

aparente. Se introduce aire en cada sección del silo, permitiendo que el material más pesado en las secciones no aireadas se desplace lentamente hacia la sección aireada, lo que hace que se comporte como un líquido. Si todas las secciones se airean simultáneamente durante un período completo (aproximadamente una hora), se obtiene una mezcla uniforme.

En el proceso Semi-seco, se lleva a cabo una serie de pasos para obtener el Clinker. Primero, se muele y mezcla el grano, el cual luego se somete a tamizado y se coloca en un granulador, una cuba que gira, durante este proceso, se añade agua en una proporción del 12% del peso del material, obteniendo así pastillas duras con un diámetro interior de 15 mm. Estas pastillas se introducen en una rejilla de precalentamiento y se colocan en un horno y mediante el intercambio de calor proporcionado por el flujo de aire, se producen reacciones químicas que dan lugar a la formación del Clinker.

El Clinker, en su estado frío, presenta un color negro, brillo y dureza, para evitar que fragüe rápidamente, se mezcla con yeso. La mezcla se realiza en un molino de bolas de acero, utilizando bolas cada vez más pequeñas, en el caso de cemento blanco, se utiliza un molino de guijarros para evitar la presencia de residuos de acero. Una vez que el cemento ha sido mezclado de manera satisfactoria, alcanzando una concentración de 1.1×10^{12} partículas por kilogramo de cemento hidráulico, está listo para ser envasado. En México, se utilizan sacos de papel con una capacidad de 50 kg, que son los disponibles comercialmente. (Neville, 1999)

4.2.2. Componentes de los cementos.

La composición de los cementos se observa a continuación en la siguiente tabla 3.

Tabla 3.- Composición de los cementos Portland. (NMX-C-414-ONNCCE, 2017)

Componentes (% en masa)					
	Clinker		Principales		
TIPO	Portland	Escoria	Materiales	Humo	Minoritarios
	+ yeso	granulada de	Puzolánicos	de sílice	Caliza
		alto horno			



CPO	95 - 100	-	-	-	-	0 - 5
CPP	50 - 94	-	6 - 50	-	-	0 - 5
CPEG	40 - 94	6 - 60	-	-	-	0 - 5
CPC	50 - 94	6 - 35	6 - 35	1 - 10	6 - 35	0 - 5
CPS	90 - 99	-	-	1 - 10	-	0 - 5
CEG	20 - 39	61 - 80	-	-	-	0 - 5

4.2.3. Hidratación del cemento Portland.

A la reacción que ocurre entre el cemento hidráulico con el agua, la cual por dicha combinación forma un hidrato, en términos químicos se le conoce como hidratación. En el cemento la hidratación se refiere a la reacción del cemento no hidratado, dicha hidratación es la que ocasiona los cambios físicos y químicos del cemento, particularmente con el fraguado y el endurecimiento.

Con el fin de lograr una hidratación total del cemento, es necesario combinarlo con una cantidad adecuada de agua, lo cual implica mantener una proporción óptima conocida como relación agua/cemento (A/C). En caso de no utilizar la cantidad adecuada de agua, el avance de la hidratación y las propiedades del material hidratado podrían resultar afectados. (García Guillen, 2011)

El progreso de hidratación se puede ver afectado por diversos de factores, entre los cuales destacan:

- La finura del cemento.
- La relación agua/cemento utilizada.
- La temperatura del curado.
- La presencia de aditivos químicos.

La hidratación del cemento es un proceso en el que ocurren diversas reacciones entre los minerales presentes en el Clinker, el sulfato de calcio y el agua, estas reacciones tienen lugar de forma simultánea y se enumeran a continuación:



- **Primera etapa:** Periodo de pre-inducción.

Se refiere a la fase inicial de hidratación, que se produce en los primeros minutos, prácticamente de manera instantánea cuando las partículas del cemento entran en contacto con el agua. Durante esta etapa, se genera una gran cantidad de calor como resultado de la reacción química entre el agua y el cemento.

- **Segunda etapa:** Periodo de inducción.

Después de la fase de hidratación inicial rápida, se produce una desaceleración en las reacciones de hidratación. En esta segunda etapa, la hidratación de los minerales presentes en el Clinker avanza de forma muy lenta.

- **Tercera etapa:** Periodo de aceleración.

En esta etapa, la hidratación vuelve a acelerarse y se produce un crecimiento en los productos de hidratación. Específicamente, la hidratación del C3S se acelera y se forma una “segunda capa” de gel de silicato de calcio hidratado (CSH).

- **Cuarta etapa:** Periodo de desaceleración.

Durante esta cuarta etapa, el proceso de hidratación experimenta una desaceleración nuevamente, pero de manera gradual. En este punto, el material que aún no ha reaccionado disminuye, y el avance de la hidratación comienza a ser controlado por la difusión en estado sólido.

- **Quinta etapa:** Difusión limitada.

En la quinta y última etapa de hidratación, se ha formado una capa de hidratos en la superficie del cemento, la cual se vuelve cada vez más gruesa, esto dificulta la incorporación de moléculas de agua a las partículas de cemento. Como resultado, la hidratación disminuye, ya que estas moléculas de agua no pueden alcanzar las partículas de cemento. En esta etapa, la pasta de cemento se presenta compacta. (García Guillen, 2011)

4.3. Agregados pétreos.

Los agregados pétreos son materiales considerados inertes y de volumen constante, que son utilizados en la fabricación del concreto hidráulico. Al combinarse con la pasta



“CONCRETO ECOLÓGICO ELABORADO A PARTIR DE DESECHOS DE VIDRIO COMO SUSTITUTO PARCIAL DE LOS AGREGADOS FINOS Y GRUESOS”

cementante (agua más cemento) en proporciones adecuadas, generan una amplia variedad de propiedades mecánicas en el concreto resultante.

Los agregados pétreos representan aproximadamente hasta el 75% del volumen total de una mezcla de concreto hidráulico, por lo que se consideran el "soporte" de la mezcla. Dentro de los agregados pétreos se encuentran las arenas, gravas naturales y rocas trituradas empleadas para preparar concretos. (García Lemus, 2016)

Los agregados pétreos se clasifican en finos y gruesos según el tamaño de sus partículas. La arena es el agregado fino más común, mientras que la grava es el agregado grueso más frecuente en la fabricación de concreto.

En resumen, los agregados pétreos son materiales inactivos de volumen constante que se mezclan con la pasta cementante para crear concretos hidráulicos. Representan una parte significativa del volumen total del concreto y se dividen en agregados finos, como la arena, y agregados gruesos, como la grava. Su combinación en las proporciones adecuadas influye en las propiedades mecánicas del concreto resultante.

4.3.1. Agregado grueso (grava)

Los agregados gruesos están formados principalmente por gravas volcánicas, gravas trituradas, o una combinación de lo anterior, se puede definir como el conjunto de granos sueltos y de estructura cristalina, los cuales son considerados como el material que se retiene en la malla no. 4 (4.75mm) o cuyas partículas sean en su mayoría superiores a 5 mm, y que normalmente se encuentren entre 9.5 mm y 38 mm, los agregados gruesos de mejor calidad no deben ser demasiado porosos, ni de forma muy alargada de acuerdo con los requerimientos que establece la norma NMX-C-111-ONNCCE-2018.



Tamaño nominal, mm (Pulg.)	100	90 a 100	75 a 3"	63 a 2 1/2"	50 a 2"	37,5 a 1 1/2"	25 1" a 1"	19 a 3/4"	12,5 a 1/2"	9,5 a 3/8"	No 4 a 4,75	No 8 a 2,36	No 16 a 1,18
90,0 a 37,5 (3 1/2" a 1 1/2")	100	90 a 100	---	25 a 60	---	0 a 15	---	0 a 5	---	---	---	---	---
63,0 a 37,5 (2 1/2" a 1 1/2")	---	---	100	90 a 100	35 a 70	0 a 15	---	0 a 5	---	---	---	---	---
50,0 a 25,0 (2" a 1")	---	---	---	100	90 a 100	35 a 70	0 a 15	---	0 a 5	---	---	---	---
50,0 a 4,75 (2" a No.4)	---	---	---	100	95 a 100	---	35 a 70	---	10 a 30	---	0 a 5	---	---
37,5 a 19,0 (1 1/2" a 3/4")	---	---	---	---	100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	---	0 a 5	---	---	---
37,5 a 4,75 (1 1/2" a No.4)	---	---	---	---	100	95 a 100	---	35 a 70	---	10 a 30	0 a 5	---	---
25,0 a 12,5 (1" a 1/2")	---	---	---	---	---	100	90 a 100	20 a 55	0 a 10	0 a 15	0 a 5	---	---
25,0 a 9,5 (1" a 3/8")	---	---	---	---	---	100	90 a 100	40 a 85	10 a 40	0 a 15	0 a 5	---	---
25,0 a 4,75 (1" a No.4)	---	---	---	---	---	100	95 a 100	---	25 a 60	---	0 a 10	0 a 5	---
19,0 a 9,5 (3/4" a 3/8")	---	---	---	---	---	---	100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	0 a 5	---	---
19,0 a 4,75 (3/4" a No.4)	---	---	---	---	---	---	100	90 a 100	---	20 a 55	0 a 10	0 a 5	---
12,5 a 4,75 (1/2" a No.4)	---	---	---	---	---	---	---	100	90 a 100	40 a 70	0 a 15	0 a 5	---
9,5 a 2,36 (3/8" a No.8)	---	---	---	---	---	---	---	---	100	85 a 100	10 a 30	0 a 10	0 a 5

Figura 6.- Requerimientos de granulometría para agregado grueso. (NMX-C-111-ONNCCE, 2018)

El agregado grueso debe cumplir con las especificaciones de la figura 6. Cuando se tengan agregados gruesos fuera de dichas especificaciones, se deben procesar para que de esta forma cumplan con los parámetros establecidos en la norma.

4.3.2. Agregado fino (Arena)

Los agregados finos generalmente consisten en arena natural o piedra triturada siendo gran parte de sus partículas menores a 5 mm o cuyas partículas pasen por la malla No. 4.

Tanto en el estado fresco como en el endurecido, la forma y la textura superficial de las partículas de arena o agregado ligero tienen un impacto significativo en la facilidad de manejo del concreto.

Es crucial mantener un control preciso de la cantidad de arena utilizada en una mezcla de concreto, debido a que un exceso de arena implica un aumento en la cantidad de agua requerida. A medida que aumenta la proporción de arena en la mezcla, esta se vuelve más cohesiva y, como resultado se necesita más agua, lo cual implica la necesidad de utilizar una mayor cantidad de cemento para mantener una relación agua-cemento específica.



La arena debe cumplir con los límites granulométricos especificados en la norma NMX-C-111-ONNCCE-2018, los cuales se muestran a continuación.

Criba mm (No.)	Material acumulado en masa, en porcentaje; % que pasa
9,5 (3/8")	100
4,75 (No 4)	95 - 100
2,36 (No 8)	80 - 100
1,18 (No 16)	50 - 85
0,600 (No. 30)	25 - 60
0,300 (No. 50)	10 - 30
0,150 (No 100)	2 - 10

Figura 7.- Límites de Granulometría para el agregado fino. (NMX-C-111-ONNCCE, 2018)

En el agregado fino el retenido parcial en cualquier malla no debe superar al 45 % y en el caso de que el agregado no cumpla con lo especificado en la figura 7, estos materiales pueden ser utilizados de manera exclusiva, siempre y cuando se disponga de registros previos de un comportamiento aceptable en el concreto elaborado con ellos, también es válido si los resultados de las pruebas realizadas en el laboratorio para evaluar estos concretos son satisfactorios.

4.3.3. Clasificación de los agregados pétreos.

De acuerdo a lo establecido en el Manual de tecnología del concreto de la CFE, los agregados pétreos también se pueden clasificar de la siguiente manera:

Por el origen de las rocas:

- **Ígneas**, se producen por solidificación a partir de un estado de fusión. Por lo general, presentan excelentes características físicas, tales como densidad, dureza y resistencia.
- **Metamórficas**, estos materiales provienen de rocas ígneas o sedimentarias que han experimentado modificaciones debido a condiciones de presión y temperatura. Además, presentan una amplia variedad de características distintas entre sí.



- **Sedimentarias**, Se originan a partir de la acumulación de sedimentos que son transportados por agua, aire o gravedad. Existen distintas variedades, algunas son duras y otras suaves, algunas pesadas y otras ligeras, y algunas son densas mientras que otras son porosas. Dentro de esta categoría, destacan las areniscas y las calizas, las cuales, cuando son duras y densas, proporcionan agregados de buena calidad.

Por el método de la fragmentación:

- **Naturales**, se obtienen a través de procesos naturales (erosión).
- **Manufacturados o triturados**, se obtienen a través de procesos artificiales (mecánicos).
- **Mixtos**, se obtienen mediante la combinación de materiales que han sido fragmentados a través de procesos tanto naturales como artificiales.

Por su peso unitario:

- **Baja densidad**, (300 – 800 kg/m³).
- **Ligero**, (800 – 1400 kg/m³).
- **Ligero estructural**, (1400 – 1900 kg/m³).
- **Normal**, (2200 – 2500 kg/m³).
- **Pesado**, (2600 – 5500 kg/m³).

(CFE, 1994)

4.4. Desechos de vidrio.

4.4.1. Vidrio

El vidrio es un material que a simple vista tiene apariencia dura, frágil y transparente, aunque parece un sólido, es un fluido altamente viscoso. Está hecho de una mezcla de óxidos metálicos, cuyo componente principal es el óxido de silicio, llamado sílice (SiO₂). Aunque a primera vista se parece mucho a un cristal, su diferencia radica en la disposición de las moléculas que lo componen, en las que los enlaces se distribuyen de manera desigual, y no siguen un patrón particular, por definición, es un material amorfo. La figura 8 muestra la diferencia entre sus moléculas. (Campos Movilla, Urbina Reynaldo, & Tamayo Ochoa, 2020)

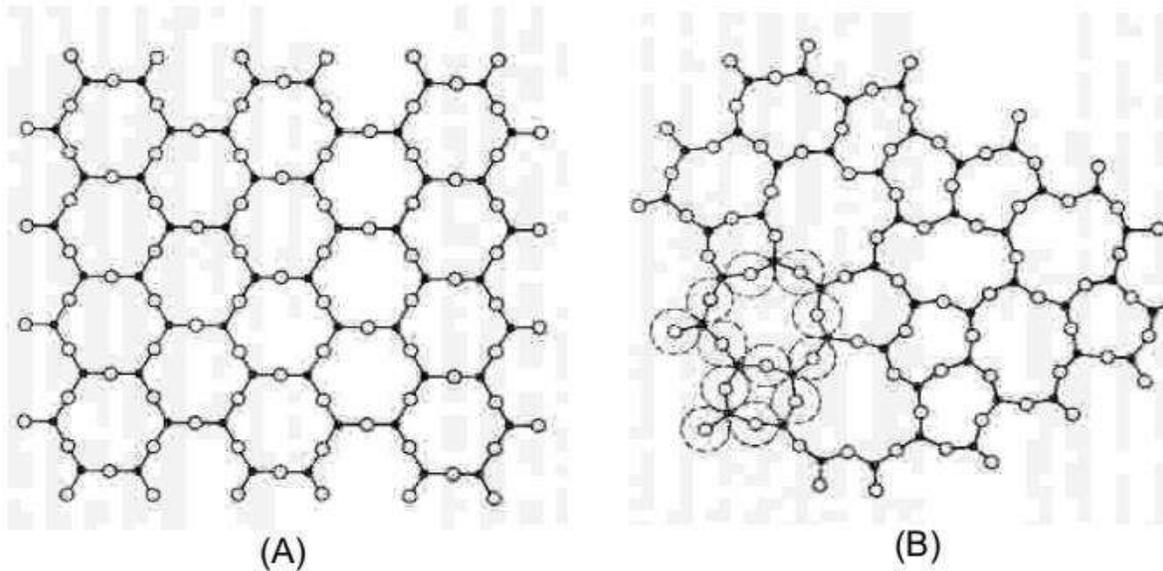


Figura 8.- Diferencia entre el cristal de sílice y el vidrio (A) Cristal organizado de Sílice, (B) Sílice presente en el vidrio. (<http://www.quimitube.com/por-que-los-cristales-no-son-cristales.>)

En general, hay cierta confusión entre el vidrio y el cristal. Aunque comparten la misma composición, su estructura atómica difiere en cuanto al orden. En el cristal, los átomos se organizan de forma ordenada, mientras que en el vidrio se disponen de manera desordenada, lo que resulta en un material amorfo. La estructura del vidrio es más discontinua, tiene un punto de fusión más bajo y es más fácil de manipular en comparación con el cristal. (Campos Movilla, Urbina Reynaldo, & Tamayo Ochoa, 2020) (Palacios Martínez, 2019)

El vidrio exhibe transparencia y una subestructura amorfa, y su viscosidad disminuye con el aumento de la temperatura, lo cual se asemeja al comportamiento de un líquido. Por lo tanto, se podría describir al vidrio como un líquido con una viscosidad extremadamente alta que le confiere la apariencia de un sólido, a pesar de no serlo. (Palacios Martínez, 2019)

4.4.2. Ventajas del reciclaje del vidrio.

Se pueden mencionar algunas ventajas por las cuales se debe de reciclar y reutilizar el vidrio, las cuales se enlistan a continuación:

- **Mejora la calidad del aire y del agua al reducir su contaminación:** Se observa una disminución del 20% en la contaminación del aire. Cada incremento del 10% en el



reciclaje de vidrio resulta en una reducción del 8% en la emisión de partículas a la atmósfera, un 10% en óxidos sulfúricos y un 4% en óxido de nitrógeno.

- **Preservación de recursos naturales y conservación del medio ambiente:** Al disminuir la extracción de materiales de fuentes naturales, se logra un ahorro de recursos al reutilizar cada kilogramo de vidrio, lo cual evita la necesidad de utilizar 1,2 kg de materiales vírgenes como arena y grava.
- **Se evita que los residuos vayan al vertedero:** El reciclaje de cada 3000 botellas de vidrio recicladas se evita que 1000 kg de basura acaben en el vertedero.
- **Ahorro de energía:** Utilizando vidrio triturado o molido de botella en vez de material virgen, se ahorra entre un 20 y un 30% en energía.

(Mata & Gálvez, 2015)

4.4.3. Componentes del vidrio.

El vidrio se compone principalmente de sílice obtenida de arena, cuarzo o pedernal, lo cual representa aproximadamente el 75% de su composición. Otros componentes incluyen el óxido de sodio, que actúa como fundente, el óxido de calcio, que actúa como estabilizante químico, el óxido de aluminio, que mejora la resistencia mecánica, y el coque térmico, que aumenta la refractariedad y reduce la dilatación térmica. Además de estos, se utilizan diversos materiales como descolorantes, colorantes, fluidificantes, opacificantes, entre otros. (Peñafiel Carrillo, 2016)

4.4.4. Proceso de fabricación del vidrio.

Las materias primas que componen el vidrio son trituradas y almacenadas, luego son transportadas por sistemas de gravedad, posteriormente se pesan y dosifican para realizar la mezcla. Una vez que la mezcla está homogeneizada, se introduce en hornos de fusión que alcanzan temperaturas cercanas a los 1500 °C. Una vez completamente fundido, el vidrio se lleva al refinador y finalmente se moldea utilizando técnicas como estirado, soplado, presión, entre otras. (Vidrala, 2021) (Peñafiel Carrillo, 2016)

4.4.5. Propiedades del vidrio.

Entre las propiedades principales del vidrio se destacan las siguientes:



4.4.5.1. Propiedades Físicas

- **Color.** El vidrio tiene un color natural verdoso, al cual se le añaden agentes decolorantes para lograr una apariencia translúcida, también se le pueden agregar colorantes para darle diferentes tonalidades. Los colores utilizados en los envases de vidrio tienen la función de proteger el contenido de la luz. (Palacios Martínez, 2019)
- **Maleabilidad.** Consiste en los métodos de moldeado que se realizan en la etapa de fundición previa al enfriamiento, según el uso que tendrá el vidrio, como un ventanal o una botella. (Características, 2021)
- **Textura.** La textura del vidrio se refiere a la superficie que se puede percibir visual o táctilmente, y las diferentes variantes pueden ser obtenidas según el proceso de fusión y los componentes utilizados. (Características, 2021)

4.4.5.2. Propiedades mecánicas

- **Resistencia a compresión.** Para logra romper un cubo de vidrio de 1cm x 1cm, es necesario aplicarle una carga aproximada de 10 mil kilogramos.
- **Resistencia a la tracción.** La resistencia a la tracción del vidrio varía en función de la duración de la carga y se encuentra en un rango aproximado de 300 a 700 kg/cm². Sin embargo, es importante destacar que la resistencia a la tracción del vidrio disminuye en un 40% cuando se somete a cargas permanentes. Además, a temperaturas más altas, la resistencia a la tracción del vidrio disminuye.
- **Resistencia a la flexión.** La resistencia a la flexión del vidrio es similar a su resistencia a la tracción. Las fuerzas ejercidas sobre el vidrio se centran en los defectos superficiales y pueden propagarse de manera eficiente debido a que es un material homogéneo.

(Peñañiel Carrillo, 2016)

4.4.5.3. Propiedades químicas

- El vidrio es generalmente resistente a la mayoría de los agentes químicos, aunque puede ser atacado por ácido hidrofúorídrico y ácido fosfórico a altas temperaturas. Los álcalis pueden afectar la superficie del vidrio y en situaciones en las que se utilizan marcos de concreto, los álcalis liberados por el cemento durante una lluvia pueden causar opacidad en la superficie del vidrio. La presencia de humedad entre



dos hojas de vidrio estibadas durante un tiempo puede producir el "impresionado" (manchas blanquecinas) de sus superficies que, son muy difíciles de remover.

4.4.6. Antecedentes del uso de desechos de vidrio en concreto.

El vidrio ha sido incorporado en la fabricación de mezclas de concreto debido a su contenido de sílice y calcio, que son elementos presentes en las materias primas del cemento y compuestos puzolánicos, así como en los agregados pétreos utilizados en el concreto. Además, el uso de vidrio en el concreto ofrece una solución a largo plazo para el manejo de residuos de vidrio, ya que no se degradan debido a sus propiedades químicas. Se han utilizado diferentes enfoques para incorporar vidrio en el concreto, como reemplazar parcialmente el agregado grueso, el agregado fino o incluso el cemento.

4.4.6.1. Antecedentes de uso de vidrio como sustituto parcial de agregado grueso.

En la industria de la construcción, el uso del vidrio como agregado grueso es menos recomendable, sin embargo, es posible utilizar cantidades pequeñas para minimizar su impacto en la resistencia del concreto. Esto se debe a que la forma plana y alargada del vidrio afecta la adherencia y la trabajabilidad del concreto. Para el agregado grueso, se recomienda que tenga una superficie rugosa, lo que favorece una mejor unión entre el agregado y la pasta de cemento, en consecuencia, se mantiene una mayor resistencia a la compresión.

Federico & Chidiac citan en su estudio, que se recomienda que el vidrio de desecho se utilice como agregado grueso solo si se emplea un cemento de baja reactividad álcali-agregado. En las mezclas de concreto que utilizan vidrio como sustituto parcial del agregado grueso, es necesario tener en cuenta posibles reacciones negativas que pueden ocurrir entre los agregados y los álcalis presentes en el cemento, en particular la reacción álcali-sílice, esto se debe al alto contenido de sílice presente en el vidrio. (S.E. & L.M., 2009)

4.4.6.2. Antecedentes de uso de vidrio como sustituto parcial de agregado fino.

Los investigadores generalmente recomiendan el uso de vidrio como agregado fino en el concreto, ya que no causa cambios negativos notables en sus propiedades, al contrario, tiende a aumentar la resistencia a la compresión a largo plazo y mejora las propiedades térmicas del concreto. Además, no afecta la durabilidad del concreto y si el vidrio se muele finamente, no contribuye a la reacción álcali-sílice. Sin embargo, la característica más afectada por la



adición de vidrio es la trabajabilidad del concreto, la cual puede mejorarse agregando más agua a la mezcla. (Palacios Martínez, 2019)

4.4.7. Reciclaje y reutilización del vidrio.

El reciclaje del vidrio es el resultado de un proceso que involucra diversas actividades. En este proceso, los envases de vidrio que se han convertido en residuos son recolectados, acumulados y procesados para ser utilizados como materia prima en la fabricación de productos que antes se elaboraban exclusivamente con vidrio nuevo. (Palacios Martínez, 2019)

4.4.8. Recomendaciones para manipular el vidrio triturado y molido.

Las personas que trabajan y manejan vidrio están expuestas a riesgos potenciales que pueden causar daños o lesiones. Esto es especialmente relevante al trabajar con vidrios de desecho, ya que suelen romperse en pedazos grandes y pequeños, con bordes afilados, fragmentos muy finos, entre otros. Los vidrios provenientes de desechos se presentan en diversas formas y representan un riesgo para la seguridad. (Vargas Castro, 2015)

La manipulación de vidrio desechado conlleva un alto riesgo de cortes, por lo tanto, es importante utilizar Equipo de Protección Personal (EPP) para proteger las manos y los ojos, se recomienda el uso de guantes resistentes a cortes y perforaciones, como los guantes anatómicos con palma Dyneema. Estos guantes son esenciales para garantizar la seguridad durante la manipulación del vidrio desechado.

Los requisitos de protección respiratoria varían según el tamaño de las partículas con las que se trabaje, por lo tanto, su uso puede ser obligatorio o no. Las partículas con un diámetro inferior a 100 micras son inhalables y, por lo tanto, se requiere el uso de protección respiratoria.

El tipo de protección (mascarilla o respirador) varía según la concentración y el tiempo de exposición, por lo que es necesario realizar una Evaluación del Riesgo para determinar el tipo de protección más adecuado. (Vargas Castro, 2015)

Los equipos de protección personal (EPP) son solo una barrera de protección entre el trabajador y los riesgos asociados al manejo de vidrio. Es importante tomar otras medidas de seguridad, como las siguientes:



“CONCRETO ECOLÓGICO ELABORADO A PARTIR DE DESECHOS DE VIDRIO COMO SUSTITUTO PARCIAL DE LOS AGREGADOS FINOS Y GRUESOS”

- Mantener el lugar de trabajo limpio y ordenado para prevenir caídas o tropiezos, especialmente al mover láminas de vidrio.
- Marcar las láminas de vidrio de manera visible con un rotulador para evitar accidentes durante el transporte, según el tamaño de las láminas.
- Evitar, siempre que sea posible, almacenar o manipular vidrio por encima de la altura de la cabeza.
- Si es necesario transportar vidrio molido, hacerlo en recipientes cerrados para evitar derrames.
- Evitar levantar más de 25 kg de vidrio por persona para evitar lesiones.

(Vargas Castro, 2015)

4.4.9. Desafío del uso de desechos de vidrio en el concreto hidráulico

Algunos de los desafíos con los que tenemos que lidiar a la hora de emplear desechos de vidrio en el concreto hidráulico se enlistan a continuación:

- **Compatibilidad y adhesión:** asegurar la compatibilidad entre el vidrio reciclado y la matriz de concreto, así como lograr una adhesión adecuada entre los componentes, puede ser un desafío técnico clave.
- **Variedad de calidad del vidrio reciclado:** El vidrio reciclado puede variar en tamaño, forma, color y composición química, lo que puede afectar sus propiedades y comportamiento en el concreto. La calidad y homogeneidad del vidrio reciclado son factores importantes a considerar.
- **Propiedades mecánicas y durabilidad:** Si no se abordan adecuadamente, la incorporación de vidrio reciclado podría afectar negativamente algunas propiedades mecánicas y de durabilidad del concreto, como la resistencia a la compresión y la durabilidad.
- **Percepción y aceptación del mercado:** En algunos casos, puede haber resistencia por parte de los contratistas, diseñadores y otros actores de la industria de la construcción hacia el uso de nuevos materiales, especialmente si no se comprenden completamente sus propiedades y beneficios.

En resumen, el uso de desechos de vidrio en la producción de concreto ofrece ventajas significativas en términos de sustentabilidad y reducción de impacto ambiental. Sin embargo,



también presenta desafíos técnicos y prácticos que deben ser abordados para maximizar sus beneficios y garantizar un rendimiento adecuado del concreto en diferentes aplicaciones de construcción. (Segura Terrones & Siguenza Abanto, 2022)

4.4.10. Aplicaciones potenciales del concreto con desechos de vidrio

La utilización de desechos de vidrio como sustituto de los agregados pétreos en la producción de concreto presenta un amplio rango de aplicaciones potenciales en la industria de la construcción. A medida que la conciencia sobre la sostenibilidad y la necesidad de reducir el impacto ambiental continúan creciendo, el concreto con desechos de vidrio se posiciona como una opción atractiva que combina el rendimiento estructural con los beneficios ambientales.

- **Concreto estructural en edificios y estructuras**

El concreto con desechos de vidrio tiene el potencial de ser utilizado en aplicaciones de concreto estructural, como columnas, vigas y losas en edificios y otras estructuras. La sustitución parcial de los agregados pétreos por vidrio reciclado puede mejorar la resistencia a la compresión y la durabilidad del concreto, al tiempo que reduce la demanda de agregados naturales. Esto puede resultar en estructuras más sostenibles desde el punto de vista ambiental y económico.

- **Pavimentos y aceras**

Los pavimentos y las aceras son áreas de aplicación adicionales para el concreto con desechos de vidrio. En estas aplicaciones, el concreto con vidrio reciclado puede demostrar un rendimiento satisfactorio en términos de resistencia al desgaste y durabilidad. Además, el uso de vidrio reciclado en pavimentos puede contribuir a la reducción de la radiación solar reflejada, lo que a su vez puede ayudar a combatir el efecto isla de calor en áreas urbanas.

- **Elementos no estructurales y decorativos**

El concreto con desechos de vidrio también puede encontrar su lugar en elementos no estructurales y decorativos, como bloques de concreto, adoquines, revestimientos y elementos artísticos. La variedad de colores y texturas del vidrio reciclado puede dar lugar a



“CONCRETO ECOLÓGICO ELABORADO A PARTIR DE DESECHOS DE VIDRIO COMO SUSTITUTO PARCIAL DE LOS AGREGADOS FINOS Y GRUESOS”

diseños únicos y atractivos, lo que lo convierte en una opción a considerar para proyectos que buscan una estética diferenciada y amigable con el medio ambiente.

- **Obras de infraestructura**

Las aplicaciones del concreto con desechos de vidrio no se limitan a edificios y estructuras. Las obras de infraestructura, como muros de contención, puentes y túneles, también podrían beneficiarse de las propiedades mejoradas del concreto con vidrio reciclado. Estas aplicaciones podrían aprovechar tanto las ventajas mecánicas como las ambientales del material.

En conclusión, el concreto elaborado a partir de desechos de vidrio como sustituto de los agregados pétreos presenta un amplio espectro de aplicaciones potenciales en la construcción. Desde elementos estructurales hasta elementos decorativos y obras de infraestructura, la versatilidad y las ventajas ambientales del concreto con vidrio reciclado lo convierten en una opción prometedora para la industria de la construcción sostenible. (Segura Terrones & Siguenza Abanto, 2022)

4.5. Análisis de Ciclo de Vida (ACV)

La creciente conciencia sobre la importancia del cuidado y protección del medio ambiente y los impactos potenciales asociados con los productos, la producción y el consumo, ha incrementado el interés en desarrollar métodos para entender y resolver mejor los problemas que generan estos efectos. Una de las técnicas más desarrolladas en este campo es el análisis de ciclo de vida (ACV).

El ACV es una herramienta analítica que nos ayuda a ver los potenciales impactos al medio ambiente en general que puede ocasionar cualquier producto, proceso o actividad humana desde la extracción de la materia prima, procesamiento, producción, transporte, distribución, uso, reutilización, reciclado y hasta que se vuelve un residuo. A continuación, se muestra de manera esquemática las etapas del ciclo de vida de un producto, dicho esquema va desde la cuna a la tumba.



Figura 9.- Etapas del ciclo de vida de un producto (SinCeO2, 2023).

La norma internacional ISO 14044, describe las fases del análisis de ciclo de vida, las cuales siguen una secuencia definida, dichas fases se enlistan a continuación.

- **Definición del objetivo y el alcance del ACV.** Al definir el objetivo y el alcance de un ACV, se debe especificar la aplicación que se desea realizar, las razones por las cuales se debe realizar el estudio, el público a quien se pretende comunicar los resultados, la unidad funcional y los límites del sistema.
- **Análisis de inventario del ciclo de vida (ICV).** En esta fase se recaba toda la información para cumplir con el objetivo del ACV, esta fase se define como las entradas y salidas de materias y energía de un sistema.
- **Evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV).** El objetivo de la EICV es analizar los datos recabados en el inventario y evaluar sus efectos sobre el medio ambiente, esta fase debe planificarse cuidadosamente para lograr el objetivo y el alcance del ACV. La fase de la EICV debe estar coordinada con otras fases para funcionar de mejor manera. Existen diversos métodos de evaluación, y cada uno tiene en cuenta distintos indicadores y/o factores, la EICV está constituida por elementos obligatorios y opcionales que no ayudaran a entender mejor los resultados obtenidos.
- **Interpretación del ciclo de vida.** Esta fase es la combinación de los resultados del análisis del inventario y de la evaluación de impacto. La fase de interpretación debe proporcionar resultados coherentes con el objetivo y el alcance definidos, que lleguen



a conclusiones, expliquen las limitaciones y proporcionen recomendaciones. (ISO 14044, 2006)

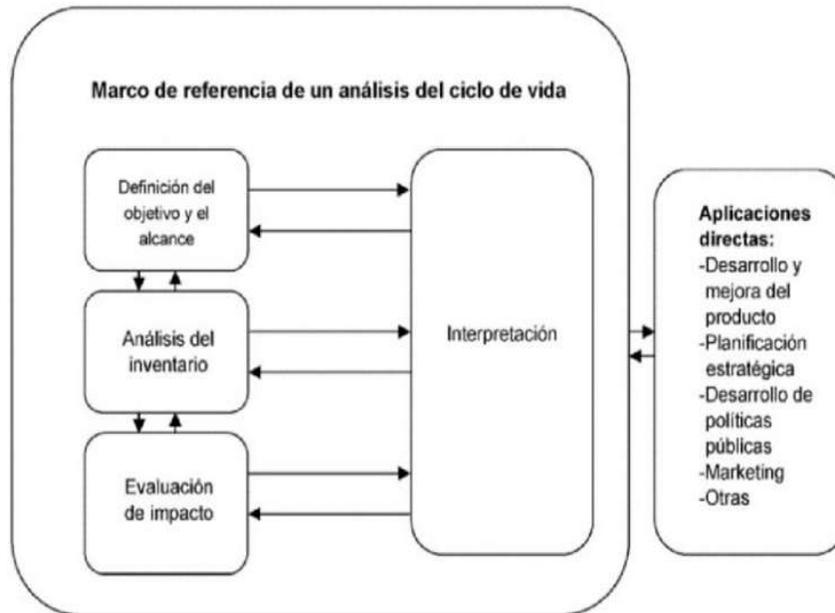


Figura 10.- Marco de referencia de un análisis de ciclo de vida. (Gestiopolis, 2023)

4.5.1. Software “SimaPro”

SimaPro es un software de análisis de ciclo de vida ampliamente utilizado en la evaluación del impacto ambiental y la sostenibilidad de productos y sistemas. Fue desarrollado por la empresa PRé Consultants y se utiliza para modelar y analizar los aspectos ambientales y sociales a lo largo de todo el ciclo de vida de un producto, desde la extracción de materias primas hasta su disposición final. (SimaPro, 2023)

SimaPro permite a los usuarios crear modelos detallados de productos y sistemas, incluyendo todas las etapas de su ciclo de vida, y evaluar su impacto en términos de consumo de recursos, emisiones de gases de efecto invernadero, contaminación del aire y agua, entre otros aspectos. Esto es útil para tomar decisiones informadas sobre diseño de productos, procesos de producción y estrategias de gestión sostenible. (ISM, 2021)

4.5.1.1. Impactos ambientales que mide “SimaPro”

SimaPro es una herramienta de análisis de ciclo de vida que permite medir una amplia gama de impactos ambientales y sociales asociados con productos y sistemas a lo largo de su ciclo de vida. Algunos de los impactos que SimaPro puede medir incluyen:



- **Cambio climático:** SimaPro puede calcular las emisiones de gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O), y evaluar su contribución al cambio climático.
- **Agotamiento de recursos:** El software puede evaluar el uso de recursos naturales, como el consumo de agua, energía y materiales, y sus efectos sobre la disponibilidad futura de estos recursos.
- **Contaminación del aire y agua:** SimaPro puede calcular las emisiones de contaminantes atmosféricos y su impacto en la calidad del aire, así como la contaminación del agua resultante de las actividades del ciclo de vida.
- **Acidificación:** El software puede cuantificar las emisiones de sustancias que causan la acidificación del suelo y el agua, lo que puede tener impactos negativos en los ecosistemas.
- **Eutrofización:** SimaPro puede evaluar las emisiones de nutrientes que contribuyen a la eutrofización de cuerpos de agua, lo que puede provocar un crecimiento excesivo de algas y dañar los ecosistemas acuáticos.
- **Toxicidad:** El software puede medir la toxicidad potencial de los productos y sistemas, teniendo en cuenta los efectos negativos en la salud humana y el medio ambiente.
- **Depleción de ozono:** SimaPro puede evaluar las emisiones de sustancias agotadoras de la capa de ozono y su impacto en la capa de ozono estratosférico.
- **Impactos sociales:** Aunque el enfoque principal de SimaPro es en los impactos ambientales, también se pueden incorporar aspectos sociales, como la equidad en la cadena de suministro o el empleo, dependiendo de cómo se configuren los análisis.

Estos son solo algunos ejemplos de los impactos que SimaPro puede medir. El software permite a los usuarios crear modelos detallados que reflejen con precisión el ciclo de vida de un producto o sistema, y luego evaluar una amplia gama de indicadores y resultados según los datos ingresados en el modelo.



5. METODOLOGÍA

La experimentación se pre-diseño en función de la revisión de trabajos realizados y se realizó de la siguiente manera:

- Se realizó la caracterización de los materiales pétreos (Arena y grava) y del cemento portland en condiciones de laboratorio. El cemento portland que se utilizará será el mismo para todas las mezclas de concreto, el cual es CPC 30 R RS marca Tolteca.
- Se realizaron distintas mezclas de concreto, todas con resistencia de proyecto de 250 kg/cm^2 , una de ellas será la mezcla testigo (sin añadir vidrio), otras serán sustituyendo un 10, 20 y 30% de agregado grueso por desechos de vidrio triturado, otras serán sustituyendo un 10, 20 y 30% de agregado fino por desechos de vidrio molido y las ultimas sustituyendo 4 distintos porcentajes de ambos agregados en la misma mezcla de concreto. A todas las mezclas se le realizaran pruebas de revenimiento, en condiciones de laboratorio. Estos porcentajes propuestos son en base a la revisión de trabajos de experimentación con desechos de vidrio, de los cuales de escogieron los 4 de mejor comportamiento a resistencia a compresión.
- Se realizaron especímenes para todas y cada una de las mezclas, a los cuales se les harán pruebas destructivas, no destructivas y de durabilidad a varias edades de pruebas.
- Se compararon las propiedades obtenidas del concreto con sustitución de vidrio por los agregados pétreos, con el concreto testigo y de esta forma analizar su comportamiento en todos los casos de sustitución.
- Y por último, se cuantifico cuánto porcentaje de sustitución de agregado por vidrio es el que mantiene o mejora las características de diseño del concreto y darnos a la idea de cuánto sería la cantidad de vidrio a la que se puede dar una segunda vida y por ende también la cantidad de agregados pétreos que se pueden conservar, y así lograremos reciclar el vidrio, preservar los recursos naturales (bancos de material) y conservación del medio ambiente.



5.1. Caracterización de los agregados pétreos.

Como se ha mencionado previamente, los agregados pétreos se refieren al material comúnmente conocido como grava (agregado grueso) y arena (agregado fino). Estos materiales juegan un papel fundamental en las propiedades físicas del concreto, ya que representan entre el 60% y 75% del volumen total de la mezcla de concreto y su influencia es crucial en las características resultantes del mismo.

En el contexto de este estudio en particular, los agregados pétreos utilizados para la investigación fueron obtenidos de dos bancos de materiales localizados en las proximidades del municipio de Morelia., a los cuales se realizó el muestreo como lo especifica la norma NMX-C-030-ONNCCE-2004.

La caracterización para obtener las propiedades físicas de los agregados pétreos, se realizó en condiciones de laboratorio y en base a lo especificado en las normas mexicanas del Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE).

5.1.1. Agregado fino (arena)

El agregado fino se refiere al material conocido como arena, el cual tiene la capacidad de pasar a través de la malla con una apertura de 4.75 mm (Malla #4) y se retiene en la malla con una apertura de 0.075 mm (Malla #200). (NMX-C-111-ONNCCE, 2018)

5.1.1.1. Obtención de la muestra

El Objetivo de esto, es obtener y traer al laboratorio una muestra representativa del yacimiento de los agregados pétreos (grava y arena) que se van a emplear en la elaboración de mezclas de concreto, para poder realizar los estudios o pruebas correspondientes de dichos materiales en el laboratorio. (NMX-C-030-ONNCCE, 2004)

El agregado fino caracterizado fue obtenido del banco de material llamado “Joyitas” ubicado en el municipio de Morelia, el material obtenido es de origen volcánico, dicho material es tomado directamente del sitio por una draga, esta draga deposita el material en un camión para ser trasladado a un depósito en donde se acumula y es aquí donde se realiza la obtención de la muestra que se llevará al laboratorio.



Figura 11.- Banco de material “Joyitas”. (Google Earth, 2022)



Figura 12.- Toma de muestra de material almacenado de arena del banco de material “Joyitas”. (Contreras, 2022)

5.1.1.2. Cuarteo de agregado finos

El propósito de esta prueba es obtener una muestra del material que sea representativa y tenga el tamaño adecuado directamente del banco de material. Esta muestra será utilizada para la prueba correspondiente y se asegurará de que sea representativa como la muestra obtenida en el campo.



Para realizar el cuarteo de los agregados obtenidos en campo hasta el tamaño requerido para cualquier prueba de laboratorio se realizó de acuerdo a lo especificado en la norma NMX-C170-ONNCCE-2019, lo cual se describe a continuación.

Equipo:

- Palas.
- Cucharones.
- Charolas.
- Báscula.
- Divisor de muestras.
- Trozo de plástico.

Procedimiento:

Para realizar el cuarteo de muestras existen 3 procedimientos que a continuación se describen:

A. Cuarteo mecánico.

1. Se toma la muestra de cuartos opuestos, previamente puesta en uno de los receptáculos del divisor y se vacía por la parte superior del cuarteador mecánico, distribuyéndola uniformemente en toda su longitud. Ver figura 13 y 14.
2. Luego, el material que se encuentra en uno de los compartimentos del divisor se retira y se vuelve a combinar con el material del cual se extrajo inicialmente. Se repite este proceso de reintroducir la porción restante de la muestra al divisor de muestras tantas veces como sea necesario, hasta que la muestra se reduce al tamaño deseado o requerido para la prueba programada.

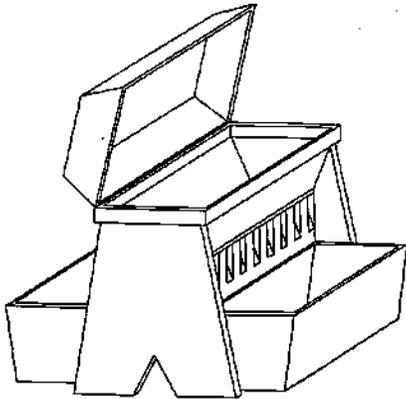


Figura 13.- Cuarteador mecánico. (NMX-C-030-ONNCCE, 2004)



Figura 14.- Cuarteado del agregado fino por el método A. (Contreras, 2023)

B. Cuarteo manual.

1. La muestra que se trajo de campo se coloca sobre una superficie horizontal y limpia, donde no haya riesgo de pérdida ni contaminación del material.
2. Se mezcla el material, esto se hace cambiando el material de un lado a otro, el cambio se hace con ayuda de la pala, tratando de mezclar todo el material y procurando apilarlo en forma cónica. Este proceso se debe repetir 3 veces como mínimo. Ver figura 15.
3. Con ayuda de la parte de atrás de la pala se procede a aplanar el material apilado, hasta obtener un diámetro y espesor uniforme, el diámetro debe de ser de aproximadamente de cuatro a ocho veces el espesor del montículo. Ver figura 16.
4. Posteriormente se realizan dos líneas perpendiculares con el fin de dividir la muestra en 4 partes iguales, desechando las dos porciones opuestas, se utilizará el material restante para llevar a cabo las pruebas pertinentes. Si es necesario reducir el tamaño de la muestra, se vuelve a repetir el procedimiento previamente mencionado. Ver figura 17 y 18.



Figura 18.- Cambiando el material de un lado a otro por paleado. (Contreras, 2023)



Figura 16.- Aplanado de la parte superior del montículo de arena, por medio de la pala. (Contreras, 2023)

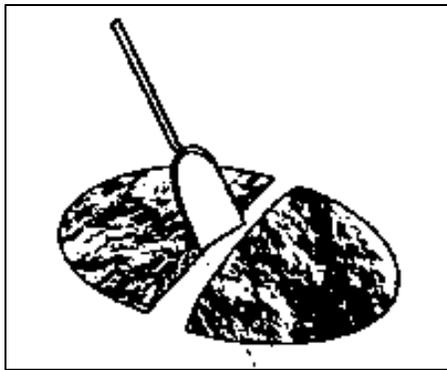


Figura 17.- Cuarteado después de aplanar con el montículo. (NMX-C-170-ONNCCE, 2019)



Figura 15.- Muestra de arena dividida en cuartos (Contreras, 2023)

C. Procedimiento con el trozo de plástico.

1. Se debe colocar el trozo de plástico en una superficie horizontal para posteriormente colocar la muestra en la parte media del mismo.
2. Se toman las dos puntas opuestas del trozo de plástico y se juntan, luego se vuelve a la posición inicial; luego se toman las otras dos puntas opuestas y se juntan, y nuevamente se vuelve a la posición inicial. Este proceso se repite varias veces con el fin de lograr una mezcla homogénea.
3. Se desecha la mitad del material ya cuarteado y la otra mitad se puede usar para hacer los ensayos necesarios en caso de ya tener el tamaño de muestra, si no se repite el proceso hasta obtener el tamaño necesario de la muestra.

Las muestras de arena que estén superficialmente secas deben ser reducidas de tamaño por el método mecánico y las que se encuentran húmedas superficialmente deben ser reducidas por el método manual o por palas.



5.1.1.3. Masa volumétrica seca y suelta

El objetivo de esta prueba es determinar la masa por unidad de volumen de la arena, siendo el volumen el ocupado por el material en el recipiente en forma libre y natural. Dicha prueba se realizó en base al procedimiento y las especificaciones de la norma mexicana NMX-C-073-ONNCCE-2004.

Equipo:

- Muestra totalmente seca de arena.
- Recipiente con masa y volumen conocido.
- Varilla lisa punta de bala de 5/8 de diámetro.
- Báscula.
- Cucharón y pala.

Procedimiento:

Para la elección del recipiente que se usará para la prueba, se debe elegir de acuerdo al tamaño máximo nominal del agregado, como se observa en la siguiente tabla 4.

Tabla 4.- Dimensiones de los recipientes de acuerdo al tamaño máximo del agregado. (NMX-C-073-ONNCCE, 2004)

Capacidad L (cm ³)	Espesor mínimo (mm)		Tamaño máximo nominal del agregado (mm)
	Fondo	Pared	
5 (5,000)	5.0	2.5	13
10 (10,000)	5.0	2.5	25
14 (14,000)	5.0	3.0	40
28 (28,000)	5.0	3.0	100

Como la mayoría de las partículas de la arena tienen un tamaño máximo nominal menor de 5 mm, y de acuerdo a la tabla 4, para esta prueba se debe utilizar un recipiente con capacidad de 5 litros o incluso se puede usar un recipiente con menor capacidad, ya que el recipiente de 5 litros es para un tamaño máximo de hasta 13 mm y como el de la arena es menor de 5 mm, para esta prueba se utilizó un recipiente de 2.785 litros.



1. Se debe colocar el material seco en una superficie plana y limpia, para proceder a realizar el cuarteo del mismo, mediante el método de cuarteo por palas, y se coloca el recipiente en el centro del material ya cuarteado, para proceder con su llenado.
2. A continuación, se llena el recipiente vertiendo la arena desde una distancia aproximada de 5 cm por encima de la parte superior del recipiente. Se asegura una distribución uniforme del material y se llena completamente el recipiente hasta que la arena exceda el borde sin derramarse. Ver figura 19 y 20.
3. Después se procede a enrasar el molde con ayuda de la varilla y se procede a limpiar el recipiente de las partículas que puedan quedar adheridas en sus paredes exteriores. Ver figura 21.
4. Se procede a obtener su masa, a esa masa se le resta el peso del recipiente para así obtener el peso de la arena. Ver figura 22.



Figura 19.- Vaciado de la arena en el recipiente con volumen y masa conocida. (Contreras, 2023)



Figura 20.- Llenado del recipiente sobrepasando el borde. (Contreras, 2023)



Figura 21.- Enrasado del recipiente con ayuda de la varilla. (Contreras, 2023)



Figura 22.- Masa de la arena con el recipiente. (Contreras, 2023)

Cálculos:

$$MVSS = \frac{M}{V}$$

Donde:

MVSS = Masa volumétrica seca y suelta (g/cm³).

M = Masa de la arena (g).

V = Volumen del recipiente (cm³).

Resultados:

Los resultados obtenidos fueron de tres muestras representativas de la arena de las cuales se obtuvo un promedio, dichos resultados se observan a continuación.

Tabla 5.- Resultados para Masa volumétrica seca y suelta de la arena.

MVSS ARENA						
MUESTRA	MASA DEL RECIPIENTE + ARENA (g)	MASA DEL RECIPIENTE (g)	MASA DE LA ARENA (g)	VOLUMEN DEL RECIPIENTE (cm3)	MVSS (kg/m3)	PROMEDIO
1	5645	1890	3755	2759	1361.00	1356.77
2	5625	1890	3735	2759	1353.75	
3	5630	1890	3740	2759	1355.56	



5.1.1.4. Masa volumétrica seca y compactada

El objetivo de esta prueba es determinar la masa por unidad de volumen de la arena, siendo el volumen el ocupado por el material en el recipiente, cuando es sometido a cierto grado de compactación con la varilla. Dicha prueba se realizó siguiendo el procedimiento y las especificaciones de la norma mexicana NMX-C-073-ONNCCE-2004.

Equipo:

- Muestra de arena totalmente seca.
- Recipiente de peso y volumen conocido.
- Varilla lisa punta de bala de 5/8 de diámetro.
- Báscula.
- Cucharón y pala.

Procedimiento:

El recipiente que se utilizara en esta prueba, es el mismo que se utilizó en la prueba de masa volumétrica seca y suelta, obtenido de la tabla 4.

1. Se debe colocar el material seco en una superficie plana y limpia, para proceder a realizar el cuarteo del mismo, mediante el método de cuarteo por palas, y se coloca el recipiente en el centro del material ya cuarteado, para proceder con su llenado.
2. Después se procede al llenado del recipiente con la arena, dejándola caer a una altura de 5 cm, a diferencia de la prueba anterior, en esta prueba el llenado del recipiente se hace en tres capas, dándole a cada capa 25 golpes con la varilla, distribuyéndolos en toda su superficie. Ver figura 23.
3. Se procede a enrasar el recipiente con ayuda de la varilla y se limpia el recipiente de las partículas adheridas en las paredes exteriores.
4. Por último, se pese y a la masa se le resta el peso del recipiente para obtener la masa de la arena. Ver figura 24.



Figura 23.- Compactación de la arena con ayuda de la varilla punta de bala. (Contreras, 2023)



Figura 24.- Obtención de la masa de la arena con el recipiente. (Contreras, 2023)

Cálculos:

$$MVSC = \frac{M}{V}$$

Donde:

MVSC = Masa volumétrica seca y compactada (g/cm³).

M = Masa de la arena (g).

V = Volumen del recipiente (cm³).

Resultados:

Los resultados obtenidos fueron de tres muestras representativas de la arena de las cuales se obtuvo un promedio, dichos resultados se observan a continuación.

Tabla 6.- Resultados para Masa volumétrica seca y compactada de la arena.

MVSV ARENA						
MUESTRA	MASA DEL RECIPIENTE + ARENA (g)	MASA DEL RECIPIENTE (g)	MASA DE LA ARENA (g)	VOLUMEN DEL RECIPIENTE (cm3)	MVSS (kg/m3)	PROMEDIO
1	5965	1890	4075	2759	1476.98	1481.21
2	5990	1890	4100	2759	1486.05	
3	5975	1890	4085	2759	1480.61	



5.1.1.5. Humedad de absorción en arenas

El objetivo de esta prueba es determinar el incremento en la masa de un agregado seco, cuando es sumergido en agua durante 24h a temperatura ambiente, este aumento de masa es debido al agua que introducida en los poros del material y no incluye el agua adherida a la superficie de las partículas, se expresa en porciento de la masa seca y es índice de la porosidad del material. Dicha prueba se realizó siguiendo el procedimiento y las especificaciones de la norma mexicana NMX-C-165-ONNCCE-2020.

Equipo:

- Una muestra de arena de 2 kg aproximadamente.
- Báscula.
- Parrilla de gas.
- Charolas.
- Cono troncocónico.
- Pisón.
- Espátula.
- Un vidrio reloj.

Procedimiento:

El molde troncocónico debe ser de lámina de metal tipo inoxidable con un espesor mínimo de 0.8 mm, sin fondo, con medidas interiores de 40 mm de diámetro superior, 90 mm de diámetro inferior, 75 mm de altura y cada dimensión con una tolerancia de ± 3 mm. Este molde sirve para saber cuándo la arena está saturada y superficialmente seca.

1. La arena se pone a saturar con agua, manteniendo un tirante mínimo de 2 cm por encima del agregado, durante un tiempo de 24 horas como mínimo. Ver figura 25.
2. Transcurridas las 24 horas se coloca la muestra de arena en la parrilla de gas para eliminar el exceso de agua que contenga, es decir, secar la arena superficialmente.
3. Para corroborar que la arena se encuentre seca superficialmente, se pone el molde troncocónico dentro de la charola con el diámetro mayor hacia abajo, se llena el molde con la arena hasta que sobrepase el borde superior del mismo, se procede a compactar con la masa propia del pisón, colocándolo suavemente 10 veces sin altura de caída, se vuelve a llenar el molde, se compacta 10 veces más con la masa del pisón,



nuevamente se llena el molde y se compacta solo 3 veces, se llena por última vez y se compacta 2 veces más, para así completar 25 compactaciones. Si al final de las 25 compactaciones el material rebasa el borde superior del molde, se enrasa con el mismo pisón y cuidando de no ejercer presión sobre el material. Ver figura 26.

4. Justo después, se retira el molde de forma vertical y se evalúa la arena. Si la arena tiende a desmoronarse, significa que ya está seca en la superficie. Por otro lado, si la arena mantiene la forma del cono, indica que todavía contiene un exceso de agua. En tal caso, es necesario continuar el proceso de secado hasta que la superficie de la arena esté completamente seca.
5. Cuando la arena se encuentre saturada y superficialmente seca, se procede a obtener una muestra de 300 gramos, registrándolo como masa saturada y superficialmente seca (M_{ss}).
6. La muestra de 300 gramos se pone en una charola y se coloca en la parrilla de gas hasta eliminar por completo el agua, es decir, hasta que esté completamente seca.
7. Para verificar que efectivamente se encuentra seco, se coloca el vidrio sobre la muestra, y si no se empaña se procede a retirar el material de la parrilla, se deja enfriar y se obtiene su masa, registrándola como masa seca (M_s).



Figura 25.- Arena saturada con agua.
(Contreras, 2023)



Figura 26.- Compactando la arena con el pisón.
(Contreras, 2023)

Cálculos:

$$\% H. Abs. = \frac{M_{ss} - M_s}{M_s} * 100$$

Donde:

% H. Abs. = Porcentaje de húmeda de absorción.



M_{ss} = Masa saturada y superficialmente seca de la muestra (g).

M_s = Masa seca de la muestra (g).

Resultados:

Los resultados obtenidos en esta prueba fueron de tres muestras representativas de la arena de las cuales se obtuvo un promedio, dichos resultados se observan a continuación.

Tabla 7.- Resultados para humedad de absorción de la arena.

ABSORCIÓN ARENA			
MUESTRA	1	2	3
M _{ss}	308.2	307.2	207.4
M _s	293.4	292.8	197.5
% H. Abs.	5.04	4.92	5.01
Promedio	5.00		

5.1.1.6. Densidad relativa saturada en arenas

El objetivo de este ensayo es determinar la relación de la masa del agregado por unidad de volumen, considerando la masa de las partículas saturadas de agua y superficialmente secas. Dicha prueba se llevó a cabo de acuerdo al procedimiento y las especificaciones de la norma mexicana NMX-C-165-ONNCCE-2020.

Equipo:

- Muestra representativa de arena.
- Parrillas.
- Charolas.
- Espátulas.
- Molde troncocónico.
- Frasco de Chapman.
- Vidrio reloj.
- Probeta.
- Báscula.



Procedimiento:

1. La muestra de arena de aproximadamente 2 kg se pone a saturar durante un tiempo de 24 horas como mínimo.
2. De la muestra saturada se toma una porción de 1 kg y se escurre el agua el exceso.
3. Se procede a secar superficialmente la muestra y controlando el secado por medio del molde troncocónico y pisón, de la misma forma que en la prueba de humedad de absorción en arenas.
4. Se pesa el frasco de Chapman, registrándolo como F. Posteriormente se llena el frasco de agua hasta la marca de 200 ml. Ver figura 27.
5. Del material saturado y superficialmente seco se toma una porción de 300 gramos aproximadamente y se registra como As. Ver figura 28.
6. La muestra de arena saturada y superficialmente seca, se coloca dentro del frasco de Chapman, posteriormente se inclina un poco el frasco y se empieza a rodar sobre una superficie horizontal durante un tiempo conveniente para eliminar las burbujas de aire atrapadas.
7. Se llena el frasco hasta la marca de 450 ml con agua, se procede a pesar el frasco con el material y el agua y se registra como K. Ver figura 29 y 30.



Figura 27.- Peso del frasco de Chapman.
(Contreras, 2023)



Figura 28.- Masa de la arena saturada y superficialmente seca. (Contreras, 2023)



Figura 29.- Frasco con arena y agua, hasta la marca de 450 ml. (Contreras, 2023)



Figura 30.- Peso del frasco junto con la arena y el agua. (Contreras, 2023)

Cálculos:

$$Dr_{rss} = \frac{A_s}{450 - (K - F - A_s)}$$

Donde:

Dr_{rss} = Densidad relativa aparente saturada.

A_s = Peso de la arena saturada y superficialmente seca (g).

F = Peso del frasco de Chapman (g).

K = Peso del frasco con la arena y el agua (g).

Resultados:

Los resultados obtenidos en esta prueba fueron de dos muestras representativas de la arena de las cuales se obtuvo un promedio, dichos resultados se observan a continuación.

Tabla 8.- Resultados para densidad de la arena.

DENSIDAD ARENA		
MUESTRA	1	2
A_s	260.2	253.8
F	323.6	300.2
K	923.2	895.6
Dr_{rss}	2.35	2.35
Promedio	2.35	



5.1.1.7. Análisis granulométrico

El propósito de esta prueba consiste en someter una muestra representativa de arena a través de una serie de tamices, con el fin de determinar la distribución de las partículas y obtener el módulo de finura. Este parámetro es de gran importancia para el diseño adecuado de las mezclas de concreto. Dicha prueba se realizó de acuerdo al procedimiento y las especificaciones de la norma mexicana NMX-C-077-ONNCCE-2019.

Equipo:

- Muestra representativa de arena de 600 g aproximadamente.
- Juego de mallas con abertura rectangular o circular del No 4, 8, 16, 30, 50, 100, 200 y charola con su respectiva tapa.
- Báscula.
- Charolas.
- Espátulas.
- Horno.
- Cepillo de cerdas
- Cepillo de alambre.
- Hojas de papel

La muestra para la prueba de agregado fino se seca en el horno y debe tener una masa aproximada de las cantidades siguientes:

- Agregado en que por lo menos el 95 % pase la malla No. 8 a 100 gramos aproximadamente.
- Agregado en que por lo menos el 90 % pase la malla No. 4 y más del 5 % quede retenido en la malla No. 8 a 500 gramos aproximadamente.

Procedimiento:

1. La muestra de arena se coloca en el horno a una temperatura no mayor de 110 °C hasta peso constante.
2. Una vez que el material se encuentre seco, tomamos una muestra de 600 gramos aproximadamente. Ver figura 31.
3. Se acoplan las mallas en orden decreciente de tamaño de abertura (4, 8, 16, 30, 50, 100, 200 y charola) y se coloca la muestra en la malla superior y se tapa bien. Las



mallas se colocan algún dispositivo mecánico (Raf-tap) por un tiempo aproximado de 15 minutos. Ver figura 32 y 33.

4. Se obtiene la masa del material retenido en cada una de las mallas con ayuda de la báscula. Para llevar a cabo este proceso, se requiere manipular las mallas con precaución y utilizar un cepillo de alambre para eliminar el material atrapado en los espacios de las mallas 4, 8, 16 y 30. Por otro lado, las mallas 50, 100 y 200 se limpiarán utilizando un cepillo con cerdas. Ver figura 34.
5. Sobre una superficie plana y libre de suciedad se disponen hojas de papel, y se coloca encima el material capturado en cada una de las mallas que ha sido previamente pesado. Esto se realiza con el propósito de tenerlo como referencia en caso de que se produzca algún error durante el proceso.



Figura 32.- Masa de la muestra de arena a utilizar. (Contreras, 2023)



Figura 31.- Mallas acopladas en orden decreciente. (Contreras, 2023)



Figura 33.- Agitado de las mallas por medio de dispositivo mecánico (Raf-tap). (Contreras, 2023)



Figura 34.- Peso retenido en la malla No. 16. (Contreras, 2023)



Cálculos:

$$\% \text{ retenido} = \frac{\text{peso retenido}}{\text{suma del peso retenido}} * 100$$

$$\% \text{ acumulado} = \% \text{ retenido malla} + \% \text{ acumulado malla anterior}$$

$$\% \text{ Que pasa de la malla} = 100 - \% \text{ acumulativo de la malla}$$

$$MF = \frac{\sum \text{de malla No. 8 hasta la malla No. 100}}{100}$$

Donde:

MF = Módulo de finura de la arena.

Para estándares de calidad la norma nos especifica que el Módulo de finura este entre 2.3 y 3.1. El retenido parcial en cualquier malla no debe ser mayor a 45%. (NMX-C-111-ONNCCE, 2018)

Los valores de % que pasa en cada malla, se deben encontrar dentro de los rangos establecidos en la siguiente tabla 9.

Tabla 9.- Límites granulométricos para agregado fino. (NMX-C-111-ONNCCE, 2018)

Malla	% Que pasa
3/8	100
4	95-100
8	80-100
16	50-85
30	25-60
50	10-30
100	2-10



En base a lo especificado en la norma NMX-C-111-ONNCCE-2018, se realizó una gráfica en la cual se muestran los límites granulométricos que debe presentar la arena para usarla ya sea en mezclas de concreto o de mortero, según dentro de que límites se encuentre la misma.

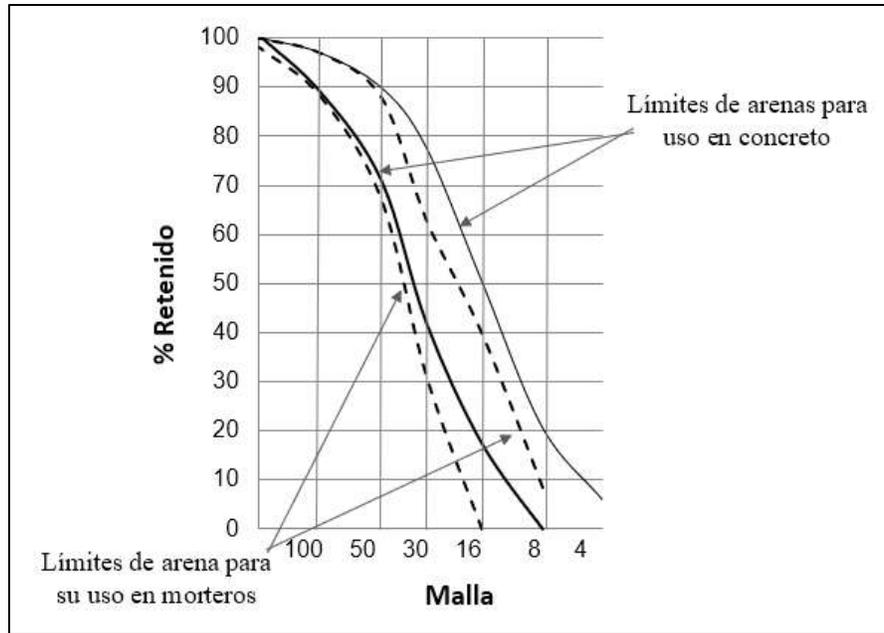


Figura 35.- Límites granulométricos del agregado fino para mezclas de concreto y mortero.

Resultados:

Los resultados obtenidos en esta prueba fueron de dos muestras representativas de la arena de las cuales se obtuvo la distribución de tamaños y un M.F. promedio, dichos resultados se observan a continuación.

Tabla 10.- Análisis granulométrico para la muestra #1 de la arena.

Muestra #1, 617.4 gramos				
MALLA	PESO RETENIDO	% RETENIDO	% ACUMULADO	% QUE PASA
8	134.6	21.84	21.84	78.16
16	172	27.91	49.76	50.24
30	132.2	21.45	71.21	28.79
50	87.4	14.18	85.39	14.61
100	34.8	5.65	91.04	8.96
200	17.8	2.89	93.93	6.07
Charola	37.4	6.07	100.00	0.00
Suma	616.2		M.F. = 3.19	



Tabla 11.- Análisis granulométrico para la muestra #2 de la arena.

Muestra #2, 476.2 gramos				
MALLA	PESO RETENIDO	% RETENIDO	% ACUMULADO	% QUE PASA
8	99.6	20.95	20.95	79.05
16	134	28.19	49.14	50.86
30	104.2	21.92	71.06	28.94
50	71.2	14.98	86.03	13.97
100	28	5.89	91.92	8.08
200	9	1.89	93.82	6.18
Charola	29.4	6.18	100.00	0.00
Suma	475.4		M.F. = 3.19	

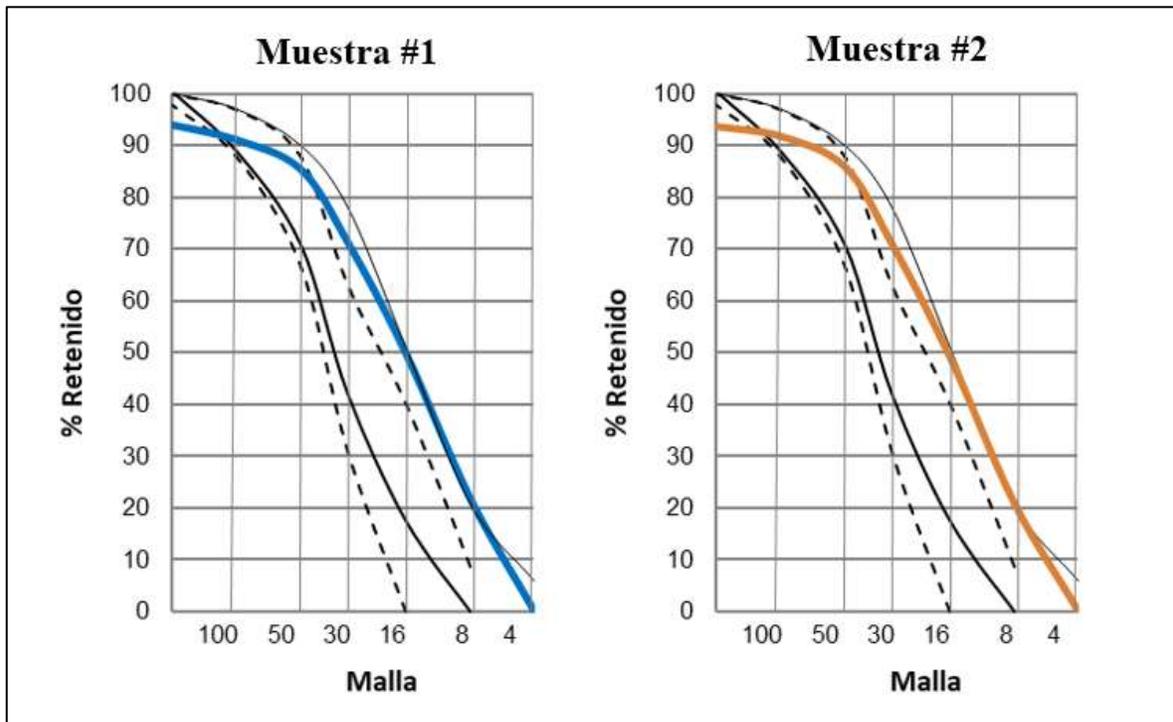


Figura 36.- Gráficas de la granulometría de las 2 muestras representativas de la arena.

De acuerdo a la tabla 10 y 11, se puede observar que al promediar ambas muestras se obtiene un Módulo de finura igual a 3.19 y en base a las gráficas anteriores se puede concluir que la arena es apta para su uso en la elaboración de concreto, ya que casi toda la curva de ambas muestras de la arena se encuentra dentro de los límites para concreto.



5.1.1.8.- Impurezas orgánicas en la arena

El objetivo de esta prueba es verificar si existe presencia de materia orgánica dañina en agregados finos que se usan para la fabricación de concreto hidráulico, en forma comparativa, utilizando una tabla colorimétrica.

Las impurezas orgánicas no son más que desechos de microorganismos, fracciones pequeñísimas de hojas, etc. que, si existen en altas cantidades en el agregado fino, pueden alterar en forma perjudicial las reacciones normales entre el agua y cemento.

Dicha prueba se realizó en base al procedimiento y las especificaciones de la norma mexicana NMX-C-088-ONNCCE-2019.

Equipo:

- Botellas de vidrio de 250 a 350 cm³.
- Charolas.
- Parrilla de gas.
- Espátula.
- Báscula.
- Vaso de precipitado.
- Ingredientes para elaborar las soluciones.
- Tabla colorimétrica.
- Solución de sosa cáustica (30 gramos por litro de solución de normal en agua destilada).

En el caso de que no se cuente con la tabla colorimétrica, se tiene que elaborar una solución normalizada de coloración permanente normal o No. 3. Para hacer dicha solución, hay que disolver ácido tánico, 2 gramos en 10 cm³ de alcohol, posteriormente se añaden 90 cm³ de agua destilada, se hace en un vaso de precipitado, esta debe hacerse justo en el momento de hacer la comparación de color.

Procedimiento:

1. Se toma una muestra de arena de 500 gramos aproximadamente y se introducen en el horno para su secado a una temperatura máxima de 110 °C.



“CONCRETO ECOLÓGICO ELABORADO A PARTIR DE DESECHOS DE VIDRIO COMO SUSTITUTO PARCIAL DE LOS AGREGADOS FINOS Y GRUESOS”

2. La arena ya seca se introduce en el frasco de vidrio hasta 130 cm³ agregándole la solución de sosa cáustica hasta la marca de 200 cm³. Ver figura 37.
3. Se tapa la botella y se procede a agitar durante un lapso de 2 minutos, la botella se deja reposar 24 horas.
4. Transcurridas las 24 horas se comparará el color del líquido de la botella con la tabla colorimétrica o con la solución normalizada, según sea el caso. Ver figura 38.

Si el color del líquido que esta sobre el agregado es más oscuro que el color normalizado No.3 de la tabla colorimétrica, puede considerarse que el agregado bajo prueba contiene compuestos orgánicos en cantidades perjudiciales para los morteros y concretos. (NMX-C-088-ONNCCE, 2019)

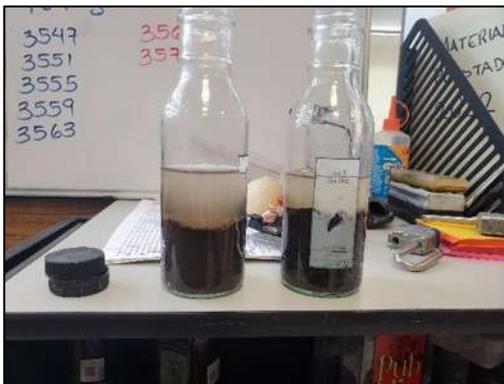


Figura 37.- Frasco con la arena y la solución de sosa caustica. (Contreras, 2023)



Figura 38.- Comparación del color del líquido de la botella con la solución normalizada. (Contreras, 2023)

Resultados:

Los resultados obtenidos en esta prueba fueron de dos muestras representativas de la arena y se observa que el color obtenido por las muestras de arena, es más claro que el de la solución normal, es decir, que la arena no contiene materia orgánica en exceso la cual pudiera ser dañina para las mezclas de concreto que se vayan a elaborar con ella.

5.1.1.9. Sedimentación en arenas

El objetivo de esta prueba es determinar el contenido de material fino que presenta una arena para definir si se acepta o no para la elaboración de concreto hidráulico.

Equipo:

- Un frasco de vidrio con tres marcas, la primera a los 414 ml, la segunda a los 444 ml y la tercera a los 828 ml.



- Una muestra representativa de arena seca de 1 kilogramo aproximadamente.

Procedimiento:

1. Se toma una muestra de arena de 300 gramos aproximadamente.
2. La muestra de arena se introduce en el frasco hasta la marca de 414 ml, posteriormente se coloca agua hasta la marca de 828 ml. Ver gura 39.
3. Se tapa el frasco y se procede a agitarlo hasta que todo el material fino quede en suspensión en el agua durante dos minutos.
4. Se deja reposar el material durante 24 horas para así determinar si el material fino rebasa o no la marca de 444 ml. Ver figura 40.

Si el nivel del material fino rebasa la marca de 444 ml, se reporta que el material tiene exceso de finos.

Si el nivel del material fino no rebasa la marca de 444 ml, se reporta que el contenido de material fino es aceptable.



Figura 39.- Arena en la marca de los 414 ml y el agua en la marca de 828 ml. (Contreras, 2023)



Figura 40.- Después de 24 horas se observa si el material fino rebasa o no la marca de 444 ml. (Contreras, 2023)

Resultados:

Los resultados obtenidos en esta prueba fueron de dos muestras representativas de la arena de las cuales se obtuvo que el material fino para ambas muestras no rebasa la marca de 444 ml, es decir, que el contenido de material fino de la arena es aceptable.



5.1.1.10. Reporte del agregado fino

De acuerdo a los resultados obtenidos es todas las pruebas realizadas en la caracterización de la arena, se puede llegar a la conclusión de que es apta para su uso en concreto, ya que presento buenos resultado y cumplió con prácticamente todo lo especificado dentro de las normas del ONNCCE, a continuación, en la siguiente tabla se observa un resumen de los resultados obtenidos, así como lo especificado en la norma para cada una de las pruebas.

Tabla 12.- Resumen de las características físicas del agregado fino.

PRUEBA DE CALIDAD	VALOR OBTENIDO	ESPECIFICACIÓN
MVSS (kg/m ³)	1356.77	-
MVSC (kg/m ³)	1481.21	-
Absorción (%)	4.99	-
Densidad (g/cm ³)	2.35	-
M.F.	3.19	2.3 a 3.1
Colorimetría	Más claro	Más claro que la solución normalizada
Sedimentación	Aceptable	-

5.1.2. Agregado grueso (grava)

El agregado grueso es el material comúnmente conocido como grava, se les denomina grava a los depósitos sedimentarios formado por granos de tamaño comprendido entre 2 y 64 milímetros.

5.1.2.1. Obtención de la muestra

El agregado grueso empleado en la dosificación de las mezclas de concreto se obtuvo del banco de material "La Roka". Dicho banco se encuentra situado junto a la carretera Morelia-Guadalajara, pasando por la localidad de Cuto del Porvenir, en el municipio de Tarímbaro, Michoacán. El material extraído es de naturaleza basáltica y ha sido sometido a un proceso de trituración. El material se encuentra un depósito en donde se acumula y es aquí donde se realiza la obtención de la muestra que se llevará al laboratorio.



Figura 42.- Banco de material “La Roka”. (Google Earth, 2022)



Figura 41.- Material almacenado de grava del banco de material “La Roka”. (Contreras, 2023)

5.1.2.2. Cuarteo de agregados gruesos

El objetivo de esta prueba es obtener una muestra representativa del material que se obtuvo de campo y del tamaño adecuado para realizar las pruebas correspondientes al material de estudio. Dicha prueba se realizó en base al procedimiento y las especificaciones de la norma mexicana NMX-C-170-ONNCCE-2019.

Equipo:

- Palas.
- Charolas.
- Cuarteador de muestras.



- Cucharones.

Procedimiento:

1. Como ya se describió anteriormente en cuarteo para arenas, sabemos que hay tres procedimientos para realizar el cuarteo, pero los únicos que aplican para el agregado grueso son:
 - a) Cuarteo por paleado o manual. Ver figura 43.
 - b) Cuarteo por divisor de muestras. Ver figura 44.

Aplicando ambos métodos para este material.



Figura 44.- Cuarteo manual por paleado.
(Contreras, 2023)



Figura 43.- Cuarteo por el divisor de muestras.
(Contreras, 2023)

5.1.2.3. Masa volumétrica seca y suelta

El objetivo de esta prueba es determinar la masa por unidad de volumen, siendo el volumen el ocupado por el material en el recipiente cuando su acomodo es en estado natural seco y suelto. Dicha prueba se realizó en base al procedimiento y las especificaciones de la norma mexicana NMX-C-073-ONNCCE-2004.

Equipo:

- Muestra representativa de grava de 20 kg aproximadamente.
- Recipiente de 10 litros de masa conocida.
- Báscula.
- Cucharón.
- Pala.



Procedimiento:

Para la elección del recipiente que se usará para la prueba, se debe elegir de acuerdo al tamaño máximo nominal del agregado, como se observa en la tabla 4.

Como la grava tiene un tamaño máximo nominal entre 3/4" (19 mm) y 1" (25.4 mm), y de acuerdo a esto, se eligió un recipiente con capacidad de 10 litros para realizar la prueba.

1. Se debe colocar el material seco en una superficie lisa y limpia, para proceder a realizar el cuarteo del mismo mediante el método de paleado y después colocar el recipiente de 10 litros en el centro de la muestra, para facilitar su llenado.
2. Se realiza el llenado del recipiente con ayuda del cucharón desde una altura aproximada de 5 cm, cuidando que las partículas caigan en forma natural, este proceso se realiza sin aplicar vibraciones al recipiente, hasta que el material llene por completo el recipiente formando una forma cónica, posteriormente se nivela la superficie del material con la mano y se procede a pesar el recipiente junto con el material. Ver figura 45 y 46.



Figura 46.- Recipiente lleno y enrasado con la mano. (Contreras, 2023)



Figura 45.- Masa del recipiente más el peso del material. (Contreras, 2023)

Cálculos:

$$MVSS = \frac{\text{Masa de la grava (g)}}{\text{Volumen de la grava (cm}^3\text{)}}$$

Donde:

MVSS = Masa volumétrica seca y suelta (g/cm³).



Resultados:

Los resultados obtenidos en esta prueba fueron de tres muestras representativas de grava de las cuales se obtuvo un promedio, dichos resultados se observan a continuación.

Tabla 13.- Resultados para Masa volumétrica seca y suelta de la grava.

MVSS GRAVA						
MUESTRA	MASA DEL RECIPIENTE + ARENA (g)	MASA DEL RECIPIENTE (g)	MASA DE LA ARENA (g)	VOLUMEN DEL RECIPIENTE (cm3)	MVSS (kg/m3)	PROMEDIO
1	18345	2930	15415	10600	1454.25	1453.14
2	18325	2930	15395	10600	1452.36	
3	18330	2930	15400	10600	1452.83	

5.1.2.3. Masa volumétrica seca y compactada

El objetivo de esta prueba es determinar la masa por unidad de volumen de la grava, siendo el volumen el ocupado por el material en el recipiente, cuando es sometido a cierto grado de compactación con la varilla. Dicha prueba se realizó de acuerdo al procedimiento y las especificaciones de la norma mexicana NMX-C-073-ONNCCE-2004.

Equipo:

- Muestra representativa de grava 20 kg aproximadamente.
- Recipiente de 10 litros y de masa conocida.
- Báscula.
- Cucharón.
- Pala.
- Varilla punta de bala de 5/8” de diámetro.

Procedimiento:

1. Se debe colocar el material seco en una superficie lisa y limpia, para proceder a realizar el cuarteo del mismo y después colocar el recipiente de 10 litros en el centro de la muestra, de la misma forma que la prueba de MVSS.
2. Se procede a llenar el recipiente con ayuda del cucharón en tres capas de aproximadamente el mismo espesor.



3. En cada capa con la varilla punta de bala se le dan 25 golpes distribuyéndolos en toda su superficie, una vez lleno el recipiente, se enrasa. Posteriormente se determina la masa del recipiente con el material. Ver figura 47 y 48.



Figura 47.- Compactado del material con la varilla punta de bala. (Contreras, 2023)



Figura 48.- Masa del recipiente más el peso del material compactado. (Contreras, 2023)

Cálculos:

$$MVSC = \frac{\text{Masa de la grava compactada (g)}}{\text{Volumen de la grava (cm}^3\text{)}}$$

Donde:

MVSC = Masa volumétrica seca y compactada (g/cm³).

Resultados:

Los resultados obtenidos en esta prueba fueron de tres muestras representativas de grava de las cuales se obtuvo un promedio, dichos resultados se observan a continuación.

Tabla 14.- Resultado para la Masa volumétrica seca y compactada de la grava.

MVSV GRAVA						
MUESTRA	MASA DEL RECIPIENTE + ARENA (g)	MASA DEL RECIPIENTE (g)	MASA DE LA ARENA (g)	VOLUMEN DEL RECIPIENTE (cm3)	MVSS (kg/m3)	PROMEDIO
1	19300	2930	16370	10600	1544.34	1546.54
2	19340	2930	16410	10600	1548.11	
3	19330	2930	16400	10600	1547.17	



5.1.2.4. Humedad de absorción en gravas

El propósito de esta prueba consiste en calcular la absorción máxima de una grava al sumergirla en agua a temperatura ambiente durante un período de 24 horas. El resultado se expresa como un porcentaje en relación a su masa en estado seco. Dicha prueba se realizó en base al procedimiento y las especificaciones de la norma mexicana NMX-C-164-ONNCCE-2014.

Equipo:

- Muestra representativa de grava.
- Franela o lienzo absorbente.
- Charolas metálicas.
- Parrilla eléctrica.
- Espátula y Vidrio.
- Báscula.

Procedimiento:

El tamaño de la muestra a utilizar se elige de la siguiente tabla 15, el cual se elige en base al tamaño máximo nominal del agregado. Dicha muestra será utilizada para la presente prueba y posteriormente para la prueba de densidad en gravas.

Tabla 15.- Tamaño mínimo de la muestra a utilizar. (NMX-C-164-ONNCCE, 2014)

Tamaño máximo nominal del agregado (mm)	Masa mínima de la muestra a utilizar en el ensayo (kg)
Hasta de 13	2
13-20	3
20-25	4
25-40	5
40-50	8
50-64	12

1. La muestra de grava debe ser cribada por las mallas 3/4 y 3/8, del material que pasa la 3/4 y el material retenido en la malla de 3/8 se pone a saturar en una charola una muestra de 3 kilogramos durante un tiempo de 24 horas. Ver figura 49.
2. Transcurridas las 24 horas se procede a secar superficialmente aproximadamente 300 gramos de grava, registrándolo como masa saturada y superficialmente seca (M_{ss}). Ver figura 50.
3. Se coloca la muestra de grava en la parrilla de gas hasta que se encuentre completamente seca, para corroborar que la muestra efectivamente esta seca se coloca el vidrio en el material y si no se empaña, se retira el material de la parrilla de gas y se procede a obtener su masa, registrándola como masa seca (M_s). Ver figura 51 y 52.



Figura 49.- Muestra de grava saturada en agua durante 24 horas. (Contreras, 2023)



Figura 50.- Masa del material saturado y superficialmente seco. (Contreras, 2023)



Figura 51.- Secado del material en la parrilla eléctrica. (Contreras, 2023)



Figura 52.- Masa del material completamente seco. (Contreras, 2023)



Cálculos:

$$\% H. Abs. = \frac{M_{sss} - M_s}{M_s} * 100$$

Donde:

% H. Abs. = Porcentaje de absorción del material.

M_{sss} = Masa saturada y superficialmente seca del material (g).

M_s = Masa seca del material (g).

De acuerdo al reglamento de construcción del estado de Michoacán, se puede clasificar a la cantidad de absorción que presenta el material, la cual puede ser desde baja hasta alta absorción, como se observa en la siguiente tabla 16.

Tabla 16.- Tipos de absorción. (Colegio de Ingenieros Civiles de Michoacán, 1999)

Tipo de absorción	Por ciento de absorción
Baja	Menos del 2%
Media	Entre 2 y 4%
Alta	Más del 4%

Resultados:

Los resultados obtenidos en esta prueba fueron de tres muestras representativas de grava de las cuales se obtuvo un promedio, dichos resultados se observan a continuación.

Tabla 17.- Resultados para la absorción de la grava.

ABSORCIÓN GRAVA			
MUESTRA	1	2	3
M_{sss}	302	301	302
M_s	295	294	295
% H. Abs.	2.37	2.38	2.37
Promedio	2.38		



5.1.2.5. Densidad en gravas

El propósito de esta prueba es calcular la relación entre la masa del agregado y su volumen unitario, teniendo en cuenta la masa de las partículas que están completamente saturadas de agua y superficialmente secas. Dicha prueba se realizó en base al procedimiento y las especificaciones de la norma mexicana NMX-C-164-ONNCCE-2014.

Equipo:

- Muestra representativa de grava.
- Probeta.
- Vaso de precipitado.
- Picnómetro tipo sifón.
- Franela.
- Charola.

Procedimiento:

1. De la muestra que se dejó saturando en la prueba de humedad de absorción en gravas, la cual se cribó por las mallas de 3/4" y 3/8" y se dejó saturando por 24 horas, se toma una muestra de aproximadamente 300 g seca superficialmente con una franela y se procede a pesarse, registrándolo como masa inicial (M).
2. Primero, se llena el picnómetro con agua hasta el nivel del orificio y se coloca sobre una superficie plana, posteriormente se introduce la muestra de grava en el picnómetro, permitiendo que el agua desalojada fluya hacia una probeta graduada. Una vez finalizada la introducción del material, se espera a que toda el agua haya escurrido por completo del picnómetro y el volumen del agua escurrida representa el volumen ocupado por las partículas de grava (V). Ver figura 53 y 54.



Figura 53.- Introduciendo el material dentro del picnómetro. (Contreras, 2023)



Figura 54.- Agua desalojada por el picnómetro. (Contreras, 2023)

Cálculos:

$$D = \frac{M}{V}$$

Donde:

D = Densidad (g/cm³).

M = Masa de la grava (g).

V = Volumen de la grava (cm³).

Resultados:

Los resultados obtenidos en esta prueba fueron de dos muestras representativas de grava de las cuales se obtuvo un promedio, dichos resultados se observan a continuación.

Tabla 18.- Resultados para la densidad de la grava.

DENSIDAD GRAVA		
MUESTRA	1	2
M	300.5	301
V	110	110
D	2.73	2.74
Promedio	2.73	

5.1.2.6. Análisis granulométrico

El propósito de esta prueba es determinar la distribución de las partículas de diferentes tamaños presentes en la grava utilizando tamices, así como también identificar el tamaño máximo (T.M.) de la grava. Este valor es importante para el cálculo adecuado de las proporciones en las mezclas de concreto. Dicha prueba se realizó en base al procedimiento y las especificaciones de la norma mexicana NMX-C-077-ONNCCE-2019.



Equipo:

- Muestra representativa de grava de 15 kg aproximadamente.
- Malla de diferentes tamaños: 2", 1 1/2", 1", 3/4", 1/2", 3/8" y # 4.
- Charolas metálicas para recibir el material que se retiene en cada una de las mallas.
- Báscula.
- Recipiente de 10 litros.

Procedimiento:

1. Primero, se lleva a cabo la división de la muestra de grava en varias partes mediante el proceso de cuarteo, posteriormente se coloca un recipiente de 10 litros y se llena con una porción de la muestra. La masa de esta muestra utilizada para llenar el recipiente es medida y registrada. Ver figura 55.
2. Después se pasa la muestra de grava por cada una de las mallas, esto se hace agitando cada una de ellas de forma manual, para que de esta forma las partículas vayan pasando o se vayan reteniendo en las mallas según sea el caso.
3. Se pesa el material retenido en cada malla en la báscula, después de que se haya terminado de cribar toda la muestra de grava por las mallas. Ver figura 56.



Figura 55.- Masa de la muestra para la granulometría. (Contreras, 2023)



Figura 56.- Obtención del peso del material retenido en las mallas. (Contreras, 2023)

Cálculos:

$$\% \text{ retenido} = \frac{\text{peso retenido}}{\text{suma del peso retenido}} * 100$$

$$\% \text{ acumulativo de la malla} = \% \text{ retenido malla} + \% \text{ acumulativo malla anterior}$$



$$\% \text{ Que pasa de la malla} = 100 - \% \text{ acumulativo de la malla}$$

De acuerdo a lo especificado en la norma NMX-C-111-ONNCCE-2018, el tamaño máximo nominal de la grava se determina al observar los porcentajes retenidos en cada malla. El tamaño máximo corresponderá a la primera malla que retenga el 10% o más de la masa total de la muestra.

Resultados:

Los resultados obtenidos en esta prueba fueron de dos muestras representativas de grava de las cuales se obtuvo la distribución de tamaños y un T.M. promedio, dichos resultados se observan a continuación.

Tabla 19.- Resultados de la granulometría de la muestra #1 de la grava.

GHRANULOMETRÍA GRAVA			
MUESTRA #1			
Malla	Peso retenido (g)	% Retenido parcial	% Retenido Acumulado
1 1/2"	0	0	0
1"	55	0.36	0.36
3/4"	3960	25.69	26.05
1/2"	4590	29.78	55.82
3/8"	3165	20.53	76.35
No. 4	3285	21.31	97.66
Pasa No.4	360	2.34	100.00
Suma	15415	100	



Tabla 20.- Resultados de la granulometría de la muestra #2 de la grava.

GHRANULOMETRÍA GRAVA			
MUESTRA #2			
Malla	Peso retenido (g)	% Retenido parcial	% Retenido Acumulado
1 1/2"	0	0	0
1"	0	0	0
3/4"	3855	25.04	25.04
1/2"	4645	30.17	55.21
3/8"	3135	20.36	75.58
No. 4	3375	21.92	97.50
Pasa No.4	385	2.50	100.00
Suma	15395	100	

De acuerdo a la tabla 19 y 20, se puede observar que al promediar ambas muestras se obtiene un Tamaño Máximo de $\frac{3}{4}$ de pulgada.

5.1.2.7. Reporte del agregado grueso

De acuerdo a los resultados obtenidos es todas las pruebas realizadas en la caracterización de la grava, se puede llegar a la conclusión de que es apta para su uso en concreto, ya que presento buenos resultados. A continuación, se muestra un resumen de los resultados obtenidos, así como lo especificado en la norma para cada una de las pruebas.

Tabla 21.- Resumen de características físicas del agregado grueso.

PRUEBA DE CALIDAD	VALOR OBTENIDO	ESPECIFICACIÓN
MVSS (kg/m ³)	1453.14	-
MVSC (kg/m ³)	1546.54	-
Absorción (%)	2.38	-
Densidad (g/cm ³)	2.73	-
Módulo de finura	3/4"	-



5.2. Caracterización de los desechos de vidrio

Los desechos de vidrio empleados en la presente investigación se obtuvieron de distintas partes, tales como desechos de vidrierías, desechos de botellas de vino, desechos de botellas de cerveza y desechos de botellas de vidrio variadas. El objetivo de utilizar distintos tipos de desechos de vidrio es el comparar si el color, el grosor o las características del vidrio afecta en las propiedades resultantes del concreto. Los desechos de vidrio van a sustituir parcialmente a los agregados pétreos.



Figura 57.- Desechos de vidrio empleados en la investigación. (Contreras, 2023)

El objetivo principal de utilizar desechos de vidrio para la investigación, se basa en:

1. Obtener un material ecológico a partir de reciclar los desechos de vidrio y por ende el disminuir el consumo de agregados pétreos, los cuales serán sustituidos por el vidrio.
2. Mantener o mejorar las características del concreto, como la resistencia a compresión, tensión, módulo de ruptura, sus propiedades térmicas, etc.

5.2.2. Modalidades a emplear de los desechos de vidrio

Como ya se mencionó con anterioridad los desechos de vidrio se emplearon para sustituir parcialmente al agregado fino y grueso, para la sustitución del agregado fino se utilizó vidrio molido y para el agregado grueso vidrio triturado.

5.2.2.1. Vidrio Molido

Para la obtención del vidrio molido se utilizó la máquina de los Ángeles, la cual funciona dando vueltas con unas esferas de acero en su interior encargadas de la fragmentación del material, dicha máquina normalmente es utilizada para determinar la resistencia a la



fragmentación de los agregados, para el caso de estudio nos ayudó para llevar los desechos de vidrio al tamaño deseado, es decir, similar al agregado fino.



Figura 58.- Máquina de los Ángeles y esferas de acero. (Contreras, 2023)

El procedimiento para obtener el vidrio molido se describe a continuación:

1. Se destapa la máquina de los Ángeles y posteriormente se introducen dentro de ella los distintos tipos de desechos de vidrio a utilizar, la máquina cuenta con 12 esferas de acero, para el caso de estudio se utilizaron únicamente 8 esferas. Ver figura 59.
2. Posteriormente se procede a tapar la máquina con sus 8 tornillos correspondientes, se debe cuidar que quede sellada herméticamente con el fin de que el material pulverizado no salga de la máquina.
3. Se enciende la máquina a una velocidad giratoria de 30 a 33 revoluciones por minuto, durante un lapso de aproximadamente 5 minutos.
4. Una vez pasado el tiempo, nos colocamos la mascarilla de filtro, los guantes y los lentes protectores para proceder a destapar la máquina, se retira el material de la máquina y se deposita en una charola o recipiente. Ver figura 60.
5. Por último, del material que se encuentra en la charola se pasa por la malla #4 para obtener el vidrio molido. Ver figura 61.

Dicho procedimiento se hizo de la misma manera para todos y cada uno de los desechos de vidrio obtenidos.



Figura 59.- Desechos de vidrio dentro de la máquina con las esferas de acero. (Contreras, 2023)



Figura 60.- Producto de la fragmentación de los desechos de vidrio. (Contreras, 2023)



Figura 61.- Material pasado por la Malla #4 para obtener el vidrio molido. (Contreras, 2023)



Figura 62.- Vidrio molido y de tamaño similar al agregado fino. (Contreras, 2023)



5.2.2.2. Vidrio triturado

Para la obtención de este material se realizó exactamente lo mismo que en el vidrio molido, con la única diferencia que el material con el que nos quedamos es con el que se retiene en la malla #4. Cabe destacar que el vidrio triturado los dejamos a un tamaño similar al de la grava, es decir, de aproximadamente $\frac{3}{4}$ de pulgada.



Figura 63.- Vidrio triturado de tamaño similar al agregado grueso.

5.3. Caracterización del cemento

Las características del cemento son de gran importancia en la fabricación, implementación y durabilidad de los productos de concreto en los cuales se utiliza dicho cemento.

El cemento utilizado en la presente investigación fue un cemento marca Tolteca CPC 30R RS, es decir un Cemento Portland Compuesto de clase resistente 30, de resistencia rápida y resistente a los sulfatos, este cemento es ideal en la construcción y elaboración de elementos de concreto expuesto al ataque de sulfatos y a los agregados reactivos que reaccionan con los álcalis de los cementos.



Figura 64.- Bulto de cemento de 50 kg CPC 30R RS, marca Tolteca.



5.3.1. Consistencia normal del cemento

El objetivo de esta prueba es obtener la cantidad de agua necesaria para combinarla con un determinado peso de cemento, para obtener la cantidad de agua necesaria para que el cemento obtenga su consistencia normal. Dicha prueba se realizó en base al procedimiento y las especificaciones de la norma mexicana NMX-C-057-ONNCCE-2015.

Equipo:

- Muestra de cemento.
- Balanza (mecánica o electrónica).
- Probetas graduadas.
- Aparato de Vicat.
- Cronómetro.
- Espátulas.
- Placa de cristal liso.
- Recipiente (de cristal o porcelana).

Procedimiento:

1. Preparación de la pasta de cemento. Se pesan aproximadamente 650 gramos de cemento y se coloca sobre el recipiente de porcelana, se debe formar un cráter al centro del cemento para poder vaciar el agua dentro de él. Posteriormente se calcula el porcentaje de agua con respecto al peso del cemento y se agrega el agua dentro del cráter en un tiempo de 30 segundos, en otros 30 segundos el material de la orilla se empuja hacia dentro el cemento para que así se humedezca y en otros 30 segundos se deja reposar la mezcla para que el material se homogenice.
2. Amasado de la pasta. En 30 segundos se debe mezclar la masa con las manos, golpeando la mezcla hasta lograr una pasta uniforme y homogénea, en otros 30 segundos se forma una bola con las manos y se tirará 6 veces de una mano a otra, manteniéndolas separadas entre sí aproximadamente 15 cm. En los últimos 30 segundos de este paso se debe descansar la bola en la palma de la mano, se introducirá a presión por la boca mayor del anillo del aparato Vicat, el cual se sostendrá con la otra mano, llenando completamente el anillo con pasta mientras la otra boca del anillo



descansa sobre el cristal. El exceso de esta masa, que permanezca en la boca grande, se removerá mediante un movimiento simple con la palma de la mano. Después se colocará el anillo, descansando su base mayor sobre el cristal y se enrasará la boca superior con una pasada de la espátula cuidando de no comprimir la pasta durante dicha operación. Ver figura 65.

3. Determinación de la consistencia. La pasta confinada que descansa sobre la placa de vidrio, debe centrarse debajo de la barra, cuyo extremo que forma el émbolo se pondrá en contacto con la superficie de la pasta, y se apretará el tornillo sujetador. Después se colocará el indicador móvil en cero (todo lo anterior se debe hacer en un tiempo de 30 segundos). Posteriormente se deja caer la aguja sobre la pasta, se dejan pasar 30 segundos y se toma la lectura de penetración del aparato de Vicat. Se considerará que la pasta es de consistencia normal cuando la barra penetre hasta un punto situado 10 ± 1 mm debajo de la superficie original. Si esto no se logra deben hacerse pastas tentativas con distintos porcentajes de agua. Ver figura 66.



Figura 65.- Se enrasa la boca superior del anillo con ayuda de la espátula. (Contreras, 2023)



Figura 66.- Lectura de penetración del aparato de Vicat. (Contreras, 2023)

Resultados:

Tabla 22.- Resultados para consistencia normal del cemento.

CONSISTENCIA NORMAL	
Cantidad de cemento (g)	650
% De agua respecto a la masa del cemento	31
Cantidad de agua (g)	201.5
Penetración aguja de Vicat (mm)	9



5.3.2. Tiempos de fraguado del cemento

El propósito de esta prueba es estimar el tiempo que tarda una muestra humedecida de cemento hidráulico en presentar el fraguado inicial (el momento en el que la mezcla de cemento y agua comienza a perder plasticidad y a solidificarse) y el fraguado final (el momento en el que la mezcla sufre un endurecimiento normal).

Equipo:

- Aparato de Gillmore.
- Balanzas.
- Placa de cristal.

Procedimiento:

1. Con la misma pasta de cemento que se utilizó para la prueba de consistencia normal, se hace una pastilla de poco más o menos 7.5 cm de diámetro y 1.3 cm de espesor constante en la zona central, luego se coloca en un cuarto de condiciones húmedas y se mantiene allí, a excepción de cuando se realizan las mediciones de los tiempos de fraguado.
2. Al realizar las mediciones de los tiempos de fraguado, se recomienda mantener las agujas en posición vertical y hacer un leve contacto con la superficie de la muestra. Se considera que el cemento ha alcanzado su fraguado inicial cuando la muestra pueda soportar la aguja más liviana del aparato de Gillmore sin dejar una marca apreciable. Se considera que el cemento ha alcanzado su fraguado final cuando la pastilla soporte la aguja más pesada, sin que marque huella apreciable. Ver figura 67 y 68.



Figura 67.- Determinación del fraguado inicial con la aguja más ligera del aparato de Gillmore. (Contreras, 2023)



Figura 68.- Determinación del fraguado final con la aguja más pesada del aparato de Gillmore. (Contreras, 2023)

En base a lo especificado en la norma NMX-C-414-ONNCCE-2017, la cual nos dice fraguado inicial debe ocurrir a los 45 minutos como mínimo y el fraguado final debe ser a los 600 minutos máximo.

Resultados:

Tabla 23.- Resultados para tiempos de fraguado del cemento.

TIEMPOS DE FRAGUADO	
Hora de inicio de prueba	09:50
Hora de fraguado inicial	14:11
Tiempo transcurrido para fraguado inicial (min)	261
Hora de fraguado final	15:56
Tiempo transcurrido para fraguado final (Max)	366

5.3.3. Densidad del cemento

El objetivo de esta prueba pretende estimar la densidad que tiene una muestra representativa de cemento. Su principal utilidad está relacionada con el proporcionamiento y control de mezclas de concreto. Dicha prueba se realizó de acuerdo al procedimiento y las especificaciones de la norma mexicana NMX-C-152-ONNCCE-2015.

Equipo:

- Muestra de cemento.



- Frasco de “Le Chatelier”.
- Báscula.
- Queroseno exento de agua, o gasolina o petróleo o cualquier otro líquido que no reaccione con el cemento.
- Recipiente con agua.
- Termómetro.

Procedimiento:

1. Se llena el frasco con alguno de los líquidos especificados, hasta un punto entre las marcas de 0 y un mililitro. Después de verter el líquido, séquese el interior del frasco arriba del nivel del líquido. La primera lectura (L_i) se registrará después de haber sumergido el frasco en agua que este a temperatura constante y más o menos igual a la temperatura donde se realizará la prueba, con el fin de evitar variaciones mayores a 0.2°C y por ende errores en la misma. Ver figura 69 y 70.
2. Se pesan 64 gramos aproximadamente de cemento, posteriormente se toma el frasco verticalmente y se adiciona el cemento de forma lenta, para evitar que el cemento salpique las paredes del frasco y que no se obstruya. Ver figura 71 y 72.
3. Después se tapa el frasco, se inclina y se gira horizontalmente para lograr que todo el aire atrapado salga y toda la muestra de cemento quede dentro del líquido. Posteriormente que vuelve a meter el frasco al recipiente con agua para que la temperatura del líquido y cemento sea constante durante la prueba, por último, se toma la lectura final (L_f) del frasco.



Figura 69.- Muestra de cemento de aproximadamente 64 gramos. (Contreras, 2023)



Figura 70.- Líquido que no reaccione con el cemento. (Contreras, 2023)



Figura 72.- Recipiente con agua, para mantener la temperatura constante durante la prueba. (Contreras, 2023)



Figura 71.- Se introduce el cemento en el frasco para determinar su volumen. (Contreras, 2023)

Resultados:

Tabla 24.- Resultados para densidad del cemento.

DENSIDAD DEL CEMENTO	
Masa del cemento (g)	60
Lectura inicial del líquido (ml)	0.3
Lectura final del líquido (ml)	19.7
Volumen del líquido desplazado (cm ³)	19.4
Densidad (g/cm ³)	3.10

5.4. Diseño de concreto por el método “ACI”

El propósito del método del “ACI” es cuantificar y determinar de forma eficiente la cantidad de agregados finos, gruesos, agua y cemento para cumplir con los parámetros establecidos (manejabilidad, resistencia y dureza) para de esta forma lograr las características deseadas en una mezcla de concreto.

Actualmente se usan mezclas diseñadas cuyas especificaciones existen valores límite respecto a un rango de propiedades que deben cumplirse. Por lo cual, el comité 211 del ACI creó un método que se basa en la elaboración de varias tablas en las cuales se utilizan los datos obtenidos en la caracterización de los materiales para lograr óptimos valores para una mezcla de concreto por metro cúbico.

El método ACI resume el procedimiento en 8 pasos para el diseño de concreto:



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

Para aplicar el método ACI, se requiere conocer las propiedades físicas de los materiales que se utilizarán en la producción de concreto hidráulico, estas características fueron obtenidas previamente y se presentan a continuación.

Tabla 25.- Características físicas de los materiales que conforman al concreto hidráulico.

CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES							
MATERIAL	MVSS (kg/m ³)	MVSV (kg/m ³)	D(gr/cm ³)	MF (adim)	TM (in)	%H. Actual	%H. Absorción
CEMENTO	1490	-----	3.10	-----	-----	-----	-----
ARENA	1357	1481	2.35	3.19	-----	0	5
GRAVA	1453	1546	2.74	-----	3/4	0	2.37

f' c proyecto = 250 kgf/cm²

5.4.1. Elección del revenimiento

Para la elección del revenimiento, el ACI 211.1 recomienda en la siguiente tabla 26, distintos revenimientos de acuerdo al tipo de construcción que se requiera utilizar.

Tabla 26.- Revenimientos recomendados para diversos tipos de construcción. (American Concrete Institute 211.1, 2009)

Tipo de construcción	Revenimiento en centímetros	
	Máximo*	Mínimo
Muros de cimentación y zapatas.	7.5	2.5
Zapatas, cajones de cimentación y muros de Sub-estructura sencillos.	7.5	2.5



Vigas y muros reforzados.	10	2.5
Columnas para edificios.	10	2.5
Pavimentos y losas.	7.5	2.5
Concreto masivo.	7.5	2.5

De acuerdo a la tabla 25, se tomó un revenimiento de diseño de 10 cm para su uso en vigas, muros y columnas.

5.4.2. Elección del tamaño máximo del agregado

El tamaño máximo de agregado se obtiene mediante el análisis granulométrico de la grava y según la norma mexicana NMX-C-155-ONNCCE-2014, es la dimensión de la criba de menor abertura por la que pasa el material de la muestra con un retenido máximo del 10 % en dicha criba.

En ningún caso el tamaño máximo debe exceder de:

- 1/5 de la menor dimensión entre los costados de los moldes.
- 1/3 del espesor de las losas.
- 3/4 del espacio libre mínimo entre varillas de refuerzo individuales, paquetes de varillas o torones de pretensado.

Para el caso de estudio el tamaño máximo del agregado grueso es de $\frac{3}{4}$ de pulgada.

5.4.3. Cálculo del agua de mezclado y contenido de aire

En la tabla 27 obtenida del ACI 211.1, proporciona la cantidad de agua y el y el porcentaje de aire atrapado, en función de las siguientes variables:

- **Tipo de concreto**
 - Sin aire incluido.
 - Con aire incluido, el cual depende si el nivel de exposición es ligero, moderado o severo.
- **Revenimiento.**
 - De 2.5 a 5 centímetros.



- De 7.5 a 10 centímetros.
- De 15 a 17.5 centímetros.
- **Tamaño máximo nominal del agregado.**
 - Para 3/8”, 1/2”, 3/4”, 1”, 1 1/2”, 2”, 3” y 6”

Tabla 27.- Requisitos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes revenimientos y tamaños máximos nominales recomendados. (American Concrete Institute 211.1, 2009)

	Agua, kg. / m ³ de Concreto para los tamaños máximos nominales de agregado indicados							
Tamaños máximos nominales de agregado, en (mm).	3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/2"	2"	3"	6"
		9.5	12.5	19	25	38	50	75
Revenimiento en centímetros	Concreto sin aire incluido							
De 2.5 a 5	207	199	190	179	160	154	130	113
De 7.5 a 10	228	216	205	193	175	169	145	124
De 15 a 17.5	243	228	216	202	185	178	160	---
Cantidad aproximada de aire atrapado en concreto sin inclusión de aire, expresado como un porcentaje.	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2
Promedio recomendado de contenido de aire total, según el nivel de exposición (%)	Concreto con aire incluido							
Exposición ligera	4.5	4	3.5	3	2.5	2	1.5	1
Exposición moderada	6	5.5	5	4.5	4.5	4	3.5	3
Exposición severa	7.5	7	6	6	5.5	5	4.5	4

El concreto de esta investigación se diseñó sin aire incluido, para un revenimiento de 10 cm y un tamaño máximo del agregado grueso ¾ de pulgada, y en base a eso, la cantidad de agua a utilizar es de 205 litros/m³ y 2% de aire atrapado.

5.4.4. Selección de la relación agua/cemento

En la tabla 28 obtenida del ACI 211.1, proporciona distintos valores para la relación A/C, en base a la resistencia a la compresión a los 28 días y si tiene o no aire incluido.



Tabla 28.- Dependencia entre la relación agua/cemento y la resistencia a compresión del concreto.
(Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004)

Esfuerzo a compresión a 28 días, kgf/cm ²	Relación agua/cemento, por peso	
	Concreto sin aire incluido	Concreto con aire incluido
450	0.38	0.31
400	0.43	0.34
350	0.48	0.40
300	0.55	0.46
250	0.62	0.53
200	0.70	0.61
150	0.80	0.72

“Nota: La resistencia se basa en cilindros de 15x30 cm, curados con humedad a los 28 días, a 23 + 1.7°C, de acuerdo con la norma ASTM C31 y La relación supone un tamaño máximo de agregado de ¾ a 1”. Adaptada del ACI 211.1 y del ACI 211.3”.

Para nuestro caso tenemos un concreto sin aire incluido y con una resistencia de proyecto de 250 kg/cm², por lo tanto, la relación agua cemento es igual a 0.62.

5.4.5. Cálculo del contenido de cemento

El cemento requerido es igual al contenido correspondiente de agua de mezclado dividido entre la relación Agua/Cemento, por lo tanto, la cantidad del contenido de cemento se obtiene con la siguiente formula:

$$C = A/(A/C)$$

Dónde: C = Cantidad de cemento por m³ de concreto.

A = Cantidad de agua por m³ de concreto, en kg/m³.

A/C = Relación agua/cemento.

$$C = \frac{205 \text{ kg/m}^3}{0.62}$$

$$\text{Masa del cemento} = 330.645 \text{ kg/m}^3$$



5.4.6. Estimación del contenido de agregado grueso

En la tabla 29 obtenida del ACI 211.1, se muestra el volumen de agregado en m³, con base a la masa volumétrica seca y varillada (MVSV), para un m³ de concreto. Este volumen se convierte a peso seco del agregado grueso requerido en un m³ de concreto, multiplicándolo por la masa volumétrica seca y varillada por m³ de agregado grueso.

El contenido de agregado grueso se obtiene con la siguiente formula:

$$G = VAG * MVSV$$

Dónde: **G** = Masa del agregado grueso (grava), por m³ de concreto.

VAG = Volumen de agregado grueso varillado, en m³ obtenido de la tabla 29.

MVSV = Masa volumétrica seca y varillada, en kg/m³.

Tabla 29.- Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto para diferentes módulos de finura del agregado fino (arena). (American Concrete Institute 211.1, 2009)

Tamaño máximo del Agregado (mm)	Volumen de agregado grueso varillado en seco, por volumen unitario de concreto para diferentes módulos de finura de la arena.				
	2.40	2.60	2.80	3.00	3.20
9.5 (3/8")	0.50	0.48	0.46	0.44	0.42
12..5 (1/2")	0.59	0.57	0.55	0.53	0.51
19 (3/4")	0.66	0.64	0.62	0.60	0.58
25(1")	0.71	0.69	0.67	0.65	0.63
37.5(1 ½ ")	0.75	0.73	0.71	0.69	0.67
50(2")	0.78	0.76	0.74	0.72	0.70
75(3")	0.82	0.80	0.78	0.76	0.74
150(6")	0.87	0.85	0.83	0.81	0.79

Para la obtención del volumen de agregado grueso varillado, se debe interpolar los valores del módulo de finura del agregado fino, el cual se encuentra entre 3.00 y 3.20, para un módulo de finura de 3.19, resultando lo siguiente:

$$VAG = \frac{(0.58 - 0.60)(3.19 - 3.00)}{(3.20 - 3.00)} + 0.60$$

$$VAG = 0.581$$



$$\text{Masa de la grava} = 0.581 \times 1546 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Masa de la grava} = 898.226 \text{ kg/m}^3$$

5.4.7. Estimación del contenido del agregado fino

Para calcular la cantidad requerida de agregados finos para un m^3 de concreto, implica el empleo de volúmenes ocupados por los componentes. En este caso, el volumen total ocupado por los componentes (el agua, aire, cemento y agregado grueso), se resta del volumen unitario del concreto para obtener el volumen requerido de agregado fino.

El volumen ocupado por cualquier componente en el concreto, es igual a su peso dividido entre la densidad de ese material. La cantidad de agregado fino (arena), se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Volumen de agua (VA), en L/m}^3 = 205$$

$$\text{Volumen de cemento (VC), en L/m}^3 = \text{Masa del cemento} / \text{Densidad del cemento}$$

$$\text{Volumen de grava (VG), en L/m}^3 = \text{Masa de la grava} / \text{Densidad de la grava}$$

$$\text{Volumen de aire atrapado (VAA), en L/m}^3 = \text{Cantidad de aire atrapado} * 1000$$

$$\text{Volumen de arena (VAF), en L/m}^3 = 1000 - (\text{VA} + \text{VC} + \text{VG} + \text{VAA})$$

$$\text{Masa requerida de arena (Ar)} = \text{VAF} * \text{Densidad de la arena}$$

Entonces de acuerdo a lo anterior, se tiene lo siguiente:

$$VC = \frac{330.645}{3.10} = 106.66 \text{ L/m}^3$$

$$VG = \frac{898.226}{2.74} = 327.82 \text{ L/m}^3$$

$$VAA = 0.02 * 1000 = 20 \text{ L/m}^3$$

$$VAF = 1000 - (205 + 106.66 + 327.82 + 20) = 340.52 \text{ L/m}^3$$

$$Ar = 340.52 * 2.35 = 800.223 \text{ kg/m}^3$$

A continuación, se muestran las cantidades de material necesario para un metro cúbico de concreto.



Tabla 30.- Resumen de cantidades necesarias de material para un m³ de concreto.

Materiales	Volumen (litro/m³)	Masa total (kg/m³)
Cemento	106.66	330.645
Arena	340.52	800.223
Grava	327.82	898.226
Agua	205	205
Aire	20	-
Suma	1000	2234.094

5.4.8. Ajustes por humedad de absorción del agregado

Antes de usarse el material para la mezcla de concreto, se debe checar el porcentaje de humedad que tiene en ese momento, es decir, la humedad actual y también se debe analizar el porcentaje de agua que puede absorber dichos materiales, para posteriormente realizar la corrección por humedad. En este caso nuestra humedad actual es igual a 0, esto debido a que el material se secó en el sol antes de usarlo para la mezcla de concreto.

El cálculo del agua corregida se hace de la siguiente manera:

$$\text{Masa del agua corregida} = \text{Masa total del agua} + \sum(\text{Masa del agregado} * \% \text{ absorción})$$

$$\text{Masa del agua corregida} = 205 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} + [(800.223 \text{ kg/m}^3 * 0.05) + (898.226 \text{ kg/m}^3 * 0.0237)]$$

$$\text{Masa del agua corregida} = 266.299 \text{ kg/m}^3$$

Entonces las cantidades de materiales ya corregidos para un metro cúbico de concreto quedan de la siguiente manera:

Tabla 31.- Cantidades corregidas necesarias para un m³ de concreto.

Materiales	Masa total (kg/m³)
Cemento	330.645
Arena	800.223
Grava	898.226
Agua	266.299
Suma	2295.394



5.5. Análisis del ciclo de vida (ACV)

El análisis del ciclo de vida se realizará para comparar los potenciales impactos ambientales del concreto en estudio, es decir, un concreto ecológico elaborado a partir de desechos de vidrio respecto a un concreto tradicional.

5.5.1. Definición de objetivo del ACV

El concreto ecológico, se muestra como una variante viable que puede permitir a las organizaciones adoptar medidas ambientalmente adecuadas con su implementación. Sin embargo, los resultados que se obtengan, tras el desarrollo de esta investigación, son los que permitirán esclarecer cualquier duda que se interponga en la toma de decisiones importantes en relación a los materiales de construcción utilizados. El concreto ecológico de este estudio se formará sustituyendo parcialmente los agregados finos y gruesos por residuos de vidrio.

El objetivo principal del ACV es analizar y comparar los potenciales impactos ambientales derivados de los materiales utilizados en dos tipos de concreto A) concreto convencional y B) Concreto ecológico (propuesta), la finalidad del análisis es definir si los impactos ambientales significativos generados por el concreto (B) son menores al concreto (A) y así poder ser actor en la toma de decisiones al momento de elegir el tipo de material que pueden utilizar las empresas de construcción. Los resultados obtenidos en el estudio serán presentados a la comunidad científica y empresas interesadas.

5.5.2. Alcance del análisis del ciclo de vida

5.5.2.1. Unidad funcional y flujo de referencia

Se ha definido como unidad funcional elaborar y utilizar de manera adecuada y sustentable el concreto ecológico a base de desechos de vidrio, el beneficio deberá ser probado mediante una serie de comparaciones que aseguren su ventaja ambiental sobre el concreto tradicional y que mantenga las características de diseño. El flujo de referencia comprende analizar una tonelada de concreto ecológico y una tonelada de concreto convencional, con una resistencia de diseño a 28 días de 250 kg/cm² para ambos casos.



5.5.2.2. Límites del sistema

La presente investigación analiza y compara dos sistemas productos, A) concreto convencional y B) concreto ecológico (propuesta).

De las fases tradicionales del ACV este tiene un enfoque de la cuna a la puerta, iniciando con el proceso unitario de obtención de materias primas, dejando de lado el proceso de extracción.

Para este proyecto y de acuerdo a lo especificado en las normas ISO, por tratarse de un estudio que básicamente se centra en un sistema compuesto por la elaboración de concreto ya sea ecológico o tradicional y que va desde la obtención de las materias primas hasta la producción misma del concreto, se definirá como un sistema de CUNA A PUERTA. Para ambos casos de estudio, se trabajará con el mismo cemento, agregados pétreos (arena y grava) del mismo banco de material, agua potable y para la misma resistencia, con la diferencia que para el concreto ecológico se utilizará desechos de vidrio triturado y vidrio molido en sustitución parcial del agregado grueso y fino respectivamente.

5.5.2.3. Criterios de cohorte y asignación para cada escenario

- **Escenario de creación de concreto tradicional**

Para este escenario se ha considerado la creación de una tonelada de concreto tradicional, es decir, un concreto solo a base de agregados pétreos, cemento y agua, el cual tendrá una resistencia a los 28 días de 250 kg/cm². Se modelará el impacto ambiental de:

- El transporte de los materiales necesarios para elaborar dicha tonelada de concreto, los cuales son 348 kg de arena, 390 kg de grava y 144 kg de cemento. Los vehículos empleados utilizan como combustible Diésel, para el caso de la arena y la grava el vehículo tiene una capacidad total de 7 m³, mientras que el vehículo que transporta el cemento tiene una capacidad de carga de 28 toneladas. La ruta de transporte de la arena considera solo la distancia comprendida directamente del banco de material “Joyitas” hasta la planta de concreto y la grava desde el banco de material “La Roka” hasta la planta de concreto; y la del cemento comprende desde Cemex México Planta Tláhuac hasta la planta de concreto.



“CONCRETO ECOLÓGICO ELABORADO A PARTIR DE DESECHOS DE VIDRIO COMO SUSTITUTO PARCIAL DE LOS AGREGADOS FINOS Y GRUESOS”



- La manufactura del concreto, la cual consta de varias etapas: la caracterización y preparación de los materiales, la mezcla de los materiales para obtener concreto y el llenado de los camiones trompo con la tonelada de concreto. Se evaluará el impacto ambiental de todas las herramientas y máquinas utilizadas en este proceso, dichas herramientas y máquinas funcionan a base de gas LP, Diésel y energía eléctrica; para la creación de este concreto se utilizaron 116 litros de agua.
- Transporte y entrega de la tonelada de concreto tradicional. El vehículo empleado utiliza como combustible Diésel y tiene como capacidad 4 m³. La ruta de transporte considera la distancia desde la planta de concreto Premix, Morelia hasta la UMSNH, donde se hará la entrega del producto.

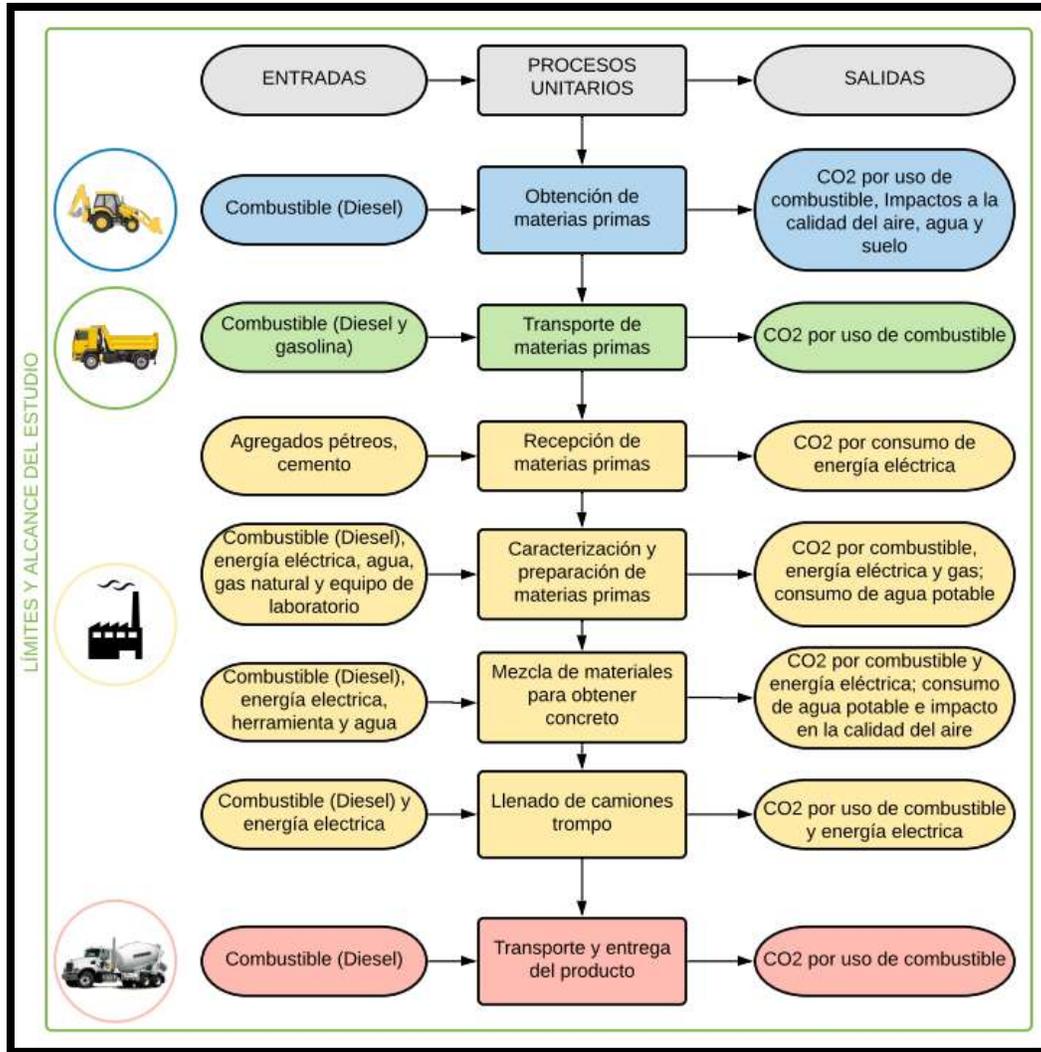


Figura 73.- Diagrama de procesos unitarios del concreto tradicional.

- **Escenario de creación del concreto ecológico**

Para este escenario se ha considerado la creación de una tonelada de concreto ecológico, el cual utilizará residuos de vidrio como sustituto parcial de los agregados pétreos, de igual manera para una resistencia de 250 kg/cm^2 , la cantidad de vidrio considerada en este escenario es el necesario para sustituir el 15% de arena y el 15% de grava. Este escenario surge como propuesta alternativa para recuperar material inerte considerado residuo como lo es el vidrio y de esta forma poder reducir la cantidad de impactos ambientales y así brindarles una segunda vida a los residuos de vidrio. Se modelará el impacto ambiental de:

- El transporte de los materiales necesarios para elaborar dicha tonelada de concreto ecológico, los cuales son 296 kg de arena, 332 kg de grava, 111 kg de residuos de



“CONCRETO ECOLÓGICO ELABORADO A PARTIR DE DESECHOS DE VIDRIO COMO SUSTITUTO PARCIAL DE LOS AGREGADOS FINOS Y GRUESOS”



vidrio y 144 kg de cemento. Los vehículos empleados utilizan como combustible Diésel, para el caso de la arena y la grava el vehículo tiene como capacidad total de 7 m³, para el vidrio se utilizará una camioneta a gasolina con capacidad de 650 kg y el que transporta el cemento tiene una capacidad de 28 toneladas. La ruta de transporte de la arena y la grava considera solo la distancia comprendida directamente del banco de material “Joyitas” hasta la planta de concreto; para los residuos de vidrio la distancia es desde el km 5.5 salida Salamanca hasta la planta de concreto y la del cemento comprende desde Cemex México Planta Tláhuac hasta la planta de concreto.

- La manufactura del concreto, la cual consta de varias etapas: la caracterización y preparación de los materiales, la mezcla de los materiales para obtener concreto y el llenado de los camiones trompo con la tonelada de concreto. Se evaluará el impacto ambiental de todas las herramientas y máquinas utilizadas en este proceso, dichas herramientas y máquinas funcionan a base de gas LP, Diésel y energía eléctrica; para la creación de este concreto se utilizaron 116 litros de agua.
- Transporte y entrega de la tonelada de concreto ecológico. El vehículo empleado utiliza como combustible Diésel y tiene como capacidad 4 m³. La ruta de transporte considera la distancia desde la planta de concreto Premix, Morelia hasta la UMSNH, donde se hará la entrega del producto.

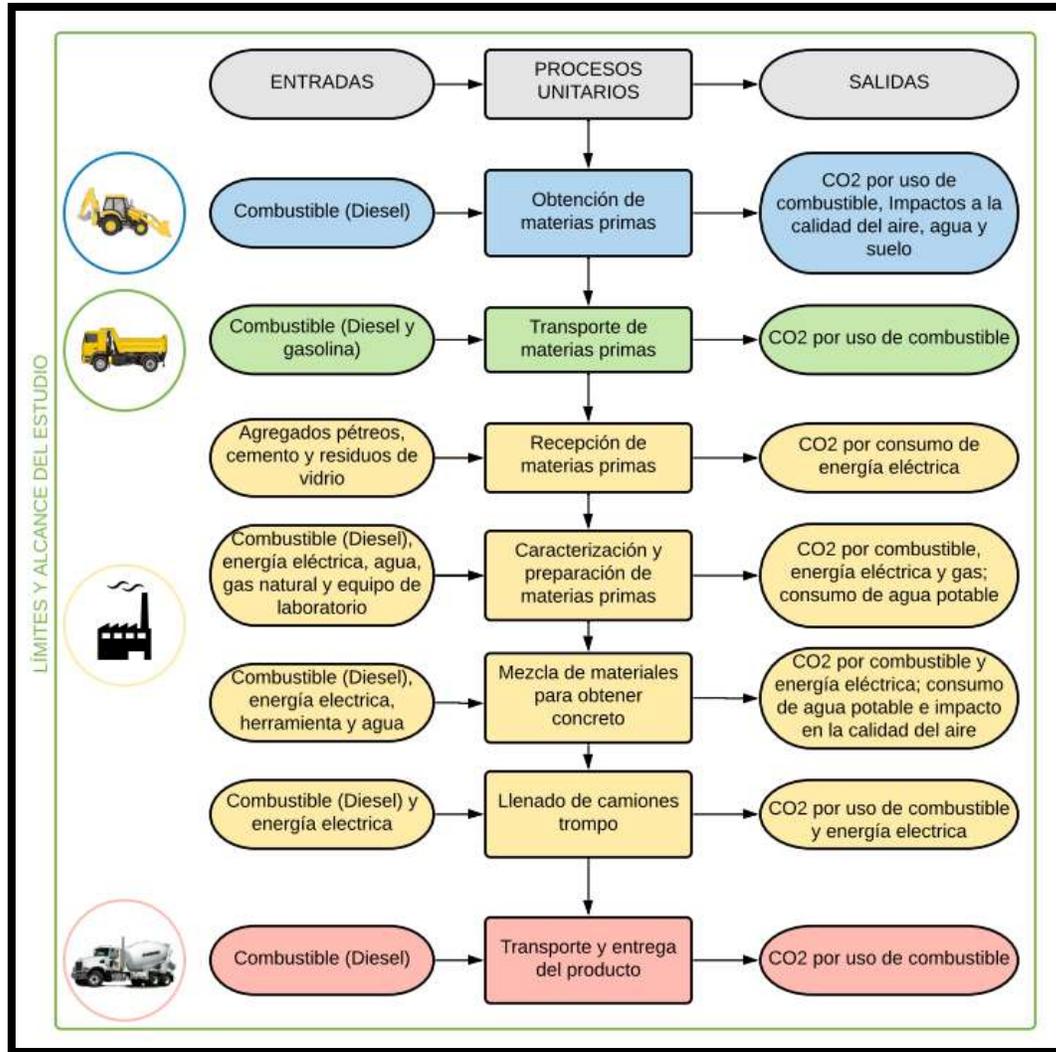


Figura 74.- Diagrama de procesos unitarios del concreto tradicional. (Contreras, 2023)

5.5.3. Inventario de ciclo de vida (ICV)

Para la obtención de los datos del inventario de ciclo de vida se tomó en cuenta los procesos desde la obtención de las materias primas hasta el transporte y entrega del producto final. A continuación, se muestra las fuentes de donde se obtuvieron los datos para la construcción del ICV.

Tabla 32.- Fuentes de obtención de datos para construir el ACV.

<u>Proceso unitario</u>	<u>Tipo de datos</u>	<u>Dato</u>	<u>Fuente</u>
Obtención de materias primas	Materiales de elaboración	Calculado	American Concrete Institute 318
Transporte de Materias primas	Vehículo de transporte Capacidad de carga	Investigado	Ficha técnica de proveedor



tkm	Cantidad y distancia recorrida	Calculado	https://www.google.com.mx/maps
Manufactura del concreto	Cantidad de materiales	Investigado y calculado	Normas Mexicanas ONNCCE Ficha técnica de proveedor
Trasporte y entrega del producto	Vehículo de transporte Capacidad de carga	Investigado	Ficha técnica de proveedor
tkm	Cantidad y distancia recorrida	Calculado	https://www.google.com.mx/maps

Todos los datos recabados en el ICV serán capturados en el software “Simapro”, el cual es un software analítico utilizado para medir la huella ambiental de productos y servicios de una manera objetiva y con alto nivel de transparencia, este programa cuenta con varias bases de datos con suficiente información para ver los potenciales impactos ambientales del cualquier servicio o producto. A continuación, se muestra la información obtenida para cada uno de los procesos unitarios del concreto tradicional y el concreto ecológico.

5.5.3.1. Obtención de materias primas

La cantidad de materiales necesarios para una tonelada de concreto se obtuvo en base a lo calculado en el método ACI y de acuerdo a la tabla 31, donde se tiene la cantidad de materiales necesarios para un m³ de concreto. Un m³ de concreto tiene un peso de alrededor de 2300 kg, de acuerdo a eso se obtuvo que 0.435 m³ de concreto es lo equivalente a una tonelada. A continuación, se muestran las cantidades de materiales necesarios para una tonelada de concreto tradicional y para el concreto ecológico, como también el nombre de cómo se encuentra cada material en la base de datos del software.

Tabla 33.- Materiales necesarios para una tonelada de concreto tradicional.

Concreto tradicional	0.435 m3	1 ton Concreto	
Entradas	Cantidad	Unidad	Conjunto de datos (fuente de información)
Materiales			
Cemento	0.144	Ton	Cement, Portland {US} market for
Arena	0.344	Ton	Sand {RoW} gravel and quarry operation
Grava	0.390	Ton	Gravel, round {RoW} gravel and sand quarry operation
Agua	0.116	Ton	Tap water, at user {RoW} tap water production and supply



Tabla 34.- Materiales necesarios para una tonelada de concreto ecológico.

Concreto ecológico	0.435 m3	1 ton Concreto	
Entradas	Cantidad	Unidad	Conjunto de datos (fuente de información)
Materiales			
Cemento	0.144	Ton	Cement, Portland {US} market for
Arena	0.296	Ton	Sand {RoW} gravel and quarry operation
Grava	0.332	Ton	Gravel, round {RoW} gravel and sand quarry operation
Agua	0.116	Ton	Tap water, at user {RoW} tap water production and supply
Residuos de vidrio	0.111	Ton	Glass cullet, sorted {GLO} market for

5.5.3.2. Transporte de materias primas

La distancia en km se calculó con ayuda de Google Maps, el transporte de todos los materiales fue a la planta de concreto Premix en Morelia, el software necesita las toneladas por kilómetro para hacer el cálculo del impacto, la cual se calcula multiplicando la cantidad de materiales por la distancia en km. A continuación, se observan las toneladas por kilómetro correspondiente a cada material para ambos concretos, como también como se encuentran los vehículos utilizados en el software.

Tabla 36.- Toneladas por kilómetro del transporte de las materias primas para el concreto tradicional.

Concreto Tradicional	0.435 m3	1 ton Concreto	
Materiales (materia prima)			
Entradas	Cantidad	Unidad	Procedencia
Arena	0.344	Ton	Banco de material "Joyitas"
Grava	0.390	Ton	Banco de material "La Roka"
Cemento	0.144	Ton	Cemex México S.A. de C.V. Planta Tláhuac
Distancia (km)	Transporte	tkm	Conjunto de datos (fuente de información)
33	Camión volteo 7m3 (Diesel)	11.352	Transport, freight, lorry, 7.5 - 16 metric ton {GLO} market for
24.2	Camión volteo 7m3 (Diesel)	9.438	Transport, freight, lorry, 7.5 - 16 metric ton {GLO} market for
331	Camión de 20 ton (Diesel)	47.664	Transport, freight, lorry, 28 metric ton {GLO} market for

Tabla 35.- Toneladas por kilómetro del transporte de las materias primas para el concreto ecológico.

Concreto Ecológico	0.435 m3	1 ton Concreto	
Materiales (materia prima)			
Entradas	Cantidad	Unidad	Procedencia
Arena	0.296	Ton	Banco de material "Joyitas"
Grava	0.332	Ton	Banco de material "La Roka"
Cemento	0.144	Ton	Cemex México S.A. de C.V. Planta Tláhuac
Residuos de vidrio	0.111	Ton	Ciudad Universitaria
Distancia (km)	Transporte	tkm	Conjunto de datos (fuente de información)
33	Camión volteo 7m3 (Diesel)	9.768	Transport, freight, lorry, 7.5 - 16 metric ton {GLO} market for
24.2	Camión volteo 7m3 (Diesel)	8.0344	Transport, freight, lorry, 7.5 - 16 metric ton {GLO} market for
331	Camión de 28 ton (Diesel)	47.664	Transport, freight, lorry, 28 metric ton {GLO} market for
10.2	Camioneta Pick up (Gasolina)	1.1322	Transport, freight, van {GLO} market for



5.5.3.3. Manufactura del concreto

La manufactura del concreto va desde la caracterización de los materiales en la planta de concreto hasta el llenado de los camiones trompo para la entrega del producto. Todas las herramientas y máquinas utilizadas en este proceso funcionan a base de gas LP, Diésel y energía eléctrica. A continuación, se observan todas las entradas de los materiales necesarios en este proceso correspondiente para ambos concretos, como también con que nombre se encuentra en el software.

Tabla 37.- Materiales y entradas necesarias para la manufactura del concreto tradicional.

Manufactura Concreto Tradicional			
Caracterización y preparación de materias primas			
Entradas	Cantidad	Unidad	Conjunto de datos (fuente de información)
Materiales			
Agua (Empleada en pruebas de calidad)	15	kg	Tap water, at user {RoW} tap water production and supply
Gas LP (Empleado en pruebas de calidad)	2.4	kg	Liquefied petroleum gas {RoW} market for
Cemento sin caracterizar	0.144	Ton	Cement, Portland {US} market for
Arena sin caracterizar	0.344	Ton	Sand {RoW} gravel and quarry operation
Grava sin caracterizar	0.390	Ton	Gravel, round {RoW} gravel and sand quarry operation
Mezcla de materiales para obtener concreto			
Entradas	Cantidad	Unidad	Conjunto de datos (fuente de información)
Materiales			
Diesel (Empleado por la planta de concreto)	8.265	L	Diesel {RoW} market for
Agua	116	kg	Tap water, at user {RoW} tap water production and supply
Cemento caracterizado	0.144	Ton	Cement, Portland {US} market for
Arena caracterizada	0.344	Ton	Sand {RoW} gravel and quarry operation
Grava caracterizada	0.390	Ton	Gravel, round {RoW} gravel and sand quarry operation
Energía eléctrica para la revoltura de materiales	37	kwh	Electricity, medium voltage {MX} electricity voltage
Llenado de camiones trompo			
Entradas	Cantidad	Unidad	Conjunto de datos (fuente de información)
Materiales			
Concreto tradicional	1	Ton	
Diesel (Empleado por el trompo del camión)	9.5	L	Diesel {RoW} market for Alloc Def, U
Energía eléctrica para la banda transportadora	2.75	kwh	Electricity, medium voltage {MX} electricity voltage



Tabla 38.- Materiales y entradas necesarias para la manufactura del concreto ecológico.

Manufactura Concreto ecológico			
Caracterización y preparación de materias primas			
Entradas	Cantidad	Unidad	Conjunto de datos (fuente de información)
Materiales			
Agua (Empleada en pruebas de calidad)	15	kg	Tap water, at user {RoW} tap water production and supply
Gas LP (Empleado en pruebas de calidad)	2.4	kg	Liquefied petroleum gas {RoW} market for
Cemento sin caracterizar	0.144	Ton	Cement, Portland {US} market for
Arena sin caracterizar	0.296	Ton	Sand {RoW} gravel and quarry operation
Grava sin caracterizar	0.332	Ton	Gravel, round {RoW} gravel and sand quarry operation
Energía eléctrica para la molienda de vidrio	2.25	kwh	Electricity, medium voltage {MX} electricity voltage
Mezcla de materiales para obtener concreto			
Entradas	Cantidad	Unidad	Conjunto de datos (fuente de información)
Materiales			
Diesel (Empleado por la planta de concreto)	8.265	L	Diesel {RoW} market for
Agua	116	kg	Tap water, at user {RoW} tap water production and supply
Cemento caracterizado	0.144	Ton	Cement, Portland {US} market for
Arena caracterizada	0.296	Ton	Sand {RoW} gravel and quarry operation
Grava caracterizada	0.332	Ton	Gravel, round {RoW} gravel and sand quarry operation
Residuos de Vidrio Molido	0.111	Ton	Glass cullet, sorted {GLO} market for
Energía eléctrica para la revoltura de materiales	37	kwh	Electricity, medium voltage {MX} electricity voltage
Llenado de camiones trompo			
Entradas	Cantidad	Unidad	Conjunto de datos (fuente de información)
Materiales			
Concreto ecológico	1	Ton	
Diesel (Empleado por el trompo del camión)	9.5	L	Diesel {RoW} market for Alloc Def, U
Energía eléctrica para la banda transportadora	1.75	kwh	Electricity, medium voltage {MX} electricity voltage

5.5.3.4. Transporte y entrega del producto

Para el transporte y entrega de la tonelada del concreto tradicional y ecológico se considerará la distancia desde la planta de concreto Premix de Morelia hasta la UMNSH.

Tabla 39.- Toneladas por kilómetro del transporte y entrega del concreto tradicional.

Concreto Tradicional	0.435 m3	1 ton Concreto	
Entradas	Cantidad	Unidad	Procedencia
Concreto Tradicional	1	ton	Planta de concreto Premix Morelia
Distancia (km)	Transporte	tkm	Conjunto de datos (fuente de información)
10.1	Camión trompo	10.1	Transport, freight, mixer truck {GLO} market for



Tabla 40.- Toneladas por kilómetro del transporte y entrega del concreto tradicional.

Concreto Tradicional	0.435 m3	1 ton Concreto	
Entradas	Cantidad	Unidad	Procedencia
Concreto Ecológico	1	ton	Planta de concreto Premix Morelia
Distancia (km)	Transporte	tkm	Conjunto de datos (fuente de información)
10.1	Camión trompo	10.1	Transport, freight, mixer truck {GLO} market for

5.5.4. Evaluación del impacto del ciclo de vida (ICV)

En la a evaluación del impacto del ciclo de vida evaluaremos y analizaremos los datos recogidos en el inventario y sus efectos sobre el medio ambiente, se hará la caracterización del impacto ambiental global y el impacto ambiental por categoría para el concreto tradicional y el concreto ecológico, con el fin de comparar y ver si los impactos al ambiente son menores para el concreto ecológico.

5.6. Fabricación de las mezclas en estudio y de los especímenes

La fabricación de las mezclas y especímenes se realizará en dos etapas, la primera etapa consta de la elaboración de mezclas y especímenes con distintas cantidades de desechos de vidrio para sustituir parcialmente al agregado fino y grueso, en esta etapa se realizarán únicamente especímenes de forma cilíndrica con un diámetro de 10 cm y una altura de 20 cm para pruebas de resistencia a compresión, la cual no ayudará con la selección de los mejores porcentajes de sustitución por vidrio; en la segunda etapa con los mejores porcentajes se realizarán especímenes cilíndricos de 10cm x 20cm, de 15cm x 30cm y vigas de 15cm x 60cm para pruebas de durabilidad, ensayos a flexión, tensión y compresión.

5.6.1. Primera etapa

En esta etapa se realizarán mezclas de concreto con distintos porcentajes de sustitución de los agregados pétreos por desechos de vidrio y especímenes cilíndricos de 10cm x 20cm para prueba de resistencia a compresión a los 28 y 60 días. El objetivo de esta etapa es el escoger los porcentajes de desechos de vidrio de mejor comportamiento, en base a su resistencia a compresión, es decir, se escogerá el mejor porcentaje de sustitución de la arena, de la grava y de su combinación. A continuación, se muestran las distintas mezclas a realizar cada una especificada con su respectivo porcentaje de sustitución de arena, grava o ambas.



Tabla 41.- Mezclas a realizar correspondientes a la primera etapa.

PRIMERA ETAPA, CILINDROS DE 10 X 20 cm			
Prueba de resistencia a compresión		No. de especímenes	
Mezclas a realizar	% de sustitución por vidrio	28 días	60 días
Sustitución parcial de la arena	10	3	3
Sustitución parcial de la arena	20	3	3
Sustitución parcial de la arena	30	3	3
Sustitución parcial de la grava	10	3	3
Sustitución parcial de la grava	20	3	3
Sustitución parcial de la grava	30	3	3
Sustitución parcial de la arena y grava	10 y 10	3	3
Sustitución parcial de la arena y grava	15 y 15	3	3
Sustitución parcial de la arena y grava	10 y 20	3	3
Sustitución parcial de la arena y grava	20 y 10	3	3
Testigos	Sin vidrio	3	3
Total		66	

De acuerdo a la tabla anterior y a lo realizado en el diseño de mezclas por el método ACI donde se obtuvieron los materiales necesarios para un m³ de concreto de la mezcla testigo, se realizará la sustitución de la arena, grava o ambas por los desechos de vidrio. En la tabla 42 se muestran las cantidades necesarias de material de las distintas mezclas con sustitución por vidrio molido y vidrio triturado.

Para este caso, cada mezcla de concreto se compone de 6 especímenes cilíndricos de 10 cm x 20 cm y se considera un desperdicio del 15%, lo cual equivale a 0.010838 m³.



Tabla 42.- Cantidades requeridas de material para las mezclas de la primera etapa.

Materiales	Masa requerida (kg)					
	Sustitución de arena por vidrio molido			Sustitución de arena por vidrio molido		
	10%	20%	30%	10%	20%	30%
Cemento	3.584	3.584	3.584	3.584	3.584	3.584
Arena	7.806	6.939	6.071	8.673	8.673	8.673
Grava	9.735	9.735	9.735	8.762	7.788	6.815
Agua	2.886	2.886	2.886	2.886	2.886	2.886
Vidrio Molido	0.867	1.735	2.602	-	-	-
Vidrio Triturado	-	-	-	0.974	1.947	2.921
Materiales	Masa requerida (kg)					
	Sustitución de la arena y la grava por vidrio molido y triturado				Testigo	
	10% y 10%	15% y 15%	10% y 20%	20% y 10%	Sin Vidrio	
Cemento	3.584	3.584	3.584	3.584	3.584	
Arena	7.806	7.372	7.806	6.939	8.673	
Grava	8.762	8.275	7.788	8.762	9.735	
Agua	2.886	2.886	2.886	2.886	2.886	
Vidrio Molido	0.867	1.301	0.867	1.735	-	
Vidrio Triturado	0.974	1.460	1.947	0.974	-	

5.6.2. Segunda etapa

En esta etapa, con las mezclas de mejor comportamiento en sustitución parcial de la arena por vidrio molido, la grava por vidrio triturado y ambos agregados pétreos por su respectivo vidrio a resistencia a compresión, se elaboraron especímenes cilíndricos de 10cm x 20cm, de 15cm x 30cm y vigas de 15cm x 15 cm x 60cm para realizar pruebas destructivas, no destructivas y de durabilidad a varias edades de prueba. El objetivo de escoger los mejores porcentajes y eliminar los otros es el de no elaborar tantos especímenes para mezclas que desde un inicio no presentan buenos resultados. Las pruebas que se realizarán a los especímenes de esta etapa son las siguientes:

Pruebas destructivas y no destructivas:

- Resistividad eléctrica (RE).
- Velocidad de pulso ultrasónico (VPU).



- Módulos de elasticidad.
- Resistencia a la compresión.
- Resistencia a la tensión por compresión diametral.
- Módulo de ruptura.

Pruebas de durabilidad:

- Resistencia al ataque por sulfatos.
- Profundidad de carbonatación.
- Absorción capilar.

La cantidad de especímenes a realizar en esta etapa se observa detalla a continuación:

Tabla 43.- Cantidad de especímenes para pruebas destructivas y no destructivas.

SEGUNDA ETAPA, CILINDROS DE 10 X 20 cm					
Pruebas destructivas y no destructivas		No. de especímenes			
Mejores proporciones a resistencia a compresión	% de sustitución por vidrio	7 días	28 días	60 días	90 días
Arena	Mejor comportamiento	5	5	5	5
Grava	Mejor comportamiento	5	5	5	5
Combinación	Mejor comportamiento	5	5	5	5
Testigos	Sin vidrio	5	5	5	5
Total		80			

Tabla 44.- Cantidad de especímenes necesarios para módulo de ruptura.

SEGUNDA ETAPA, VIGAS DE 15 X 15 X 60 cm			
Prueba de módulo de ruptura		No. de especímenes	
Mejores proporciones a resistencia a compresión	% de sustitución por vidrio	28 días	60 días
Arena	Mejor comportamiento	5	5
Grava	Mejor comportamiento	5	5
Combinación	Mejor comportamiento	5	5
Testigos	Sin vidrio	5	5
Total		40	



Tabla 45.- Cantidad de especímenes necesarios para prueba de tensión indirecta.

SEGUNDA ETAPA, CILINDROS DE 15 X 30 cm			
Prueba de tensión indirecta		No. de especímenes	
Mejores proporciones a resistencia a compresión	% de sustitución por vidrio	28 días	60 días
Arena	Mejor comportamiento	5	5
Grava	Mejor comportamiento	5	5
Combinación	Mejor comportamiento	5	5
Testigos	Sin vidrio	5	5
Total		40	

Tabla 46.- Cantidad de especímenes necesarios para pruebas de durabilidad.

SEGUNDA ETAPA, CILINDROS DE 10 X 20 cm		
Pruebas de durabilidad		No. de especímenes
Mejores proporciones a resistencia a compresión	% de sustitución por vidrio	
Arena	Mejor comportamiento	20
Grava	Mejor comportamiento	20
Combinación	Mejor comportamiento	20
Testigos	Sin vidrio	20
Total		80

5.6.3. Elaboración de las mezclas en el laboratorio

Para la fabricación de las mezclas de estudio, ya que tenemos las cantidades precisas de los materiales a utilizar, se siguió la metodología establecida para la elaboración de concreto convencional en una revolvedora como referencia.

El procedimiento para la elaboración de las mezclas de concreto se describe a continuación:

1. Se preparan los materiales necesarios para cada mezcla, es decir, se procede a pesar los materiales. Ver figura 75 y 76.



2. Se añadió a la revolvedora aproximadamente el 10% del agua y la cantidad correspondiente de grava. Ver figura 77.
3. Se añadió un 50% más de agua y se dejó mezclando con la grava durante 1 minuto.
4. Se incorporó el cemento, la arena, el agua restante y los desechos de vidrio molido o triturado, según sea el caso. La revoltura de todos los componentes se deja durante un lapso de aproximadamente 3 minutos.
5. La mezcla de concreto resultante se recibe en una charola, para posteriormente medir la trabajabilidad con el cono de abrams para garantizar el revenimiento de diseño (10 cm). Ver figura 78.



Figura 75.- Preparación de los materiales. (Contreras, 2023)



Figura 76.- Cantidades de materiales necesarios para la mezcla de concreto. (Contreras, 2023)



Figura 77.- 10% del agua con todo el agregado grueso. (Contreras, 2023)



Figura 78.- Concreto fresco con la consistencia deseada. (Contreras, 2023)



5.6.4. Fabricación y curado de los especímenes

La fabricación y curado de los especímenes se realizó en base a lo especificado en la norma NMX-C-159-ONNCCE-2016.

La norma específica que moldes donde se harán los especímenes deben ser de acero. Los especímenes cilíndricos pueden ser de varios tamaños, pero deben cumplir con un diámetro mínimo de 5 cm y una longitud mínima de 10 cm. El diámetro del cilindro a utilizar deberá ser, cuando menos tres veces el tamaño máximo nominal del agregado grueso del concreto. Por lo general deben prepararse 3 o más especímenes para cada edad de prueba.

El procedimiento para la fabricación de los especímenes de concreto se describe a continuación:

1. Con ayuda de alguna brocha o estopa se coloca algún líquido desmoldante a todos los moldes de acero, con el fin de facilitar el desmolde de los especímenes al día siguiente.
2. Con ayuda del cucharón se llenan los diferentes especímenes en capas y cada capa se debe compactar con algún método de compactación, según lo indicado en la tabla siguiente. Ver figura 79.

Tabla 47.- Número de capas requeridas para especímenes cilíndricos. (NMX-C-159-ONNCCE, 2016)

Tipo y tamaño de espécimen	Método de compactación	Número de capas del mismo espesor
Cilindros de 10 cm x 20 cm	Varillado	2
Cilindros de 15 cm x 30 cm	Varillado	3
Vigas de 15 cm x 15 cm x 60 cm	Varillado	2

3. Después de que ya se conoce el método de compactación, se procede a compactar cada capa, un número de penetraciones y con una varilla punta de bala de diámetro, los cuales están especificados en la siguiente tabla 44. Cada capa debe ser compactada solo en su espesor, es decir, sin sobrepasar las otras. Ver figura 80.



Tabla 48.- Diámetro de la varilla y número de penetraciones empleados para moldear los especímenes cilíndricos. (NMX-C-159-ONNCCE, 2016)

Tipo y tamaño de espécimen	Diámetro de la varilla en (mm)	Número de penetraciones por capa
Cilindros de 10 cm x 20 cm	10 (3/8")	25
Cilindros de 15 cm x 30 cm	16 (5/8")	25
Vigas de 15 cm x 15 cm x 60 cm	16 (5/8")	Una por cada 14 cm ² de superficie

4. Posteriormente cada capa debe ser golpeada suavemente las paredes del molde con el mazo de goma, esto con el fin de eliminar las oquedades que se dejan al momento del varillado. Después de llenado el espécimen cilíndrico, se procede a enrasar la cara superior para que de esta forma dejarla lo más horizontal y a nivel del espécimen posible. Ver figura 81.
5. Curado y protección después del acabado. Para evitar la evaporación de agua del concreto que aún no endurece, deben cubrirse los especímenes inmediatamente después del acabado, de preferencia con una placa no absorbente, o con una bolsa de plástico durable e impermeable. Los especímenes no deben quitarse de los moldes antes de 20 horas, ni después de 48 horas de haber sido colados.
6. Curado y protección después de retirar los especímenes del molde. Los especímenes deben curarse cando menos durante los primeros 7 días de edad, después de retirados del molde, para esto se deben colocar en un lugar donde la humedad y temperatura sean constantes, como puede ser el cuarto húmedo o la pila de curado. Ver figura 82.



Figura 80.- Vaciado de la mezcla de concreto en los especímenes cilíndricos de 10x20cm. (Contreras, 2023)



Figura 79.- Varillado de los especímenes con la varilla de 3/8". (Contreras, 2023)



Figura 82.- Vibrado suave con mazo de goma para eliminar las oquedades. (Contreras, 2023)



Figura 81.- Curado de los especímenes en la pila de curado para evitar la pérdida de humedad. (Contreras, 2023)

5.7. Pruebas de calidad para el concreto en estado fresco y endurecido

Las pruebas de calidad realizadas al concreto nos ayudarán a comparar las propiedades físico-mecánicas y por durabilidad de las distintas mezclas de concreto con sustitución de vidrio con la mezcla testigo, con el fin de ver si resulta viable el uso de los desechos de vidrio en el concreto.



5.7.1. Pruebas al concreto en estado fresco

5.7.1.1. Revenimiento

El objetivo de esta prueba es determinar la consistencia y trabajabilidad del concreto hidráulico en estado fresco en término de la disminución de la altura. El revenimiento es una característica esencial en el diseño de la mezcla, ya que determina el contenido de agua que tiene la mezcla. Dicha prueba se realizó en base a lo especificado en la norma NMX-C-156-ONNCCE-2010.

Equipo:

- Cono de Abrams.
- Varilla punta de bala de 5/8” de diámetro.
- Cucharón.
- Placa metálica.
- Pala y flexómetro.

Procedimiento:

1. Inmediatamente después de terminado el mezclado del concreto, se procede a humedecer el cono y se coloca sobre la placa metálica, la cual también debe estar húmeda. El operador debe sujetar firmemente el cono parándose sobre las dos orejas que tiene. Con la mezcla de concreto se llenarán 3 capas aproximadamente de igual volumen.
2. Cada capa se debe compactar 25 veces con la varilla, los cuales deber ser distribuidos por toda la sección transversal. Ver figura 83.
3. Después de compactar la última capa, se procede a enrasar con ayuda de la varilla mediante el rodamiento de la misma. Inmediatamente después se retira el molde cuidadosamente en dirección vertical.
4. Por último, se mide el revenimiento, determinándose la diferencia de la altura del cono y la del concreto sobre el centro original de la base. Ver figura 84.



Figura 83.- Figura 84.- Compactación de cada capa 25 veces con la varilla. (Contreras, 2023)



Figura 85.- Obtención del revenimiento de la mezcla de concreto fresco. (Contreras, 2023)

La norma mexicana NMX-C-156-ONNCCE-2010 nos proporciona la siguiente tabla 49 para obtener el valor nominal del revenimiento y sus tolerancias.

Tabla 49.- Tolerancias para distintos revenimientos. (NMX-C-156-ONNCCE, 2010)

Revenimiento Nominal (mm)	Tolerancia (mm)
Menor de 50	± 15
De 50 a 100	± 25
Mayor de 100	± 35

5.7.2. Pruebas al concreto endurecido

5.7.2.1. Pruebas no destructivas

5.7.2.1.1. Resistividad eléctrica

El propósito de esta prueba es determinar la resistividad eléctrica o riesgo de corrosión para el acero interno del concreto hidráulico, es decir, la fuerza que opone el concreto al paso del flujo de la corriente eléctrica a distintas edades de prueba.

Los especímenes cilíndricos para el caso de esta prueba deberán estar saturados o húmedos, es decir, la prueba se realizará inmediatamente después de retirar los cilindros de cierta edad de la pila de curado. Dicha prueba se realizará por el método directo, el cual es



aplicable a muestras de concreto de preferencia en laboratorio en que dichas muestras son elaboradas bajo ciertas normas con fines de investigación e innovación para la mejora de mezclas o de muestras obtenidas en campo. Esta prueba se realizó en base a lo especificado en la norma NMX-C-514-ONNCCE-2019.

Equipo:

- Especímenes de concreto.
- Esponjas o telas de microfibra.
- Placas metálicas.
- Resistómetro.
- Medidor de dimensiones (Vernier y flexómetro).

Procedimiento:

1. Verificar que el equipo se encuentre conectado el P1 con el C1, así como el P2 con el C2 (puenteado), además de que el equipo tenga suficiente batería y las perillas se deben de encontrar en las lecturas mínimas. Ver figura 85.
2. Enumerar los especímenes y posteriormente con el vernier y el flexómetro se tomaron las dimensiones de cada uno de ellos, para especímenes cilíndricos se obtiene su diámetro y altura; y para las vigas se obtiene el ancho, espesor y su longitud.
3. Se humedecen la esponja o tela de microfibra, según sea el caso, posteriormente se colocan en las caras que estarán en contacto con las placas metálicas, las cuales estarán conectadas al resistómetro. Ver figura 86.
4. Por último, debe colocarse un peso muerto (no metálico) para garantizar el buen contacto de corriente eléctrica y posteriormente obtener la resistencia eléctrica con ayuda del resistómetro, en Ω (ohm). Ver figura 87 y 88.



Figura 87.- Resistómetro Nilson punteado. (Contreras, 2023)



Figura 86.- Placas metálicas conectadas al resistómetro. (Contreras, 2023)



Figura 88.- Obtención de la resistencia eléctrica en vigas y cilindros. (Contreras, 2023)

Cálculos:

$$\rho = \frac{Re * A}{L}$$

Donde:

ρ = Resistividad eléctrica, en $k\Omega \cdot cm$.

Re = Resistencia eléctrica, en $k\Omega$.

A = Área de la sección transversal, en cm^2 .

L = Longitud del espécimen, en cm .

Las normas mexicanas NMX-C-514-ONNCCE-2019 y NMX-C-530-ONNCCE-2018 proporcionan la tabla 50, la cual da criterios de evaluación de la resistividad eléctrica o la probabilidad de corrosión del acero de refuerzo del concreto.



Tabla 50.- Criterios para evaluar la resistividad eléctrica o riesgo de corrosión del acero de refuerzo. (NMX-C-514-ONNCCE, 2019); (NMX-C-530-ONNCCE, 2018)

Resistividad	Probabilidad de corrosión
> 100 k Ω ·cm - 200 k Ω ·cm	Porosidad interconectada extremadamente baja
50 k Ω ·cm a 100 k Ω ·cm	Porosidad interconectada baja
10 k Ω ·cm a 50 k Ω ·cm	Porosidad interconectada de consideración
< 10 k Ω ·cm	Porosidad interconectada excesiva

5.7.2.1.2. Velocidad de pulso ultrasónico (VPU)

El objetivo de esta prueba es determinar la porosidad del espécimen en cuestión por medio de ondas de pulso ultrasónicas, la cual nos da una idea de la calidad del concreto.

La VPU, o Velocidad de Pulso Ultrasónico, se define como la relación entre la distancia que recorren las ondas ultrasónicas a través del concreto y el tiempo que tardan en hacerlo.

Los especímenes cilíndricos de igual forma para esta prueba deberán estar saturados o húmedos, es decir, la prueba se realizará inmediatamente después de haber realizado la prueba de resistividad eléctrica. Esta prueba se realizó en base a lo especificado en la norma NMX-C-275-ONNCCE-2020.

Equipo:

- Especímenes de concreto.
- Equipo de velocidad de pulso ultrasónico con sus cables y transductores.
- Líquido viscoso para garantizar la conexión (gel).
- Flexómetro.

Procedimiento:

1. Se deben conectar y calibrar los transductores, posteriormente se selecciona la longitud de propagación de las ondas, es decir la longitud de la muestra en estudio. Para este caso la longitud es de 20 cm, el cual es la altura de los cilindros de concreto. Ver figura 88.



2. Se selecciona la cantidad de pulsos que se le debe dar a las muestras, para este caso son 3 pulsos en 2 segundos.
3. Se coloca el gel en las caras opuestas de los especímenes y en los transductores, para de esta forma garantizar la conexión, posteriormente se colocan los transductores en las caras del espécimen, cuidando se siempre estén en contacto. Ver figura 89.
4. Por último, con ayuda del aparato se calcula la velocidad de pulso, el cual ya arroja directamente el valor de la VPU, en m/s. Se debe tomar la lectura que se repita por lo menos en dos ocasiones.



Figura 90.- Equipo de VPU conectado y calibración de transductores. (Contreras, 2023)



Figura 89.- Transductores en las caras de la muestra para la obtención de la VPU. (Contreras, 2023)

La norma mexicana NMX-C-275-ONNCCE-2020, proporciona la tabla 51 para evaluar la velocidad de pulso ultrasónico o la calidad del concreto.

Tabla 51.- Criterios para evaluar la velocidad de pulso ultrasónico (VPU). (NMX-C-275-ONNCCE, 2020)

Velocidad de propagación (m/s)	Calidad del concreto
< 2000	Deficiente
2001 a 3000	Normal
3001 a 4500	Alta
>4500	Durable



5.7.2.2. Pruebas destructivas

5.7.2.2.1. Resistencia a compresión

El propósito de esta prueba es determinar la máxima resistencia a compresión del concreto, con el fin de compararla con la resistencia de diseño establecida. Esta prueba es la más comúnmente utilizada, ya que la resistencia a compresión es generalmente la propiedad mecánica más importante del concreto y está relacionada con la mayoría de sus características. Esta prueba se realizó en base a lo especificado en la norma NMX-C-083-ONNCCE-2014.

Equipo:

- Especímenes de concreto de 10 x 20 cm.
- Flexómetro y vernier.
- Material para el cabeceo (Azufre)
- Máquina universal Forney.

Procedimiento:

1. Antes de realizar el cabeceo se toman las dimensiones del espécimen de prueba, tales como la altura y el diámetro.
2. Teniendo ya las dimensiones y el espécimen cabeceado, se coloca el espécimen en la máquina universal, asegurándose de limpiar a fondo las placas donde se apoyará el mismo. Además, se centra el eje vertical del espécimen en el centro de la placa de apoyo.
3. Se ajusta la placa superior de la máquina a la cara del espécimen de tal forma que no se aplique ninguna carga de impacto, si no que apenas quiera rozar o tocar el espécimen, posteriormente se pone en ceros la máquina y se aplica la carga en una velocidad continua hasta la falla de la muestra. La velocidad de aplicación de carga varía de acuerdo al diámetro del espécimen, en la tabla 52 vienen las velocidades mínimas y máximas de aplicación de carga de acuerdo al diámetro del espécimen. Ver figura 90 y 91.



Tabla 52.- Velocidad de aplicación de carga. (NMX-C-083-ONNCCE, 2014)

Forma del espécimen	Diámetro de los especímenes cm (pulgadas)	Área nominal (cm ²)	Carga mínima kN/s (t/min)	Carga máxima kN/s (t/min)
Cilindros	5.00 (2")	19.64	0.4 (2.4)	0.6 (3.6)
	7.50 (3")	44.18	0.9 (5.4)	1.3 (8.1)
	10.00 (4")	78.54	1.6 (9.6)	2.4 (14.4)
	15 (6")	176.72	3.5 (21.6)	5.3 (32.4)

4. Por último, se registra la carga de ruptura del espécimen. Las pruebas de compresión a especímenes de concreto deben ser probados tan rápido como se pueda, a la edad de prueba que le corresponda. La tabla 53 proporciona edades de prueba para los especímenes, cada una con tolerancias para que sigan siendo dicha edad de prueba y no otra.

Tabla 53.- Tolerancias a edades de prueba especificadas. (NMX-C-083-ONNCCE, 2014)

Edad de ensayo especificada	Tolerancia permisible
3 días	± 2.0 h
7 días	± 6.0 h
14 días	± 12.0 h
28 días	± 20.0 h
90 días	± 48.0 h



Figura 92.- Espécimen en la máquina universal Forney. (Contreras, 2023)



Figura 91.- Velocidad de carga para cilindros de 10 cm de diámetro. (Contreras, 2023)

Cálculos:

$$R = \frac{W}{A}$$

Donde:

R = Esfuerzo a compresión que resiste el espécimen a cierta edad (kg/cm²).

W = Carga máxima de ruptura (kg).

A = Área de la sección transversal del espécimen (cm²).

Conociendo y registrando su edad se determina su porcentaje de resistencia respecto a la resistencia de proyecto, y de esta forma saber si el cilindro va presentando buenos resultados a ciertas edades y se obtiene de la siguiente manera:

$$\% \text{ Resistencia} = \frac{R}{\text{Resistencia de proyecto}} * 100$$



5.7.2.2.2. Módulo de elasticidad estático

El propósito de esta prueba es determinar el módulo de elasticidad estático, el cual indica la relación entre el esfuerzo aplicado y la deformación unitaria axial del concreto durante la prueba de compresión. Este valor se obtiene a través de la pendiente secante definida por dos puntos de la curva en la gráfica esfuerzo – deformación unitaria, el primer punto se encuentra en las 50 millonésimas (0.000050) de la deformación unitaria y el segundo en el punto del 40 % de su esfuerzo máximo.

Para obtener el módulo de elasticidad se utilizaron tres especímenes cilíndricos de 10 cm de diámetro por 20 cm de altura y se desarrolló en conjunto con la prueba de resistencia a compresión. Esta prueba se realizó en base a lo especificado en la norma NMX-C-128-ONNCCE-2013.

Equipo:

- Tres especímenes cilíndricos de 10 x 20 cm.
- Flexómetro y vernier.
- Material para el cabeceo (Azufre)
- Máquina universal Forney.
- Dos anillos (deformímetro) y un micrómetro.
- Nivel de burbuja.

Procedimiento:

1. Antes de realizar el cabeceo de los especímenes, se registra el diámetro y la altura del con ayuda del flexómetro y el vernier de los tres especímenes de prueba.
2. Se procede a realizar el cabeceo de los especímenes con el azufre para que así la carga se aplique uniformemente por toda el área del cilindro.
3. Uno de los tres especímenes es llevado a su carga máxima y se registra, posteriormente se determina y se registra el valor del 10 % y 60 % de dicha carga máxima.
4. A los otros dos especímenes se les coloca los dos anillos (deformímetro) junto con sus barras separadoras, teniendo especial cuidado en no desprender el azufre del cabeceo. Los anillos se fijan mediante los tornillos de punta al cilindro y con ayuda



del nivel de burbuja se debe verificar la verticalidad de los anillos para proceder a retirar las barras separadoras. Ver figuras 92 y 93.

5. Se coloca el micrómetro en una de las bases de las barras separadoras y posteriormente se lleva el espécimen a la máquina de prueba. Ver figura 94.
6. Se pone el micrómetro en ceros y se procede a aplicar una precarga equivalente al 10 % de la carga ruptura para así verificar el correcto funcionamiento del micrómetro, el cual se debe regresar a ceros por sí solo. Ver figura 95.
7. Posteriormente, se aplica nuevamente carga al espécimen a una velocidad constante hasta alcanzar el 60% de la carga de ruptura. Durante este proceso, se registran las deformaciones a intervalos de 0.001 mm junto con su carga correspondiente.
8. Por último, se debe realizar la gráfica esfuerzo – deformación unitaria para obtener el módulo de elasticidad estático correspondiente a cada espécimen.



Figura 93.-.- Especimen con los dos anillos junto con las barras separadoras. (Contreras, 2023)



Figura 94.- Verificando la verticalidad con el nivel de burbuja. (Contreras, 2023)



Figura 96.- Micrómetro colocado en los anillos. (Contreras, 2023)



Figura 95.- Verificando el correcto funcionamiento del micrómetro. (Contreras, 2023)



Cálculos:

$$E = \frac{S_2 - S_1}{e_2 - 0.000050}$$

Donde:

E = Módulo de elasticidad estático, en kg/cm^2 .

S_1 = Esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria de 0.000050.

S_2 = Esfuerzo correspondiente al 40 % del esfuerzo máximo.

5.7.2.2.3. Resistencia a la tensión por compresión diametral

La prueba de resistencia a la tensión por compresión diametral también conocida como tensión indirecta o prueba brasileña ha sido utilizada ampliamente para determinar de forma indirecta la resistencia a la fractura en tensión de materiales para la construcción tales como concreto y rocas.

Para obtener la resistencia a la tensión por compresión diametral se utilizaron cinco especímenes cilíndricos de 15 cm de diámetro por 30 cm de altura. Esta prueba se realizó en base a lo especificado en la norma NMX-C-163-ONNCCE-2019.

Equipo:

- Cinco especímenes de 15 x 30 cm.
- Máquina universal Forney.
- Flexómetro.
- Dos placas de acero.
- Dos tiras de triplay para la correcta distribución de la carga.
- Marcador permanente.

Procedimiento:

1. Con ayuda del flexómetro se determinó el diámetro de los especímenes, el cual se obtuvo con el promedio de tres diámetros, medidos a los extremos y al centro del espécimen, también se determinó la longitud promediando por lo menos dos medidas de la misma.



2. Con ayuda del marcador permanente, se marcó el espécimen exactamente a la mitad de su diámetro y también sobre toda su longitud que serán las referencias en donde se pondrán las tiras de triplay.
3. Se procede a colocar una de las placas de acero en la máquina de prueba, posterior a ello se colocó una de las tiras de triplay en la parte central de la placa de acero. El espécimen se pone encima de la tira de triplay y se acomodó de tal modo que la tira coincidiera con la línea marcada en la longitud del cilindro, inmediatamente después se colocó la tira restante de triplay sobre la línea marcada en el otro extremo del cilindro.
4. Posteriormente se colocó la segunda placa de acero encima de la tira de triplay, cuidando que la línea marcada en el centro del diámetro y el espécimen estén correctamente centrados a la placa de la máquina. Ver figura 96.
5. Por último, se procede a aplicar la carga a velocidad constante hasta la falla del espécimen de concreto y se registra como carga de ruptura. Ver figura 97.



Figura 97.- *Espécimen centrado entre las placa de acero y las tiras de triplay. (Contreras, 2023)*



Figura 98.- *Aplicando carga hasta la falla del espécimen. (Contreras, 2023)*

Cálculos:

$$T = \frac{2P}{\pi LD}$$

Donde:

T = Resistencia a la tensión por compresión diametral, en kg/cm^2 .

P = Carga máxima aplicada, en kg.



L = Longitud, en cm.

D = Diámetro, en cm.

5.7.2.2.4. Resistencia a la flexión (módulo de ruptura)

Para obtener el módulo de ruptura del concreto se utilizaron cinco vigas de 15 cm de ancho por 15 cm de espesor por 60 cm de largo. Esta prueba se realizó en base a lo especificado en la norma NMX-C-191-ONNCCE-2015.

Equipo:

- Cinco vigas de 15 x15 x 60 cm.
- Flexómetro.
- Escuadra y marcador permanente.
- Máquina universal Forney.
- Aditamentos para la prueba a flexión a los tercios del claro.
- Nivel de burbuja.

Procedimiento:

1. Con ayuda del flexómetro se determinan las dimensiones promedio de cada uno de los especímenes, obteniendo así el ancho, espesor y longitud entre apoyos.
2. Con ayuda de la escuadra y el marcador permanente se marcaron las vigas a los tercios del claro, dejando 7.5 cm de cada extremo, quedando tres partes iguales de 15 cm de cada una, siendo referencia en donde se colocarán los aditamentos para la prueba de flexión. Ver figura 98.
3. Posteriormente se colocó cada espécimen en los apoyos inferiores, teniendo especial cuidado de que la viga quede posicionada en las marcas y que este correctamente centrada en la máquina universal de pruebas.
4. Se colocó la parte superior de los aditamentos cuidando que este se encuentre en las marcas del centro de la viga y con ayuda del nivel de burbuja se verifica la verticalidad del espécimen Ver figura 99.
5. Se procede a aplicar la carga a una velocidad constante hasta la falla del espécimen y se registra como carga de ruptura. Ver figura 100.



6. Por último, se observa la viga para verificar si la falla se presentó dentro o fuera del tercio medio del claro. Ver figura 101.



Figura 99.- Espécimen marcado a los tercios de claro, dejando 7.5 cm de los extremos. (Contreras, 2023)



Figura 100.- Espécimen en los aditamentos y centrado en la máquina de pruebas. (Contreras, 2023)



Figura 102.- Falla del espécimen. (Contreras, 2023)



Figura 101.- Especímenes fallados en el tercio medio del claro. (Contreras, 2023)

Cálculos:

Si la ruptura se presentó dentro del tercio medio del claro, el módulo de ruptura se obtiene con la siguiente formula:

$$MR = \frac{P \times L}{b \times d^2}$$

Si la ruptura se presentó fuera del tercio medio del claro, en no más del 5 % de su longitud, el módulo de ruptura se obtiene con la siguiente formula:

$$MR = \frac{3 \times P \times a}{b \times d^2}$$



Donde:

MR = Módulo de ruptura, en kg/cm^2 .

P = Carga máxima de ruptura, en kg.

L = Longitud entre apoyos, en cm.

b = Ancho promedio de la viga, en cm.

d = Espesor promedio de la viga, en cm.

a = Distancia promedio entre la falla y el apoyo más cercano en la superficie de la viga, en mm.

5.7.2.3. Ensayos de durabilidad

Las pruebas de durabilidad del concreto nos ayudan a darnos cuenta de su capacidad para resistir la acción de factores ambientales y otras condiciones adversas a lo largo del tiempo, manteniendo sus propiedades de diseño durante toda su vida útil. Un concreto duradero se logra mediante una combinación adecuada de diseño, materiales de calidad, construcción cuidadosa y mantenimiento adecuado.

Para realizar las pruebas de durabilidad se utilizaron 6 rodajas de concreto por cada mezcla de estudio, con dimensiones de 10 cm de diámetro por 5 cm de espesor, las cuales se obtuvieron de cortar especímenes cilíndricos de 10 cm de diámetro por 20 cm de altura. También se utilizaron 4 mitades de vigas por cada mezcla de estudio, con dimensiones de 15 cm de ancho x 15 cm de espesor x 60 cm de largo, las cuales se obtuvieron producto de la prueba de módulo de ruptura a los 28 días.



Figura 103.- Rodajas de concreto de 10 cm de diámetro por 5 cm de espesor. (Contreras, 2023)



Figura 104.- Mitades de viga de 15 cm x 15 cm x 60 cm obtenidas de la prueba de MR. (Contreras, 2023)



Las rodajas de concreto de cada mezcla de estudio se introdujeron en la pila de curado inmediatamente después de que fueron cortadas, con el fin de continuar su curado hasta el día que se necesiten para la prueba especificada. Las pruebas realizadas a las rodajas de concreto fueron a los 90 días después de su elaboración.

Las mitades de viga de las mezclas de estudio fueron expuestas al medio ambiente en dirección de los vientos dominantes de la ciudad de Morelia, en la azotea del laboratorio de materiales de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo durante un lapso de 180 días aproximadamente para posteriormente realizar la prueba especificada.

5.7.2.3.1. Determinación de la absorción capilar

El propósito de esta prueba es obtener la absorción capilar (sortividad) del concreto hidráulico. Esta prueba se realizó en base a lo especificado en la norma NMX-C-504-ONNCCE-2015.

El manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado de la Red DURAR define a la absorción capilar como "la masa de agua por unidad de área que puede ser absorbida en los poros capilares cuando el concreto se encuentra en contacto con agua líquida. Representa la porosidad efectiva o accesible al agua y por tanto a los agentes agresivos del ambiente"

Equipo:

- 6 rodajas de concreto de 10 cm de diámetro x 5 cm de espesor.
- Vernier y flexómetro.
- Cronómetro.
- Horno de secado.
- Estufa.
- Parafina y brea.
- Recipiente metálico.
- Brocha de cerdas suaves.
- Franela.
- Balanza con aproximación al décimo de gramo.
- Recipientes de plástico de fondo plano con su respectiva tapa.



- Esponja del tamaño de la base del recipiente.

Procedimiento:

1. Las rodajas de concreto se extraen de la pila de curado para su secado en el horno a una temperatura de 50 °C el tiempo necesario hasta alcanzar la masa constante.
2. Posteriormente se extraen las rodajas del horno y se dejan enfriar para después registrar su masa antes de sellar las áreas laterales curvas del espécimen.
3. Con ayuda del vernier y el flexómetro, se obtuvieron los diámetros promedio de al menos 5 mediciones de cada rodaja.
4. La parafina con la brea se llevó a baño maría a la estufa de gas para que dichos materiales puedan ser aplicados en forma líquida con ayuda de la brocha en las áreas laterales curvas de cada una de las rodajas, dejando secar la muestra sellada por lo menos 24 horas.
5. Pasadas las 24 horas se procede a tomar la masa de cada una de las rodajas de concreto con ayuda de la balanza y se registra como masa inicial.
6. La esponja se coloca en el fondo del recipiente de plástico y luego se agrega agua con precaución, asegurándose de que el nivel de agua solo llegue a 3 mm por encima de la parte inferior de cada espécimen.
7. Se introducen los especímenes sobre la esponja dentro del recipiente e inmediatamente después se inicia la medida del tiempo con ayuda del cronómetro desde que los especímenes entrar en contacto con el agua.
8. Luego se procede a medir la masa de cada espécimen en intervalos de tiempo específicos, comenzando desde 1 minuto y luego a los 5 minutos, 10 minutos, 20 minutos, 30 minutos, 1 hora, 2 horas, 3 horas, 4 horas, 5 horas, 6 horas, 24 horas, 48 horas, 72 horas, 96 horas, 120 horas, 144 horas, 168 horas y 192 horas, contando desde el momento en que entraron en contacto con el agua, para la obtención de cada masa se debe retirar el espécimen del agua y secar superficialmente la cara que se encuentra en contacto con el agua con ayuda de la franela, inmediatamente después de obtener la masa se debe regresar el espécimen al agua.
9. Por último, se procede a calcular de la sorción capilar y el índice de absorción.



Figura 109.- Rodajas de concreto en el horno de secado. (Contreras, 2023)



Figura 107.- Sellado de las rodajas de concreto con la parafina y brea.. (Contreras, 2023)



Figura 110.- Rodaja de concreto ya sellada. (Contreras, 2023)



Figura 105.- Esponja en el recipiente con nivel de agua a 3mm de la parte inferior de las rodajas. (Contreras, 2023)



Figura 106.- Rodajas de concreto selladas en el recipiente con agua. (Contreras, 2023)



Figura 108.- Lectura de masa de rodajas en intervalos de tiempo. (Contreras, 2023)

Cálculos:

En base al manual de la Red DURAR y a Fagerlund, los coeficientes de calculan en base a las siguientes ecuaciones:



$$m = \frac{t}{z^2}$$

Donde:

z = La profundidad de penetración del agua, en m^2 .

t = Tiempo, en segundos.

m = Coeficiente de la resistencia a la penetración del agua, en s/m^2 .

$$k = \frac{(m_t - m_0)/A}{\sqrt{t}}$$

Donde:

m_t = Masa del espécimen después de cada intervalo de tiempo, en kg.

m_0 = Masa inicial del espécimen antes de entrar en contacto con el agua, en kg.

A = Área expuesta del espécimen, en m^2 .

k = Coeficiente de absorción capilar, en $kg/m^2s^{1/2}$.

$$\varepsilon_e = \frac{k\sqrt{m}}{1000}$$

Donde:

ε_e = Porosidad efectiva, en %.

De acuerdo a lo anterior, la sorción capilar se calcula de la siguiente manera:

$$S = \frac{1}{\sqrt{m}}$$

Donde:

S = Sorción capilar, en $mm/h^{1/2}$ o $mm/s^{1/2}$.

La norma NMX-C-504-ONNCCE-2015 especifica que el cálculo del índice de absorción, se realiza con la siguiente formula:



$$I = \frac{m_t - m_0}{a \times d}$$

Donde:

I = Índice de absorción, en mm.

m_t = Masa del espécimen después de cada intervalo de tiempo, en kg.

m_0 = Masa inicial del espécimen antes de entrar en contacto con el agua, en kg.

a = Zona expuesta de la muestra, en mm².

d = Densidad del agua, en g/mm².

A continuación, es necesario determinar la tasa inicial y la tasa secundaria de absorción de agua del espécimen, en mm/s^{1/2}. Definida en la norma como “la pendiente del análisis de regresión lineal del índice de absorción contra la raíz cuadrada del tiempo mediante el método de mínimos cuadrados aplicado a cada espécimen”.

Especificaciones:

El manual de la Red DURAR menciona que, “para espesores de recubrimiento de 30 mm en ambientes severos, se recomiendan concretos con sorción capilar $S \leq 3 \text{ mm/h}^{1/2}$ ($5 \times 10^{-5} \text{ m/s}^{1/2}$); en medios menos severos puede ser hasta de $6 \text{ mm/h}^{1/2}$ ($1 \times 10^{-4} \text{ m/s}^{1/2}$)”. Si el espesor de la cubierta aumenta, la sorción capilar puede cambiarse proporcionalmente.

La norma NMX-C-504-ONNCCE-2015 nos dice que “los datos deber de seguir una relación lineal, es decir, un coeficiente de correlación $R < 0.98$, de lo contrario se invalida el resultado de la tasa de absorción del espécimen”.

5.7.2.3.2. Determinación de la porosidad total

El propósito de esta prueba es obtener una medida del volumen total de los poros que se encuentra en la estructura interna del concreto endurecido, la cual depende de la relación entre el agua y el cemento (a/c), el volumen de aire atrapado y las proporciones entre la arena y la grava. Esta prueba se realizó en base a lo especificado el manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado de la Red DURAR. (Red Durar, 1998)



La porosidad del concreto hidráulico se considera como los espacios vacíos que quedan dentro del mismo producto de la evaporación del agua excedente y del aire atrapado. Los poros del concreto de acuerdo a su tamaño y características se clasifican en:

- **Poros de gel:** Son de menor tamaño y son los espacios intersticiales del gel de cemento.
- **Poros capilares:** Son de distintas formas y su tamaño oscila entre 2 nm a 1 μm . Estos poros son los principales causantes de la permeabilidad del concreto endurecido, así como su vulnerabilidad a la acción de agentes externos.
- **Poros de aire:** Se generan principalmente por las burbujas de aire atrapadas en la masa del concreto, en el proceso de su creación. No están interconectados entre sí y su tamaño suele ser mayor a 0.05 mm.

Equipo:

- 6 rodajas de concreto de 10 cm de diámetro x 5 cm de espesor.
- Cubeta de 19 litros.
- Canastilla para sumergir las muestras con hilo.
- Horno de secado.
- Bascula.
- Franela.

Procedimiento:

1. Inmediatamente después de que se obtuvieron las rodajas de concreto se proceden a introducirse en la pila de curado para su saturación durante 24 horas como mínimo.
2. Posteriormente se extraen las rodajas de la pila y se secan superficialmente con ayuda de la franela para obtener su masa y registrarla como masa saturada (M_{ss}).
3. Se le agrega agua a la cubeta hasta aproximadamente tres cuartas partes, el hilo se le amarra a la canastilla, se obtiene su masa y ambos se le adaptan a la báscula.
4. Se coloca la rodaja de concreto en la canastilla y posteriormente se introduce en el agua para obtener su masa y registrarla como masa sumergida en agua (M_{sa}).
5. Por último, las rodajas de concreto se introducen al horno de secado a una temperatura de 105 °C hasta masa constante y se registra como masa seca (M_s).



Figura 111.- Rodajas de concreto en la pila de curado para su saturado. (Contreras, 2023)



Figura 114.- Rodaja de concreto saturada y superficialmente seca. (Contreras, 2023)



Figura 112.- Muestra de concreto sumergida con la canastilla. (Contreras, 2023)



Figura 113.- Rodajas de concreto en el horno para su secado a 105 °C. (Contreras, 2023)

Cálculos:

$$\% \text{ de Porosidad Total} = \frac{M_{sss} - M_s}{M_{sss} - M_{sa}} \times 100$$

Donde:

M_{sss} = Masa saturada y superficialmente seca, en kg.

M_{sa} = Masa sumergida en agua, en kg.

M_s = Masa seca, en kg.

Especificaciones:

El manual de la Red DURAR nos proporciona la siguiente tabla para darnos una idea de la calidad del concreto de acuerdo a su porosidad total.



Tabla 54.- Especificaciones de la calidad del concreto de acuerdo a su porosidad total.

% de Porosidad Total	Especificación de Calidad
$\leq 10\%$	Concreto de buena calidad y compacidad
10% - 15%	Concreto de calidad moderada
$> 15\%$	Concreto de durabilidad inadecuada

5.7.2.3.3. Determinación de la profundidad de carbonatación

El propósito de esta prueba es calcular la profundidad de carbonatación en el concreto hidráulico utilizando el método de vía húmeda con un indicador ácido-base. Esta prueba se realizó en base a lo especificado en la norma NMX-C-515-ONNCCE-2016.

La carbonatación en el concreto hidráulico se define como la pérdida de pH que ocurre cuando el CO_2 reacciona con la humedad dentro de los poros del concreto y transforma el hidróxido de calcio con alto pH a carbonato de calcio (CaCO_3), el cual tiene un pH más neutral, reduciendo así la alcalinidad normal del concreto (pH entre 12 y 13.5). La pérdida de pH es un problema debido a que cuando el pH del concreto disminuye por debajo de 9.5 la capa pasiva que protege al acero de refuerzo se desestabiliza y es muy probable que empiece la corrosión del mismo.

El CO_2 es uno de los principales responsables de la degradación del acero de refuerzo, ya que solo se requiere una pequeña concentración (0,03 por ciento) de este para que ocurra la carbonatación del concreto hidráulico.

Equipo:

- 4 mitades de vigas producto de la prueba de Módulo de ruptura del concreto.
- Vernier.
- Máquina Universal Forney con aditamentos para prueba a flexión.
- Solución indicadora ácido-base (1g de fenolftaleína con 100 ml del alcohol isopropílico)
- Cepillo con cerdas de plástico.



Procedimiento:

1. Lo primero que se debe de hacer es exponer a la humedad del ambiente las mitades de vigas producto de la prueba de módulo de ruptura por 180 días en la azotea del laboratorio de materiales de la Facultad de Ingeniería Civil. Cada mitad de viga debe ser marcada para saber en qué parte se expone a los vientos dominantes.
2. Transcurridos los 180 días se procede a bajar las mitades de viga de la azotea para posteriormente fallarlas en su transversalmente con ayuda de la máquina universal Forney y los aditamentos para la prueba de flexión, con el fin de encontrar la distancia carbonatada de cada muestra, desechando la parte frontal expuesta a los vientos dominantes.
3. Con ayuda del cepillo de cerdas se limpia la superficie de cada espécimen fallado y posteriormente se aplica uniformemente con un atomizador la solución indicadora ácido-base sobre la superficie a evaluar, se debe tener especial cuidado de no tener escurrimientos de la solución para evitar la contaminación de la sección carbonatada.
4. Ya con la solución en la superficie y antes de que pasen más de 15 minutos de prueba, se procede a realizar la medición del promedio de por lo menos de tres lugares diferentes de la profundidad de la zona incolora en la superficie del espécimen fallado.
5. Por último, se registra cada una de las profundidades de carbonatación de cada mitad de viga de cada una de las mezclas.



Figura 116.- Mitades de viga expuestas a la humedad del ambiente. (Contreras, 2023)



Figura 115.- Mitad de viga en la máquina de pruebas para fallarla transversalmente. (Contreras, 2023)



Figura 118.- Espécimen ya con la solución indicadora ácido-base. (Contreras, 2023)



Figura 117.- Espécimen listo para la medición de la profundidad de carbonatación. (Contreras, 2023)

Cálculos:

Para el cálculo de la velocidad de carbonatación de cada una de las mezclas de estudio, necesitamos obtener la profundidad de carbonatación y la raíz cuadrada del tiempo que estuvieron expuestas al ambiente las vigas, y se procede a utilizar la siguiente expresión:

$$X_{CO2} = (K_{CO2})(\sqrt{t})$$

Donde:

X_{CO2} = Profundidad de carbonatación, en mm.

K_{CO2} = Constante de carbonatación, en mm/año^{1/2}.

t = Tiempo de exposición de las vigas a la humedad del ambiente, en años.

Con ayuda de las siguientes formulas, es posible predecir el avance de la profundidad de carbonatación y el tiempo en el cual la misma logrará alcanzar al acero de refuerzo.

$$K_{CO2} = \frac{X_{CO2}}{\sqrt{t}}$$

$$t = \frac{t_{den}}{t_{año}}$$

$$t_{pred} = \left(\frac{e_c}{K_{CO2}} \right)^2$$



Donde:

t_{den} = Tiempo de exposición del concreto, en días.

$t_{año}$ = Cantidad de días que hay en un año, 365.25 días.

t_{pred} = Tiempo en el que la carbonatación alcanzará al acero de refuerzo, en años.

e_c = Recubrimiento del concreto del acero de refuerzo, en mm.

Especificaciones:

La norma NMX-C-515-ONNCCE-2016 nos proporciona los criterios de evaluación para indicar la resistencia a la carbonatación del concreto, los cuales se observan en la siguiente tabla 55.

Tabla 55.- Criterios de evaluación de la resistencia a la carbonatación del concreto.

Constante de carbonatación	Calidad del concreto
$< 3 \text{ mm/año}^{1/2}$	Elevada resistencia a la carbonatación
$3 \text{ a } 6 \text{ mm/año}^{1/2}$	Calidad media con inicio de carbonatación
$> 6 \text{ mm/año}^{1/2}$	Muy baja resistencia a la carbonatación

6. RESULTADOS Y DISCUSIONES

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos en la metodología, tales como, el análisis de ciclo de vida del concreto tradicional vs concreto ecológico, las pruebas destructivas, no destructivas, y las pruebas de durabilidad a los especímenes de las distintas mezclas de concreto, los cuales se muestran en tablas y gráficas comparativas para facilitar la apreciación de los resultados obtenidos y así poder evaluar el comportamiento del concreto con desechos de vidrio y compararlo con el concreto testigo a distintas edades de prueba.

6.1. Análisis de ciclo de vida (Evaluación del impacto)

En este apartado se mostrarán los resultados de la evaluación del impacto del ciclo de vida del concreto tradicional comparándolo con el concreto ecológico elaborado a partir de



“CONCRETO ECOLÓGICO ELABORADO A PARTIR DE DESECHOS DE VIDRIO COMO SUSTITUTO PARCIAL DE LOS AGREGADOS FINOS Y GRUESOS”

desechos de vidrio. Se harán gráficos del impacto ambiental global y el impacto ambiental por categoría para ambos concretos.

6.1.1. Caracterización del impacto ambiental global

La figura 118, presenta el impacto ambiental global con enfoque de ciclo de vida de la creación del concreto tradicional. De acuerdo con los resultados globales, en la obtención de materias primas se concentró el 50% y en la manufactura el 35% de la huella ambiental.

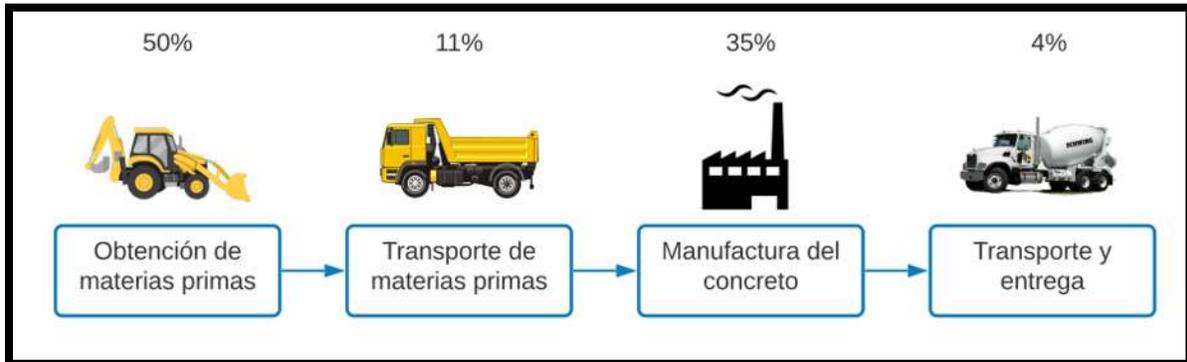


Figura 119.- Huella ambiental del escenario del concreto tradicional. (Contreras, 2023)

La figura 119, presenta el impacto ambiental global con enfoque de ciclo de vida de la creación del concreto ecológico propuesto. De acuerdo con los resultados globales, en la obtención de materias primas se concentró el 43% y en la manufactura el 39% de la huella ambiental.

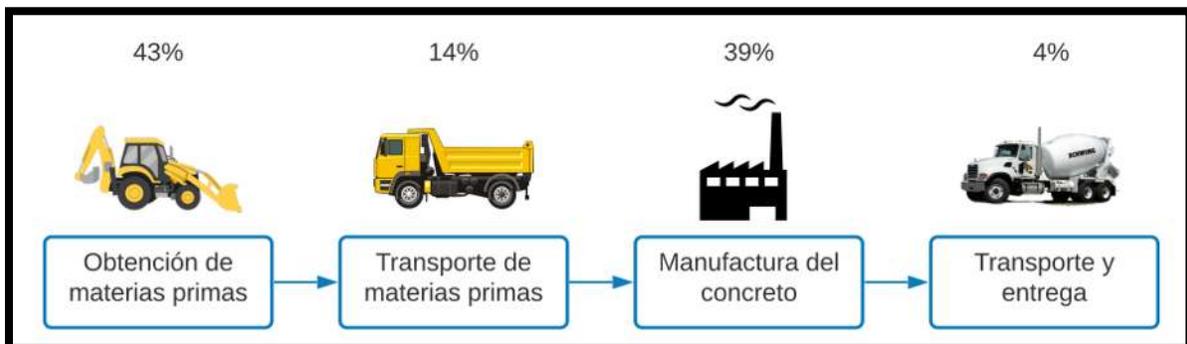


Figura 120.- Huella ambiental del escenario del concreto ecológico. (Contreras, 2023)

En las figuras 120 y 121, muestra la distribución del impacto ambiental de los procesos unitarios incluidos en el escenario de creación de concreto tradicional (escenario A) y el escenario propuesto de la creación de concreto ecológico (escenario B). En el escenario del concreto tradicional el proceso de obtención de materias primas representó más del 50% en



“CONCRETO ECOLÓGICO ELABORADO A PARTIR DE DESECHOS DE VIDRIO COMO SUSTITUTO PARCIAL DE LOS AGREGADOS FINOS Y GRUESOS”

casi todas las categorías de impacto. Por otra parte, se observa la distribución de los impactos ambientales de los procesos unitarios del escenario del concreto ecológico, en el cual se observa que el proceso de obtención de materias primas representó más del 40% en casi todas las categorías de impacto. Se puede observar tres cargas ambientales evitadas en las categorías de acidificación terrestre, agotamiento de recursos fósiles y agotamiento de recursos minerales, esto debido al reciclaje del vidrio (evitando químicos contaminantes y que se use para la producción de vidrio virgen) y a utilizar menor cantidades de material pétreo (arena y grava). También por el reciclaje del vidrio se puede observar la disminución de las emisiones en algunas otras categorías de impacto.

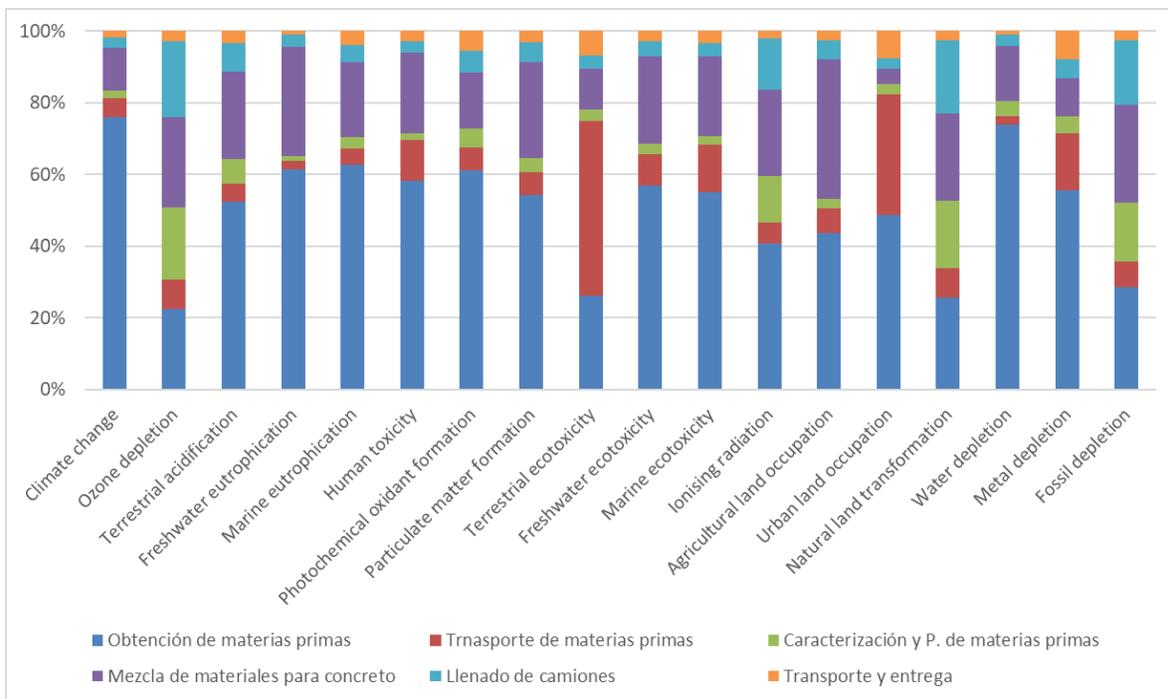


Figura 121.- Potenciales impactos ambientales del escenario de creación del concreto tradicional.

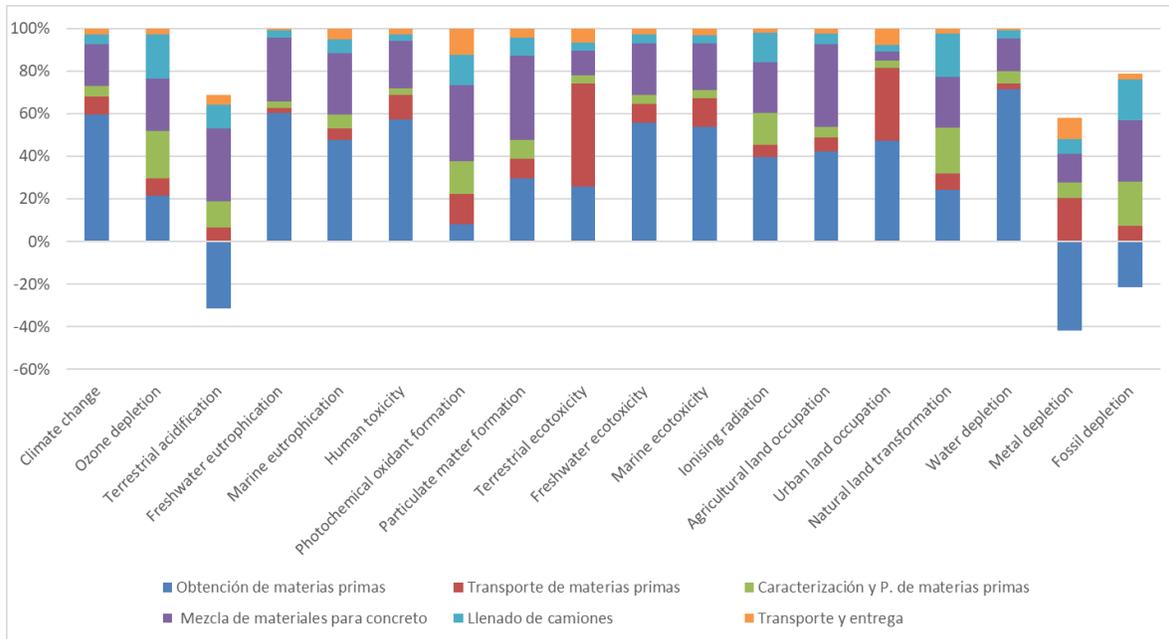


Figura 122.- Potenciales impactos ambientales del escenario de creación del concreto ecológico.

6.1.2. Impacto ambiental por categoría

6.1.2.1. Ecotoxicidad marina

La ecotoxicidad marina se basa en los impactos tóxicos que afectan a las aguas marinas, que son nocivos para distintas especies y que cambian la estructura y función del ecosistema. Es el resultado de una serie de diferentes mecanismos toxicológicos provocados por la liberación de sustancias con un efecto directo sobre la salud del ecosistema.

- **Escenario concreto tradicional**

En la figura 122, se observa el potencial de Ecotoxicidad marina relacionado con el escenario de la creación de concreto tradicional. De acuerdo con el análisis, se estima que en total se emiten 1.034 kg de 1,4 DB eq, siendo la obtención de materias primas y la mezcla de materiales los procesos unitarios que ocuparon la mayor parte del impacto hacia esta categoría. Los materiales mayormente relacionados con la Ecotoxicidad marina fueron el Clinker de la producción del cemento y la electricidad usada por la planta de concreto.

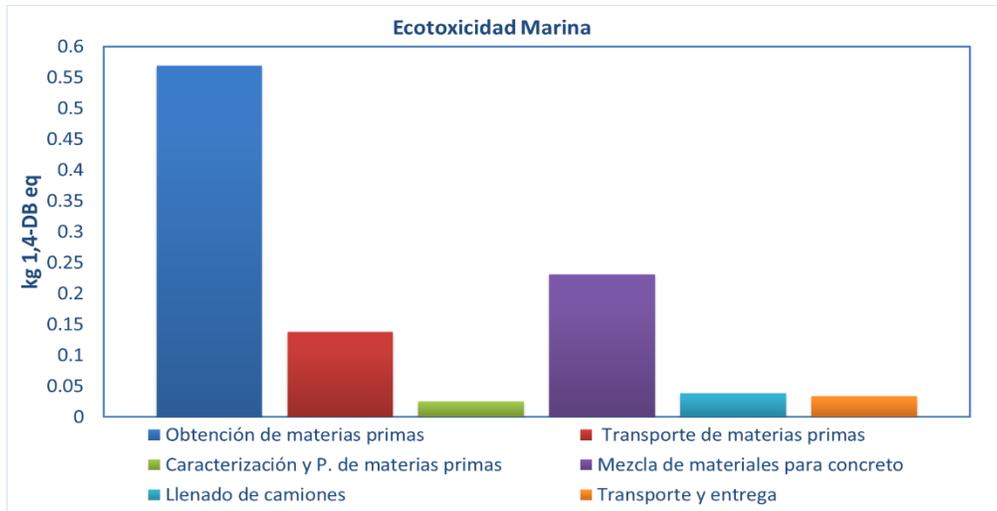


Figura 123.- Impacto a toxicidad marina del concreto tradicional.

- **Escenario concreto ecológico**

En el escenario de la creación de concreto ecológico se evita un poco la emisión de este impacto (figura 123) por el reciclaje del vidrio, con un valor total de 1.021 kg de 1,4 DB eq. De igual forma en este escenario los materiales que mayormente impactan son el Clinker del cemento y la electricidad.

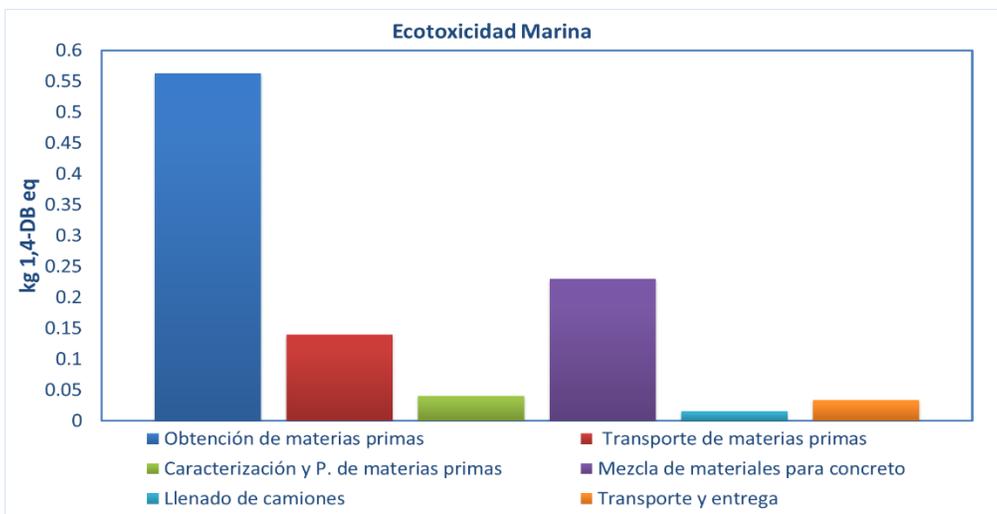


Figura 124.- Impacto a toxicidad marina del concreto ecológico.

6.1.2.2. Ecotoxicidad en agua fresca

La ecotoxicidad de agua dulce se basa en los impactos tóxicos que afectan al agua dulce, que son nocivos para distintas especies y que cambian la estructura y función del ecosistema.



Es el resultado de una serie de diferentes mecanismos toxicológicos provocados por la liberación de sustancias con un efecto directo sobre la salud del ecosistema.

- **Escenario concreto tradicional**

Se estima que el escenario del concreto tradicional tiene el potencial de emitir un total de 1.054 kg de 1,4 DB eq (figura 124), debido principalmente a la obtención de materias primas, dentro de este el que más afecta es el Clinker de la producción del cemento y la extracción de la arena.

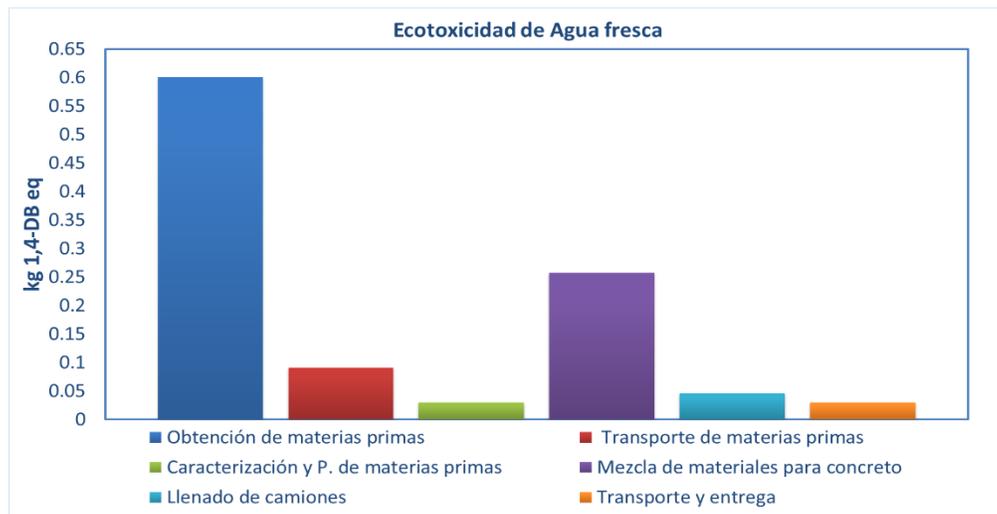


Figura 125.- Impacto a ecotoxicidad de agua fresca del concreto tradicional.

- **Escenario del concreto ecológico**

En el escenario de la creación de concreto ecológico se evita un poco la emisión de este impacto (figura 125) por el reciclaje del vidrio, con un valor total de 1.038 kg de 1,4 DB eq. De igual forma en este escenario lo que mayormente impactan son el Clinker del cemento y la extracción de la arena.

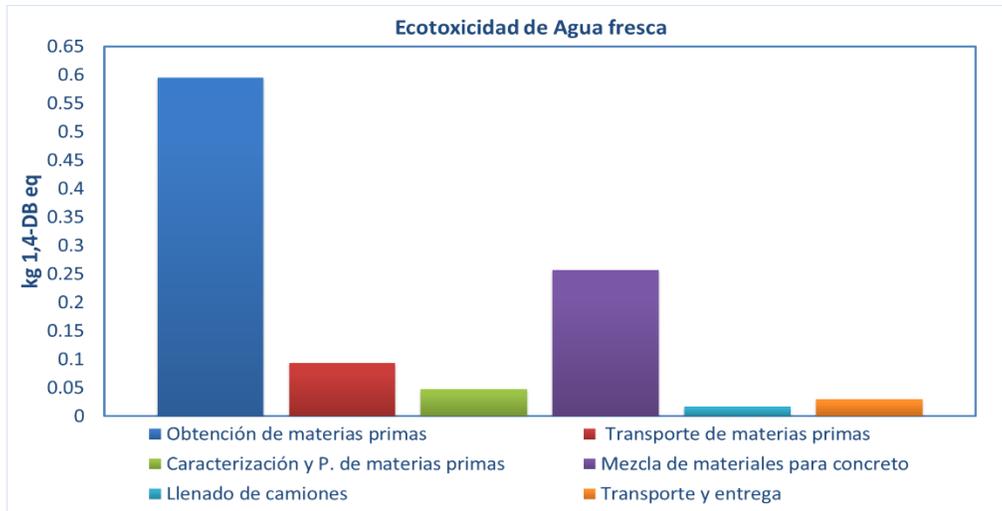


Figura 126.- Impacto a ecotoxicidad en agua fresca del concreto ecológico.

6.1.2.3. Eutrofización en agua fresca

La eutrofización es el proceso de contaminación más importante de las aguas en lagos, balsas, ríos, embalses, etc. Este proceso está provocado por el exceso de nutrientes en el agua. Los nutrientes procedentes de vertidos de agua marina aceleran el crecimiento de las algas y demás vegetación en el agua. La degradación de la materia orgánica consume el oxígeno, lo que provoca una deficiencia de esta sustancia y, en algunos casos, la muerte de los peces. La eutrofización traduce la cantidad de sustancias emitidas a una medida común expresada como el oxígeno necesario para la degradación de la biomasa muerta.

- **Escenario concreto tradicional**

La figura 126 presenta el potencial de Eutrofización de agua fresca relacionado con el escenario de concreto tradicional. De acuerdo a los resultados, este escenario emite un total de 0.429 kg P eq, siendo la obtención de materias primas y la mezcla de materiales son los procesos unitarios que ocuparon la mayor parte del impacto hacia esta categoría.

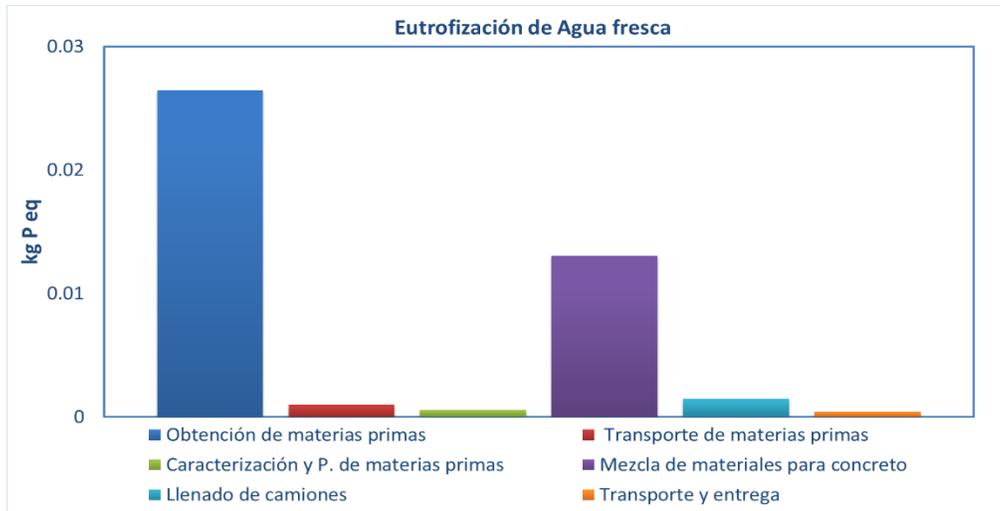


Figura 127.- Impacto a eutrofización en agua fresca del concreto tradicional.

- **Escenario concreto ecológico**

En el escenario de la creación de concreto ecológico aumenta un poco la emisión de este impacto como se puede observar en la figura 127, con un valor total de 0.431 kg P eq, esto debido a la electricidad y gas LP utilizados en la caracterización y preparación de los materiales para la molienda del vidrio, de igual forma la obtención de materias primas y la mezcla de materiales son los procesos unitarios que ocuparon la mayor parte del impacto hacia esta categoría.

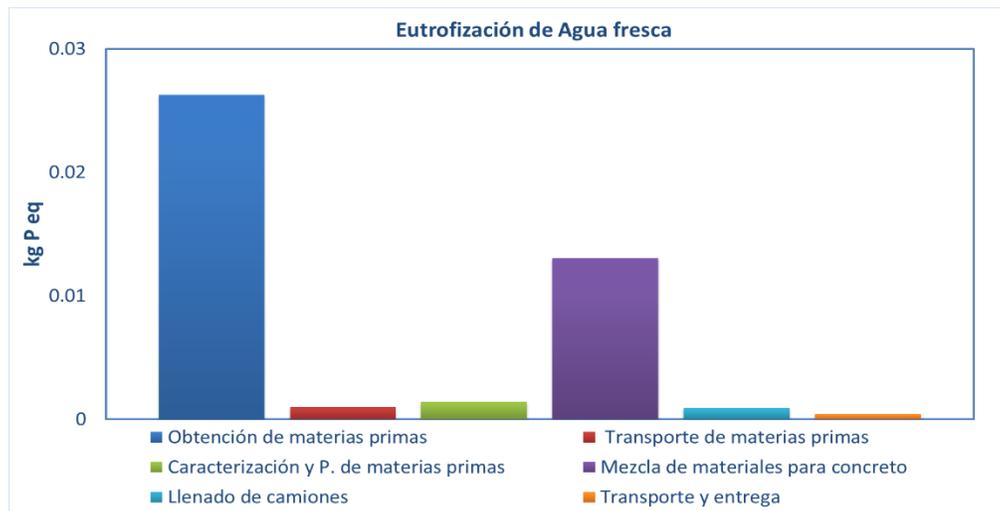


Figura 128.- Impacto a eutrofización en agua dulce del concreto ecológico.



6.1.2.4. Cambio climático

El potencial de calentamiento global es la capacidad de un gas de efecto invernadero de influir en el forzamiento radiactivo, expresada en términos de una sustancia de referencia y de un horizonte temporal. Relacionado con la capacidad de influir en los cambios de la temperatura media mundial en la interfaz superficie-aire y en parámetros climáticos y sus efectos. Esto puede ser debido a causas naturales, pero principalmente a la acción humana.

- **Escenario de concreto tradicional**

La figura 128, muestra el impacto potencial a la categoría de cambio climático del escenario de creación de concreto tradicional. De acuerdo con los resultados, se emite un total de 227.67 kg CO₂ eq referente a 1 tonelada de dicho concreto. La obtención de materias primas es la responsable del 76 % de dichas emisiones, siendo el Clinker de la producción del cemento el material que más afecta en esta categoría, al cual le corresponde el 92 % de las emisiones de este proceso.

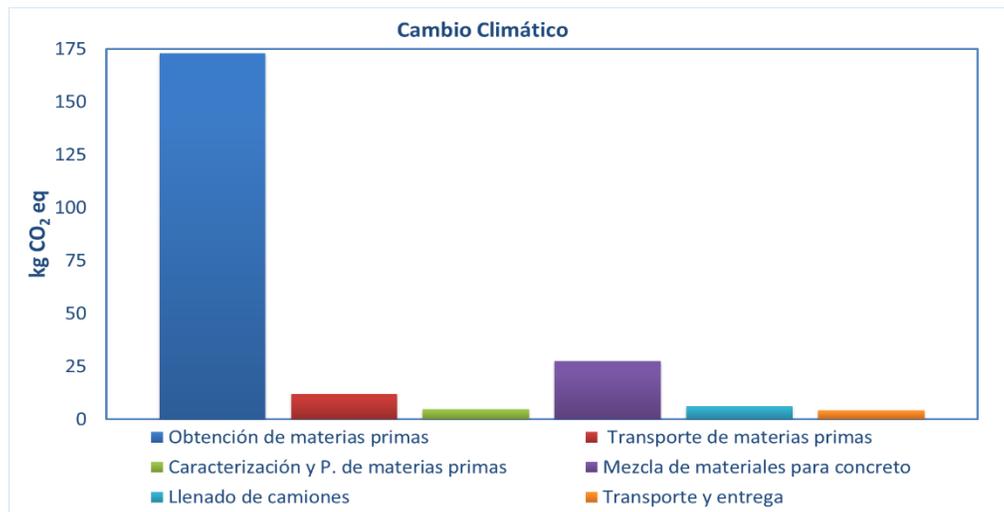


Figura 129.- Impacto al cambio climático del concreto tradicional.

- **Escenario de concreto ecológico**

El potencial de cambio climático asociado al escenario de la creación del concreto ecológico se muestra en la figura 129. De acuerdo con los resultados, el reciclaje del vidrio y el preservar una parte de los agregados pétreos reduce un 40.81 % el impacto al cambio climático de este escenario, es decir, evitaría una emisión de 92.92 kg de CO₂ eq, dándonos



un valor total de esta emisión de 134.75 kg CO₂ eq, esto debido a que evita químicos contaminantes y la producción de nuevo vidrio. Por otra parte, el material que mostro la mayor emisión es el Clinker de la producción del cemento.

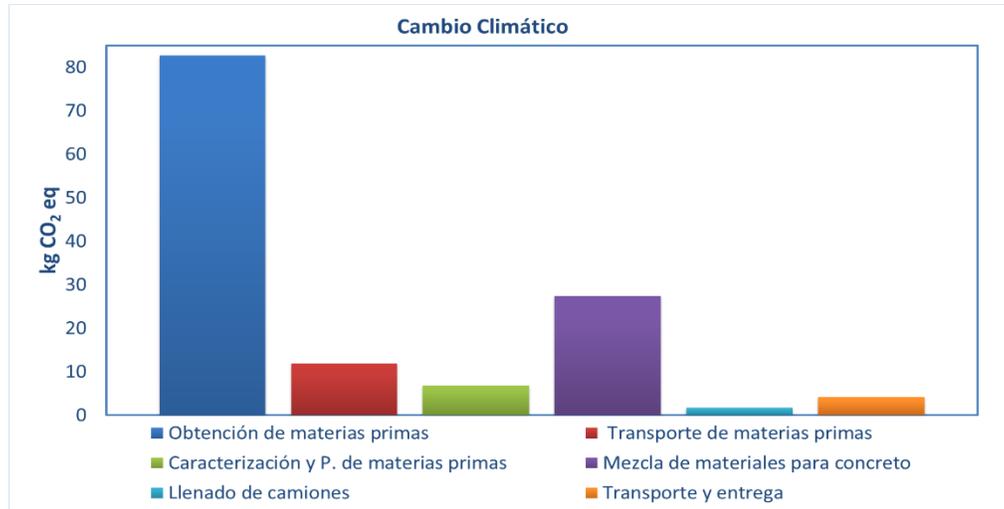


Figura 130.- Impacto al cambio climático del concreto ecológico.

6.1.2.5. Acidificación terrestre

La acidificación terrestre puede definirse como la pérdida de la capacidad neutralizante del suelo, debido a la presencia de sustancias acidificantes en la superficie terrestre. Las emisiones de óxidos de azufre dan lugar a la liberación de iones de hidrógeno cuando los gases se mineralizan, contribuyendo así a la acidificación del suelo.

- **Escenario concreto tradicional**

De acuerdo a figura 130, se estimó un impacto potencial para el escenario de creación de concreto tradicional a la acidificación terrestre de 0.622 kg SO₂ eq. Dichas emisiones se relacionan principalmente a la obtención de materias primas y la mezcla de materiales para el concreto. Los materiales con mayor impacto a la acidificación terrestre nuevamente es el Clinker de la producción del cemento y la electricidad usada por la planta de concreto.

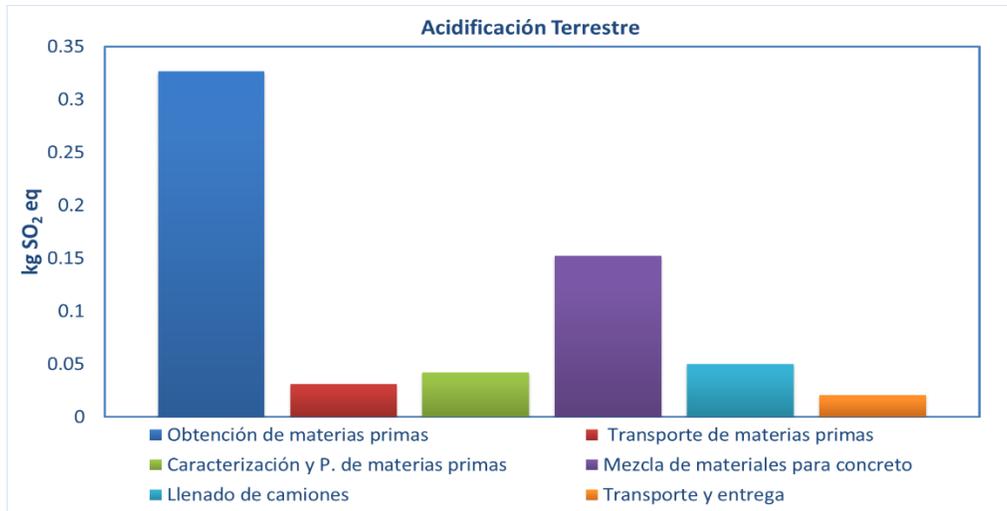


Figura 131.- Impacto a acidificación terrestre del concreto tradicional.

- **Escenario concreto ecológico**

El escenario de la creación de concreto ecológico, tuvo un impacto potencial a la acidificación terrestre de 0.125 kg SO₂ eq (figura 131). Sin embargo, se tiene una carga evitada de 0.497 kg SO₂ eq debido al reciclaje del vidrio, reduciendo el impacto ambiental hacia esta categoría en un 79.83 %.

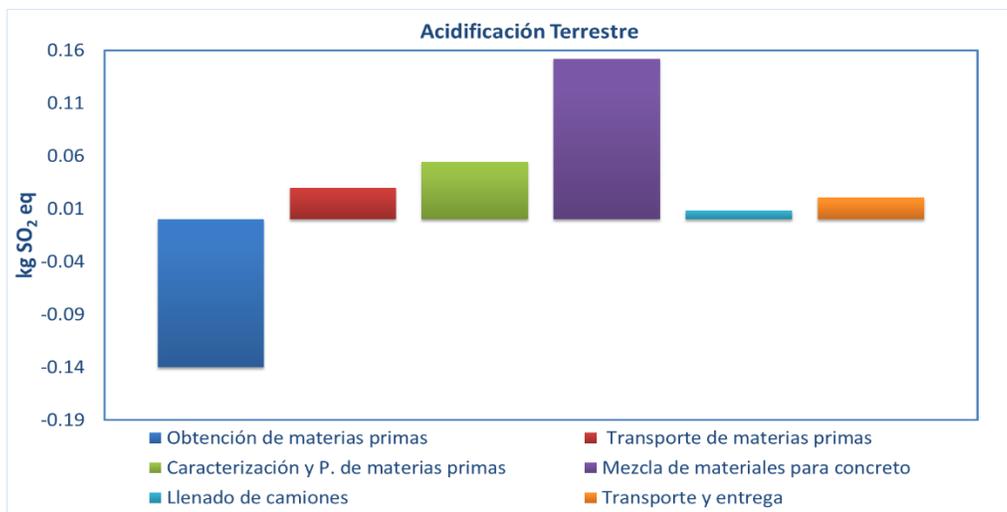


Figura 132.- Impacto a acidificación terrestre del concreto ecológico.

6.1.2.6. Agotamiento de recursos fósiles

Esta categoría de impacto ambiental se refiere al uso de combustibles procedentes del petróleo, del carbón o del gas natural no renovable.



- **Escenario concreto tradicional**

La figura 132, muestra el potencial de agotamiento sobre los recursos fósiles asociados al escenario de creación de concreto tradicional. De acuerdo con los resultados, se requieren 60.59 kg oil eq en este escenario. El impacto sobre la escasez de recursos fósiles, es principalmente sobre el uso de diésel, electricidad y la producción de Clinker.

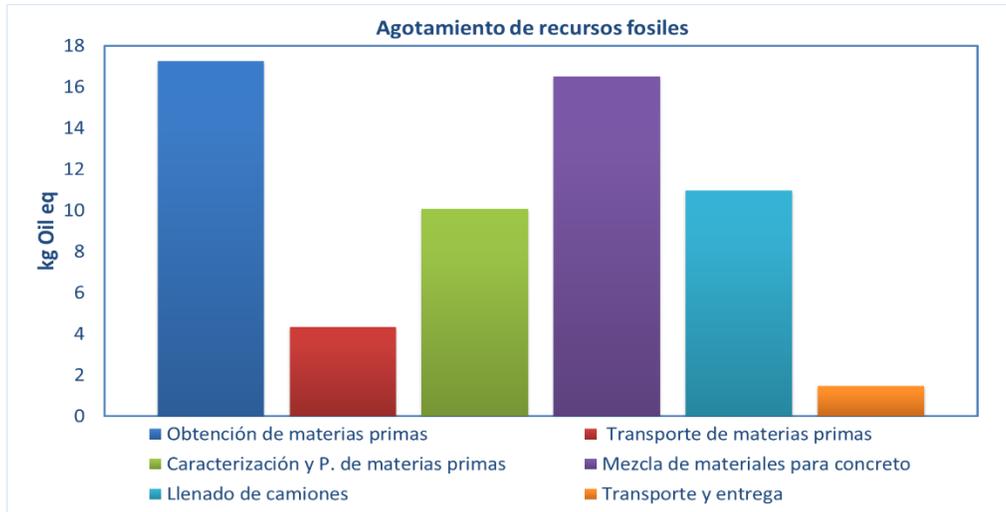


Figura 133.- Impacto al agotamiento de recursos fósiles del concreto tradicional.

- **Escenario concreto ecológico**

La figura 133, muestra el potencial de agotamiento sobre los recursos fósiles asociados al escenario de creación de concreto ecológico. De acuerdo a los resultados, el análisis muestra que se evitan 38.32 kg de oil eq debido al reciclaje del vidrio, lo cual representa una disminución del 63.23 % de esta emisión.

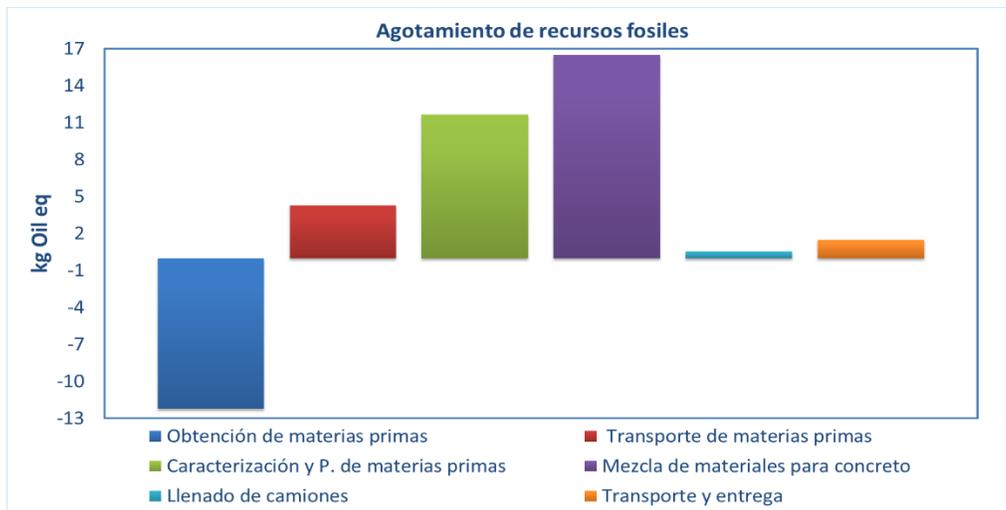


Figura 134.- Impacto al agotamiento de recursos fósiles del concreto ecológico.



6.1.2.7. Agotamiento de recursos minerales

Esta categoría de impacto ambiental se refiere al Agotamiento de recursos minerales tales como metales o rocas. Hace referencia al consumo de materiales extraídos de la naturaleza (medido en peso).

- **Escenario concreto tradicional**

La figura 134, muestra el potencial de agotamiento sobre los recursos minerales asociados al escenario de creación de concreto tradicional. De acuerdo a los resultados, se requiere 2.83 kg de Fe eq en este escenario.

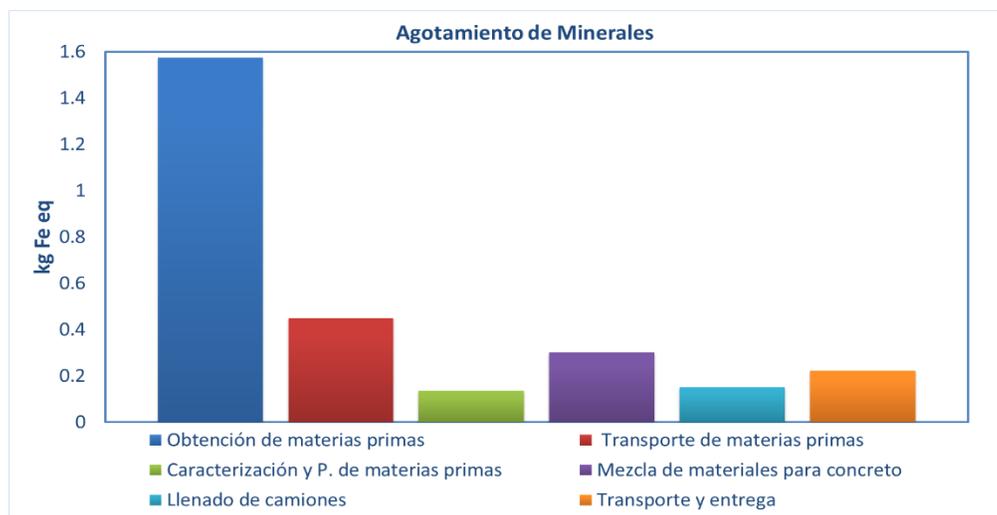


Figura 135.- Impacto a agotamiento de recursos minerales del concreto tradicional.

- **Escenario concreto ecológico**

La figura 135, muestra el potencial de agotamiento sobre los recursos minerales asociados al escenario de creación de concreto ecológico. De acuerdo a los resultados, el análisis muestra que se evitan 2.62 kg de Fe eq debido al reciclaje del vidrio y a preservar los recursos pétreos, lo cual representa una disminución del 92.33 % de esta emisión.

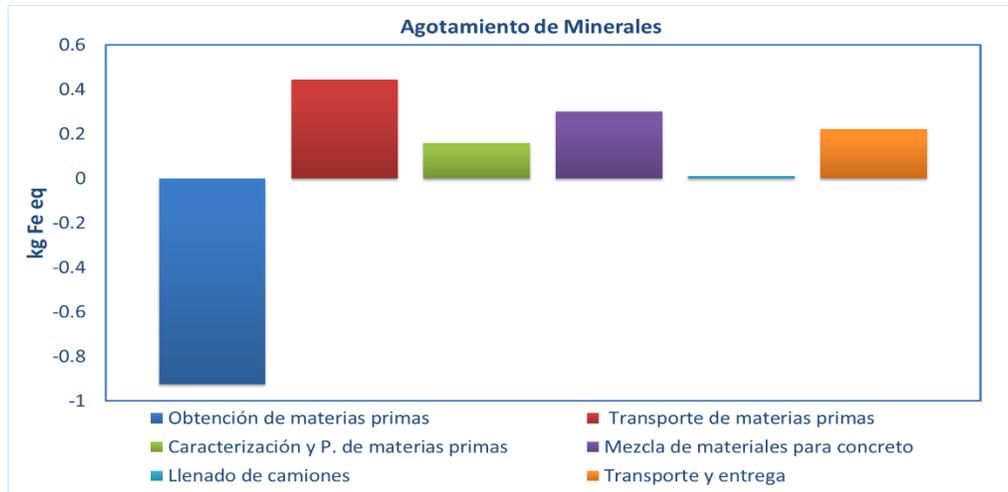


Figura 136.- Impacto a agotamiento de recursos minerales del concreto ecológico.

De acuerdo a todo lo anterior, podemos decir que el escenario de la creación del concreto tradicional reduce de manera significativa los potenciales impactos al medio ambiente, esto debido principalmente por el reciclaje de los desechos de vidrio y de preservar los recursos naturales como la arena y la grava.

6.2. Propiedades del concreto primera etapa

6.2.1. Propiedades del concreto en estado fresco

Posterior a la fabricación de cada una de las mezclas y antes de proceder con la elaboración de los especímenes de prueba, se obtuvo el revenimiento de cada una de las mezclas.

Las once mezclas de concreto fueron nombradas e identificadas como a continuación se presenta:

1. **M-T:** Mezcla testigo o mezcla de concreto tradicional.
2. **Arena 10%:** Mezcla de concreto con sustitución de la arena del 10% por vidrio molido.
3. **Arena 20%:** Mezcla de concreto con sustitución de la arena del 20% por vidrio molido.
4. **Arena 30%:** Mezcla de concreto con sustitución de la arena del 30% por vidrio molido.
5. **Grava 10%:** Mezcla de concreto con sustitución de la grava del 10% por vidrio triturado.



6. **Grava 20%:** Mezcla de concreto con sustitución de la grava del 20% por vidrio triturado.
7. **Grava 30%:** Mezcla de concreto con sustitución de la grava del 30% por vidrio triturado.
8. **Arena y grava 10% y 10%:** Mezcla de concreto con sustitución de la arena del 10% y de la grava del 10% por vidrio molido y vidrio triturado respectivamente.
9. **Arena y grava 15% y 15%:** Mezcla de concreto con sustitución de la arena del 15% y de la grava del 15% por vidrio molido y vidrio triturado respectivamente.
10. **Arena y grava 10% y 20%:** Mezcla de concreto con sustitución de la arena del 10% y de la grava del 20% por vidrio molido y vidrio triturado respectivamente.
11. **Arena y grava 20% y 10%:** Mezcla de concreto con sustitución de la arena del 20% y de la grava del 10% por vidrio molido y vidrio triturado respectivamente.

6.2.1.2. Revenimiento

Para la prueba de revenimiento se mostrarán los resultados obtenidos para las once mezclas de la primera etapa.

A continuación, se muestran los resultados para el revenimiento de las 11 mezclas de concreto correspondientes a la primera etapa de la elaboración de mezclas de concreto.

Tabla 56.- Resultados del revenimiento en las mezclas de la primera etapa.

Revenimiento			
Mezcla	Revenimiento nominal (cm)	Revenimiento real (cm)	Tolerancia (cm)
M-T	10	11	2.5
Arena 10%	10	10	2.5
Arena 20%	10	9.5	2.5
Arena 30%	10	9.5	2.5
Grava 10%	10	10	2.5
Grava 20%	10	10	2.5
Grava 30%	10	11	2.5
Arena y grava 10% y 10%	10	10.5	2.5
Arena y grava 15% y 15%	10	10	2.5
Arena y grava 10% y 20%	10	10	2.5
Arena y grava 20% y 10%	10	10	2.5



6.2.2. Propiedades del concreto en estado endurecido

En este apartado, se mostrarán los resultados para la primera etapa, en la cual la única prueba destructiva es la de resistencia a compresión, de la cual se obtendrán los porcentajes de mejor comportamiento, también se mostrarán los resultados de las no destructivas, tales como, velocidad de pulso ultrasónico y resistividad eléctrica.

6.2.2.1. Resistencia a compresión

La resistencia a compresión de los concretos producidos en esta etapa fueron con una resistencia de diseño de 250 kg/cm². La resistencia fue evaluada en cilindros de 10 cm de diámetro por 20 cm de altura, a las edades de 28 y 60 días (tres especímenes por edad). A continuación, se muestran los resultados promedio obtenidos para las once mezclas.

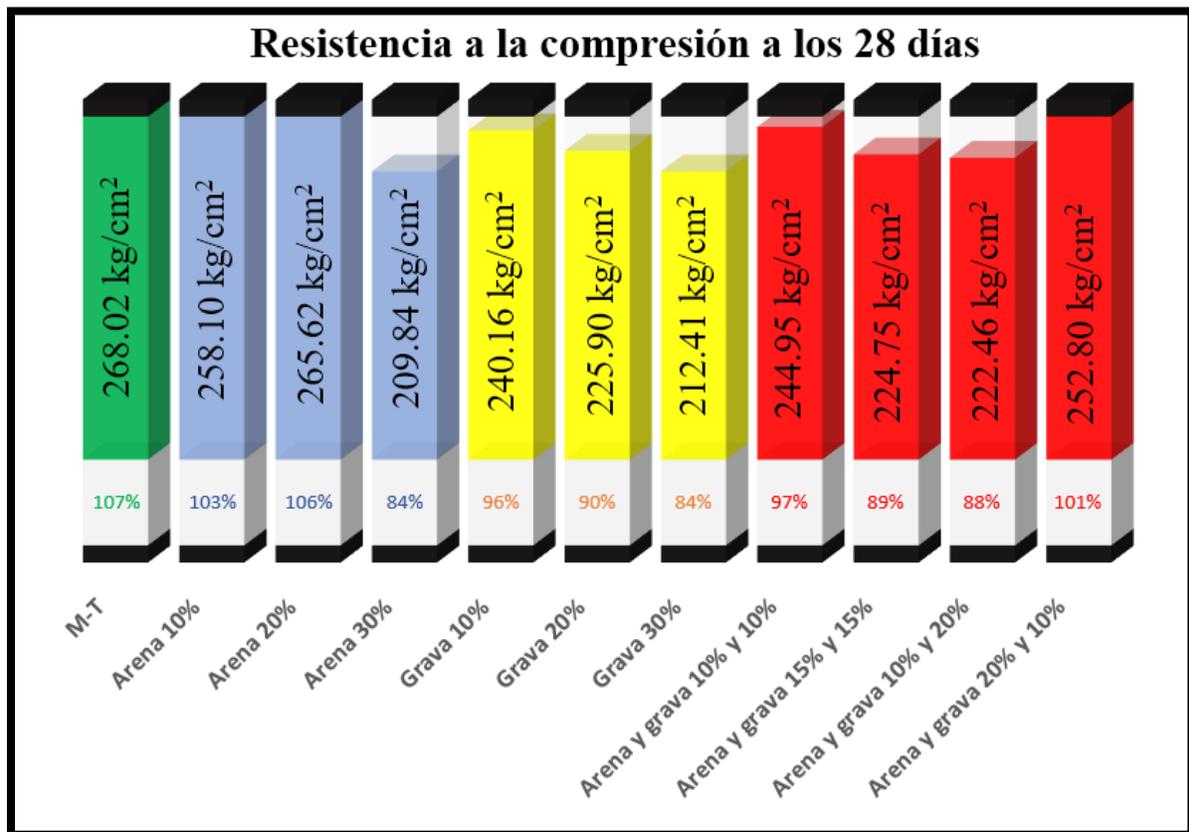


Figura 137.- Resistencia a compresión en cilindros de 10 cm x 20 cm a los 28 días.

De acuerdo a la figura 136 podemos observar que a los 28 días las mezclas testigo, arena 10 %, arena 20 %, grava 10 %, arena y grava 10 y 10 % y arena y grava 20 y 10 % cumplen con la resistencia a la que fueron diseñados, se puede observar que si sustituimos más del



20% de grava o arena por vidrio triturado o vidrio molido respectivamente la resistencia disminuye.

Figura 138.- Resistencia a compresión en cilindros de 10 cm x 20 cm a los 28 días.



De acuerdo a lo observado en la figura 137 las mezclas que presentaron mejores resultados a los 60 días fueron la mezcla testigo alcanzando un valor de 269.93 kg/cm² (107% del f'c de diseño), la mezcla arena 20% alcanzando un valor de 268.04 kg/cm² (107% del f'c de diseño), la mezcla grava 10% alcanzando un valor de 247.81 kg/cm² (99% del f'c de diseño) y la mezcla arena y grava 20% y 10% con un valor de 257.91 kg/cm² (100% del f'c de diseño). Estas cuatro mezclas que presentaron los mejores resultados son de las que se partirá para la elaboración de las mezclas correspondientes a la segunda etapa. Cabe destacar que de los 28 a los 60 días de prueba la resistencia gana un poco más de resistencia.

6.2.2.2. Velocidad de pulso ultrasónico (VPU)

Los resultados para esta prueba fueron obtenidos para cilindros de 10 x 20 cm a la edad de 28 y 60 días, para cada una de las once mezclas se evaluó con tres especímenes por edad. Esta prueba nos da una idea de la calidad del concreto sin necesidad de destruir el espécimen.



6.3. Propiedades del concreto segunda etapa

6.3.1. Propiedades del concreto en estado fresco

Posteriormente de la elaboración de cada una de las mezclas y antes de proceder con la fabricación de los especímenes de prueba, se determinó el revenimiento de cada una de las mezclas.

Las 4 mezclas seleccionadas para esta segunda etapa producto de los mejores resultados de la prueba de resistencia a compresión de la primera etapa se enlistan a continuación:

1. **M-T:** Mezcla testigo o mezcla de concreto tradicional.
2. **Arena 20%:** Mezcla de concreto con sustitución de la arena del 20% por vidrio molido.
3. **Grava 10%:** Mezcla de concreto con sustitución de la grava del 10% por vidrio triturado.
4. **Arena y grava 20% y 10%:** Mezcla de concreto con sustitución de la arena del 20% y de la grava del 10% por vidrio molido y vidrio triturado respectivamente.

6.3.1.1. Revenimiento

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en la prueba de revenimiento de cada una de las 4 mezclas, el cual se obtuvo posterior a la elaboración de cada mezcla y antes de colocarse en los especímenes.

Tabla 57.- Resultados del revenimiento en las mezclas de la segunda etapa.

Revenimiento			
Mezcla	Revenimiento nominal (cm)	Revenimiento real (cm)	Tolerancia (cm)
M-T	10	9.0	2.5
Arena 20%	10	10	2.5
Grava 10%	10	11	2.5
Arena y grava 20% y 10%	10	10	2.5

De acuerdo a la tabla 57 podemos observar que los valores de revenimiento de las 4 mezclas se encuentran dentro de la tolerancia especificada en la norma NMX-C-156-



ONNCCE-2010 respecto al revenimiento nominal de diseño y se puede decir que todas las mezclas tienen el contenido de agua óptimo.

6.3.2. Propiedades del concreto en estado endurecido

En este apartado, se mostrarán los resultados que se obtengan de las pruebas destructivas, no destructivas y de durabilidad enlistadas en el apartado 8.4.2.

6.3.2.1. Resistividad eléctrica

Los resultados para esta prueba fueron obtenidos para cilindros de 10 x 20 cm, para cilindros de 15 x 30 cm y para vigas de 15 x 15 x 60 cm, cada uno se evaluó con cinco especímenes por edad. Para los especímenes cilíndricos de 10 x 20 cm se realizó la prueba a edades de 7, 28, 60 y 90 días, por otro lado, los cilindros de 15 x 30 cm y las vigas de 15 x 15 x 60 cm se les realizó la prueba a las edades de 28 y 60 días. Esta prueba nos da una idea del riesgo de corrosión que tendrá el acero de refuerzo dentro del concreto.

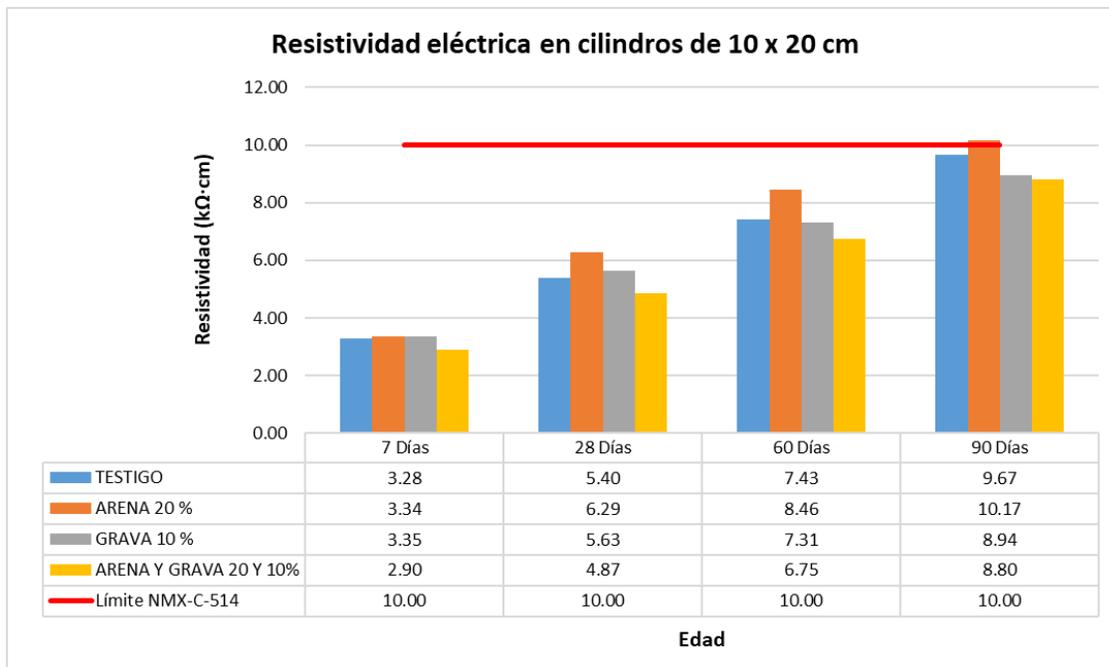


Figura 139.- Resistividad eléctrica en cilindros de 10 x 20cm.

De acuerdo a la figura 138 se puede observar que los especímenes presentan un leve incremento en el valor de resistividad eléctrica con el paso de los días, sin embargo, todas las mezclas se encuentran por debajo del límite mínimo especificado en la norma NMX-C-514-ONNCCE-2019, es decir, todas las mezclas presentan una porosidad interconectada excesiva, permitiendo el paso de agentes agresivos. La mezcla con los valores más bajos en



todas las edades de prueba es la de arena y grava 20 y 10 % y la de mejor comportamiento es la mezcla de arena 20 %.

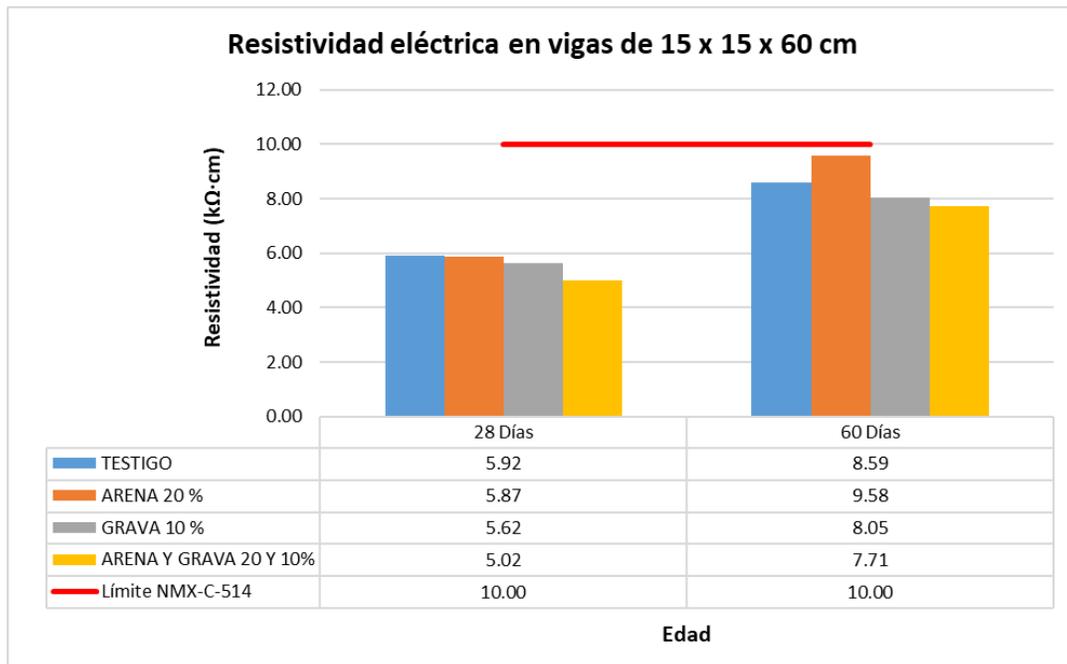


Figura 140.- Resistividad eléctrica en vigas de 15 x 15 x60 cm.

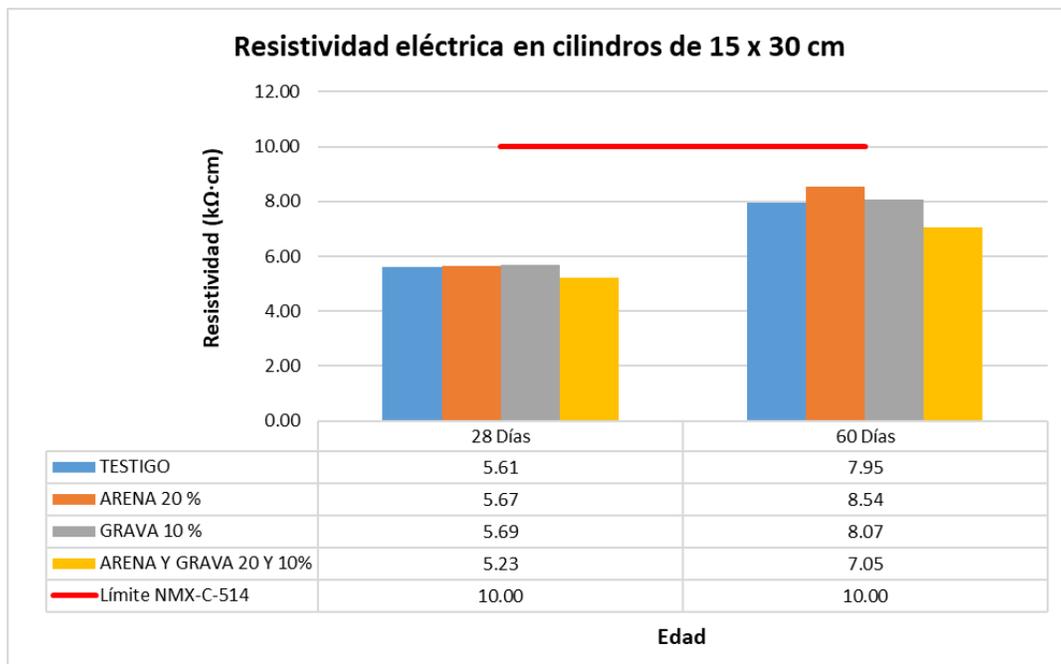


Figura 141.- Resistividad eléctrica en cilindros de 15 x 30cm.



De acuerdo a las figuras 139 y 140 correspondientes a cilindros de 15 x 30 cm y a vigas de 15 x 15 x 60 cm, podemos observar que se presenta un comportamiento muy similar a los especímenes de 10 x 20 cm en las edades de 28 y 60 días, de igual forma se presenta mejoría con el paso de los días más sin embargo todas las mezclas se encuentran en el rango de porosidad interconectada excesiva. La mezcla de mejor comportamiento es la de arena 20% y la mezcla con los valores más bajos es la de arena y grava 20 y 10 %.

6.3.2.2. Resistencia a compresión

La resistencia a la compresión es la característica mecánica principal del concreto y se define como la capacidad para soportar una carga por unidad de área, y se expresa en términos de esfuerzo, generalmente en kg/cm². Para el caso de las mezclas de concreto de esta investigación se partió con un valor de diseño de 250 kg/cm² y la cual se evaluó en especímenes cilíndricos de 10 x 20 cm a 7, 28, 60 y 90 días de prueba.

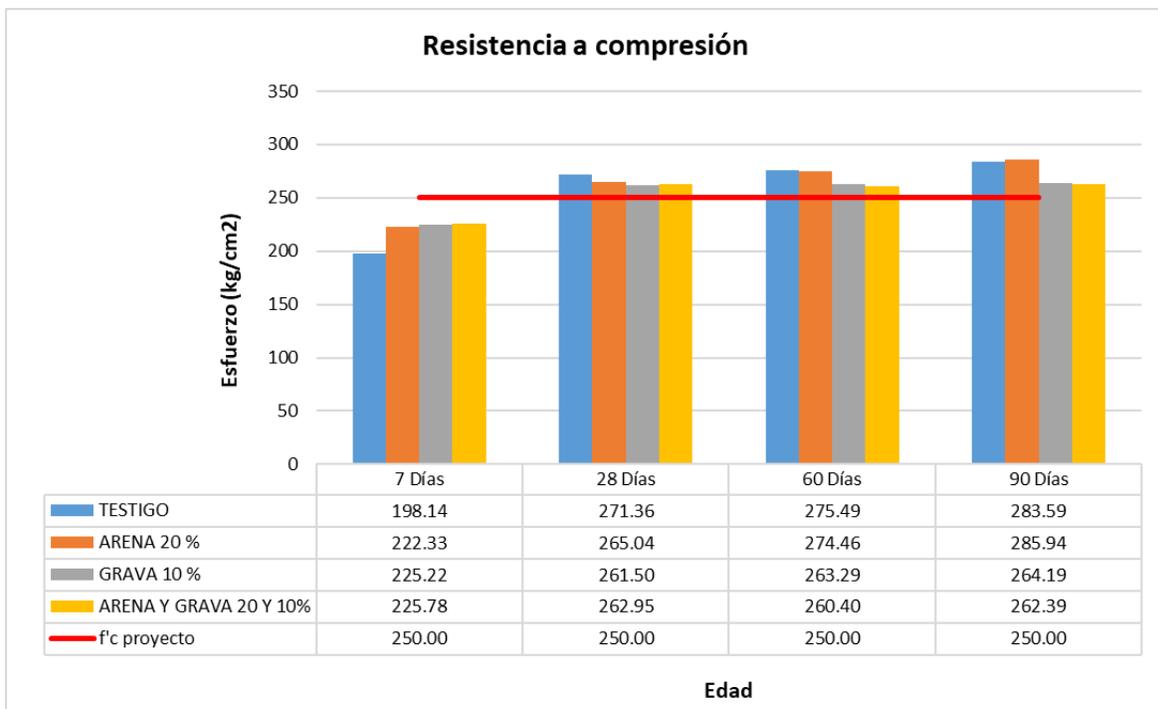


Figura 142.- Resistencia a compresión en cilindros de 10 x 20 cm.

De acuerdo a lo observado en la figura anterior, la sustitución de vidrio por agregado pétreo en las mezclas de concreto aceleró el desempeño mecánico a los 7 días en comparación con la mezcla testigo, sin embargo, todas las mezclas cumplen con la resistencia de diseño desde los 28 días hasta los 90 días, la mezcla Arena 20% fue la más sobresaliente con un



valor de 285.94 kg/cm² a los 90 días, por encima de la mezcla testigo, arena y grava 20 y 10% y grava 10% con valores de 283.59 kg/cm², 262.39 kg/cm² y 264.19 kg/cm² respectivamente.

6.3.2.3. Tensión por compresión diametral.

La resistencia a la tensión por compresión diametral en concreto de peso normal es aproximadamente de 8% a 12% de la resistencia compresión y se estima normalmente entre 1.3 y 2.2 veces la raíz cuadrada de la resistencia de diseño en kg/cm². Para el caso de la presente investigación los valores de tensión indirecta se deben encontrar entre 20.55 kg/cm² y 34.79 kg/cm² para cumplir con lo especificado.

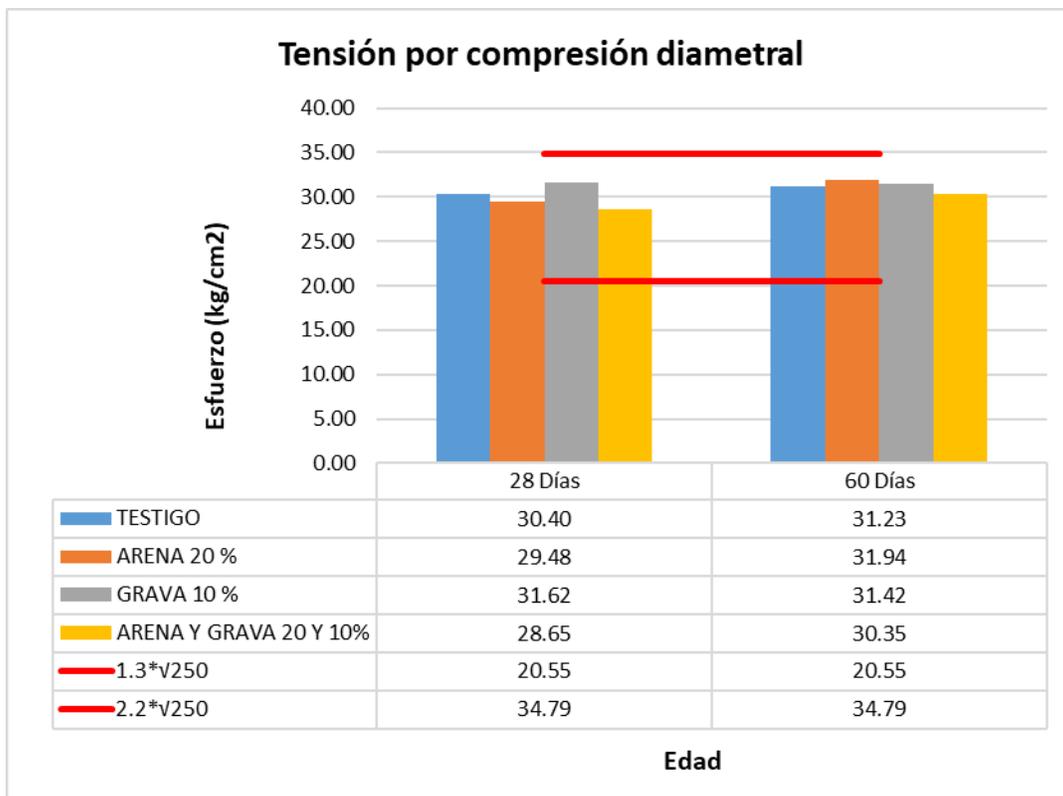


Figura 143.- Resistencia a la tensión por compresión diametral en cilindros de 15 x 30 cm.

De acuerdo a la figura anterior se puede observar que todas las mezclas cumplen con lo especificado desde los 28 días, la mezcla más sobresaliente a los 28 días fue las de grava 10% alcanzando un valor de 31.62 kg/cm² y la más sobresaliente a los 90 días fue la mezcla de arena 20% con un valor 31.94 kg/cm².



6.3.2.4. Módulo de ruptura

La resistencia a flexión o el módulo de ruptura se usa en el diseño de pavimentos u otras losas (pisos, placas) sobre el terreno. La resistencia a compresión, la cual es más fácil de medir que la resistencia a flexión, se puede usar como un índice de resistencia a flexión, una vez que la relación empírica entre ambas ha sido establecida para los materiales y los tamaños de los elementos involucrados. La resistencia a flexión de concretos de peso normal es normalmente del 1.99 a 2.65 veces la raíz cuadrada de la resistencia de diseño en kg/cm^2 . Para el caso de la presente investigación los valores de módulo de ruptura se deben encontrar entre 31.46 kg/cm^2 y 41.90 kg/cm^2 para cumplir con lo especificado.

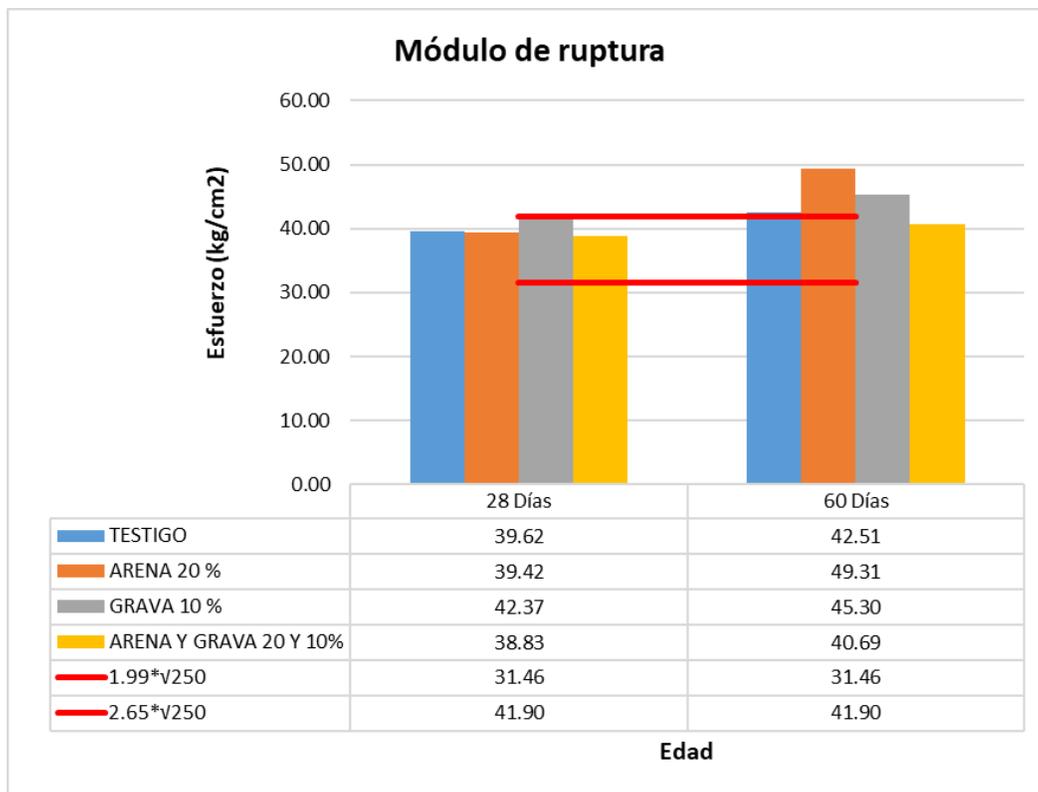


Figura 144.- Módulo de ruptura en vigas de 15 x 15 x60 cm.

De acuerdo a la figura anterior se puede observar que todas las mezclas cumplen con lo especificado desde los 28 días, la mezcla más sobresaliente a los 28 días fue las de grava 10% alcanzando un valor de 42.37 kg/cm^2 y la más sobresaliente a los 90 días fue la mezcla de arena 20% con un valor 49.31 kg/cm^2 .



6.3.2.5. Módulo de elasticidad estático

El módulo de elasticidad estático del concreto se determina a través de la prueba de resistencia a compresión a cada una de las edades especificadas y se define como la razón entre el esfuerzo normal a una deformación correspondiente. Para concretos de peso normal, el módulo de elasticidad varía de 140,000 a 420,000 kg/cm² y puede ser aproximado a 15,500 veces la raíz cuadrada de la resistencia de diseño en kg/cm².

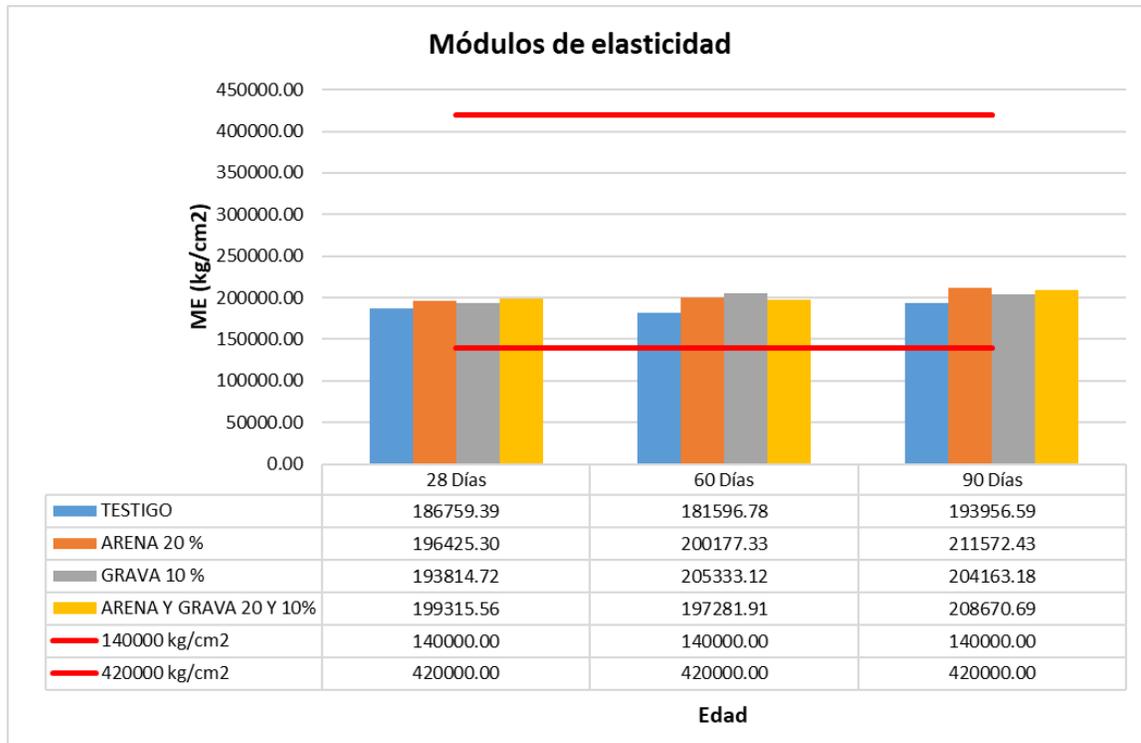


Figura 145.- Módulo de elasticidad estático en cilindros de 10 x 20 cm.

De acuerdo a la figura anterior se puede observar que todas las mezclas se encuentran dentro del rango especificado, es decir, que todas cumplen desde los 28 hasta los 90 días de prueba, la mezcla más sobresaliente a los 28 días fue la de arena y grava 20 y 10% alcanzando un valor de 199,315.56 kg/cm², a los 60 días la mezcla más sobresaliente fue la de grava 10% con un valor de 205,333.12 kg/cm² y a los 90 días la más sobresaliente fue la de arena 20% con un valor de 211,572.43 kg/cm², el cual es el valor máximo alcanzado en esta prueba. Cabe mencionar que la mezcla con el valor más desfavorable fue la testigo con un valor de 181,596.78 kg/cm².



6.3.2.6. Absorción capilar

6.3.2.7. Profundidad de carbonatación

La profundidad de carbonatación se obtuvo en mitades de viga de 15 x 15 x 60 cm expuestas al ambiente durante 190 días mediante el método de indicador ácido-base, dicha profundidad se obtuvo de obtener el promedio de las medidas de sus lados y descartando el lado que estuvo expuesto a los vientos dominantes.

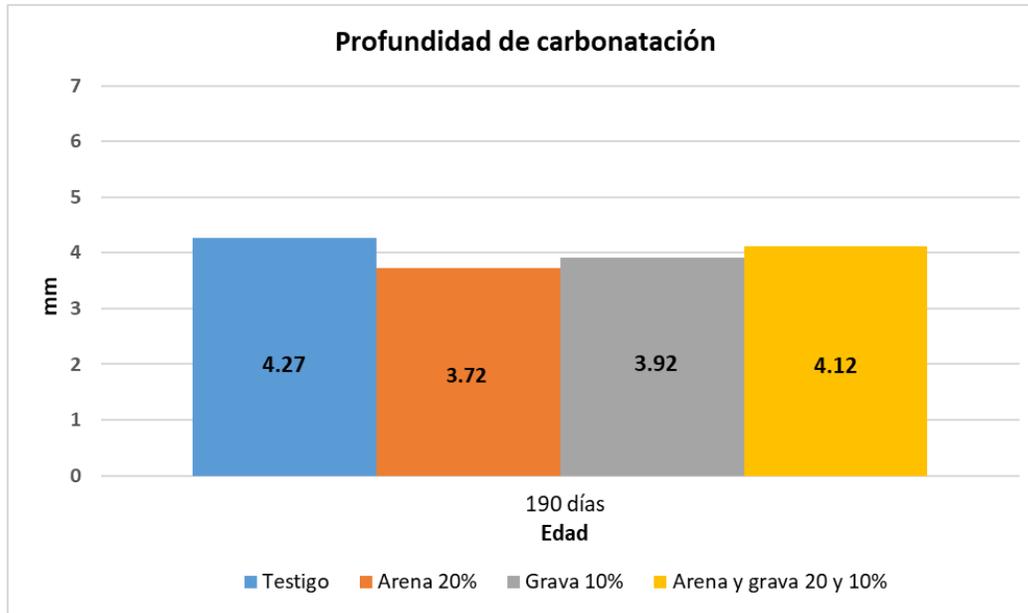


Figura 146.- Profundidad de carbonatación en mitades de viga a 190 días.

De acuerdo a lo observado en la figura anterior, la mezcla testigo es la que presenta una mayor carbonatación a los 190 días de exposición al ambiente, con un valor de 4.27 mm, la mezcla de arena y grava 20 y 10% es la segunda más desfavorable con un valor de 4.12 mm, las mezclas grava 10% y arena 20% presentaron los mejores resultados en esta prueba, con valores de 3.92 mm y 3.72 mm de carbonatación respectivamente.

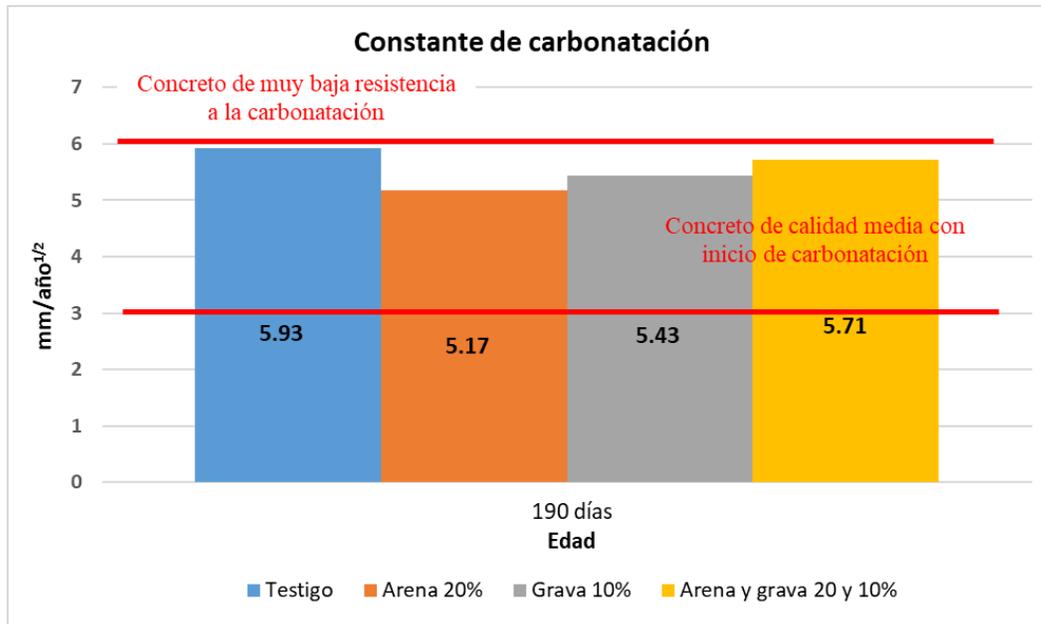


Figura 147.- Constante de carbonatación a 190 días.

Uno de los modelos más sencillos que nos permite predecir la velocidad de carbonatación de concreto armado es el que relaciona la profundidad de carbonatación con la raíz cuadrada del tiempo de exposición. La relación antes mencionada se conoce como constante de carbonatación, la cual se observa en la figura 146.

De acuerdo a lo especificado en la norma NMX-C-115-ONNCCE-2016 y al manual de la Red Durar, podemos observar en la figura 146 que todas las mezclas se encuentran en el rango de 3 a 6 mm/año^{1/2}, es decir, un concreto de calidad media con inicio de carbonatación. La mezcla más desfavorable es la testigo con un valor de 5.93 mm/año^{1/2} y la más favorable es la de arena 20% con un valor de 5.17 mm/año^{1/2}.

Con ayuda de los resultados de la constante de carbonatación y con el recubrimiento de concreto del acero de refuerzo, es posible predecir la progresión de la carbonatación y el tiempo en el cual alcanzará al acero de refuerzo en el concreto. Dicha predicción se observa a continuación en la figura 147.

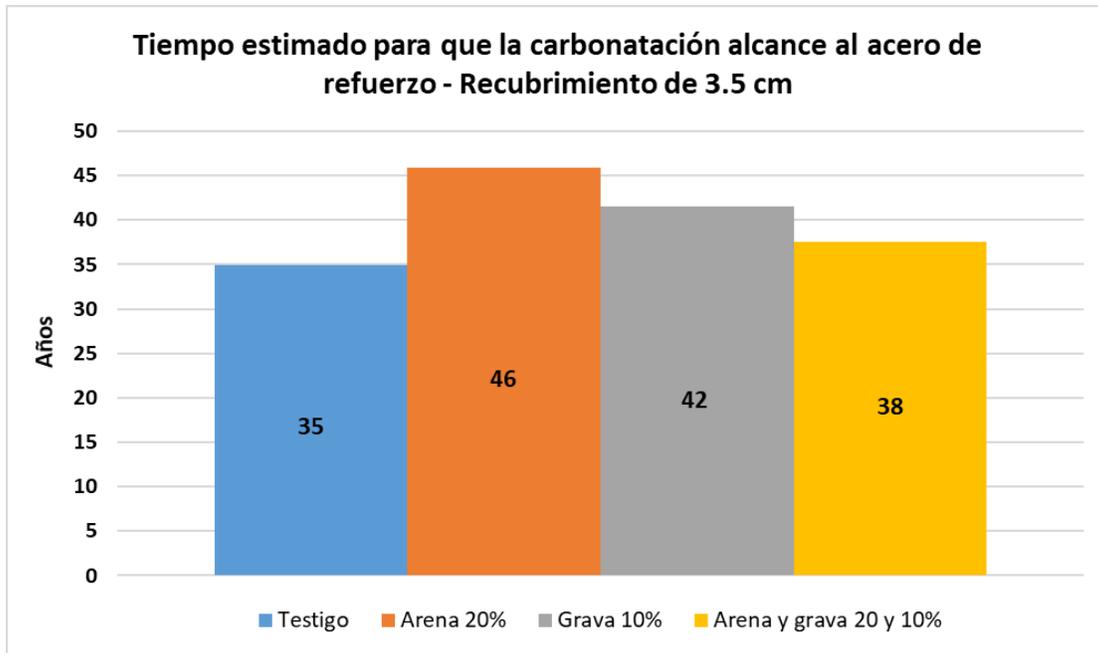


Figura 148.- Tiempo estimado para que la carbonatación alcance el acero de refuerzo con un recubrimiento de 35 mm.

De acuerdo a lo observado en la figura anterior, a la mezcla testigo solo le bastaran 35 años para que la carbonatación alcance al acero de refuerzo con un recubrimiento propuesto de 3.5 cm, siendo esta la más desfavorable, en la mezcla de arena y grava 20 y 10% la carbonatación necesita 38 años para alcanzar al acero de refuerzo, en la de grava 10% necesitaría 42 años y en la de arena 20% necesitaría 46 años, siendo esta la de mejor comportamiento en esta prueba.



7. CONCLUSIONES

1. De los resultados obtenidos de la caracterización de los agregados pétreos podemos concluir que el agregado fino y el agregado grueso de los bancos de material “Joyitas” y “La Roka” respectivamente, son aptos para su uso en concreto, ya que cumplen con las especificaciones de calidad para su utilización en concreto de las normas oficiales mexicanas del ONNCCE.
2. De acuerdo al análisis de ciclo de vida, mediante el software “SimaPro”, el concreto ecológico elaborado a partir de desechos de vidrio reduce los impactos ambientales en comparación con los de un concreto tradicional, esto debido al reciclaje del vidrio y a que se disminuye la sobreexplotación de banco de material pétreo, dichos impactos se enlistan a continuación:
 - ✚ En Ecotoxicidad marina el concreto tradicional impacta con 1.034 kg 1,4 de DB eq, mientras que nuestro concreto 1.021 kg, es decir, reduce el impacto en 1.26 %.
 - ✚ En Ecotoxicidad de agua fresca el concreto tradicional impacta con 1.054 kg 1,4 de DB eq, mientras que nuestro concreto 1.038, es decir, reduce el impacto en 1.52 %.
 - ✚ En el impacto a cambio climático el concreto tradicional impacta con 227.67 kg CO₂, mientras que nuestro concreto 134.75 kg, es decir, reduce el impacto en un 40.81 %.
 - ✚ En agotamiento de recursos fósiles el concreto tradicional impacta con 60.59 kg Oil, mientras que nuestro concreto 22.67 kg, es decir, reduce el impacto en un 63.24 %.
 - ✚ En agotamiento de recursos minerales el concreto tradicional impacta con 2.83 kg Fe, mientras que nuestro concreto 0.21 kg, es decir, reduce el impacto en un 92.58 %.
3. Para la prueba de velocidad de pulso ultrasónico, de acuerdo a las 11 mezclas correspondientes a la primera etapa de esta investigación, todas las mezclas se encuentran en el rango de concreto “durable”, la mezcla más sobresaliente es la de arena 20% a los 28 y 60 días con un valor de 4299 m/s y 4495 m/s respectivamente.



4. Para la prueba de resistividad eléctrica en especímenes cilíndricos de 10 x 20 cm, de 15 x 30 cm y en vigas de 15 x 15 x 60 cm, para las edades de 7, 28 y 60 días, todas las mezclas se encuentran por debajo del límite mínimo especificado por la norma NMX-C-514-ONNCCE ($< 10 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$), es decir, que presentan una porosidad interconectada excesiva, cabe mencionar que la mezcla de arena 20% a los 90 días es la única que supera ese límite con un valor de $10.17 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$, presentando una porosidad interconectada de consideración.
5. En la prueba de resistencia a compresión todas las mezclas cumplen con la resistencia de diseño (250 kgf/cm^2) desde los 28 días, la mezcla más sobresaliente a los 7 días es la de arena y grava 20 y 10% con un valor de 225.78 kgf/cm^2 , a los 28 días fue la mezcla testigo con un valor de 271.36 kgf/cm^2 , a los 60 días nuevamente la testigo con un valor de 275.49 kgf/cm^2 y a los 90 días la de arena 20% alcanzó un valor 283.59 kgf/cm^2 , el cual es el valor máximo alcanzado en esta prueba.
6. Para la prueba de tensión por compresión diametral, todas las mezclas cumplen con lo especificado por Steven H. Kosmatka desde los 28 días, es decir se encuentran entre los valores de 20.55 kgf/cm^2 ($1.3\sqrt{250 \text{ kgf/cm}^2}$) y 34.79 kgf/cm^2 ($2.2\sqrt{250 \text{ kgf/cm}^2}$), la mezcla más sobresaliente a los 28 días es la de grava 10% con un valor de 31.62 kgf/cm^2 y a los 60 días la de arena 20% con un valor 31.94 kgf/cm^2 , el cual es el valor máximo alcanzado en esta prueba.
7. Para la prueba de módulo de ruptura, todas las mezclas cumplen con lo especificado por Steven H. Kosmatka desde los 28 días, es decir se encuentran entre los valores de 31.46 kgf/cm^2 ($1.99\sqrt{250 \text{ kgf/cm}^2}$) y 41.90 kgf/cm^2 ($2.65\sqrt{250 \text{ kgf/cm}^2}$), la mezcla más sobresaliente a los 28 días es la de grava 10% con un valor de 42.37 kgf/cm^2 y a los 60 días la de arena 20% con un valor 49.31 kgf/cm^2 , el cual es el valor máximo alcanzado en esta prueba.
8. Para la prueba de módulo de elasticidad estático, las mezclas cumplen con lo especificado por Steven H. Kosmatka desde los 28 hasta los 90 días, es decir se encuentran entre los valores de $140,000 \text{ kgf/cm}^2$ y $420,000 \text{ kgf/cm}^2$ la mezcla más sobresaliente a los 28 días es la de arena y grava 20 y 10% con un valor de $199,315.56 \text{ kgf/cm}^2$, a los 60 días la de grava 10% con un valor $205,333.12 \text{ kgf/cm}^2$ y a los 90



días la más sobresaliente es la de arena 20% con un valor de 211,572.43 kgf/cm² el cual es el valor máximo alcanzado en esta prueba.

9. Para la prueba de profundidad de carbonatación todas las mezclas se clasifican en el rango de concreto de calidad media con inicios de carbonatación, la profundidad de carbonatación a los 190 días de exposición al ambiente en las mezclas testigo, arena 20%, grava 10% y arena y grava 20 y 10% son de 4.27 mm, 3,72 mm, 3.92 mm y 4.12 mm respectivamente. En base a los resultados anteriores se obtuvo la constante de carbonatación, la cual nos ayudó a predecir el tiempo en el que la carbonatación alcanzaría al acero de refuerzo, dichos valores son de 35, 46, 42 y 38 años con un valor de recubrimiento propuesto de 35 mm para la mezcla testigo, arena 20%, grava 10% y arena y grava 20 y 10% respectivamente.
10. De acuerdo a los resultados obtenidos en las pruebas no destructivas, destructivas y de durabilidad, podemos llegar a la conclusión de que, si resulta viable el sustituir parcialmente los agregados pétreos por desechos de vidrio probablemente hasta en un 20% cada uno, ya que cumple con lo especificado en las normas y además de acuerdo al análisis de ciclo de vida se reduciría el impacto ambiental generado al darle una segunda vida a los desechos de vidrio y al disminuir marginalmente la explotación de materiales pétreos.



8. BIBLIOGRAFÍA

360 en Concreto. Obtenido de Reacción Álcali- Sílice en el concreto:
<https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/reaccion-alkali-agregado>

Abbas, A., Fathifazl, G., & Isgor, O. (2006). *Environmental benefits of green concrete*. Canada.

American Concrete Institute 211.1. (2009). *Diseño de mezclas de concreto*.

Campos Movilla, S., Urbina Reynaldo, M. O., & Tamayo Ochoa, D. (2020). *POTENCIALIDADES DEL VIDRIO TRITURADO COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN*.

Características. (2021). Obtenido de Definición y características del vidrio:
<https://www.caracteristicas.co/vidrio/#site-header>

Castillo Pazmiño, M. (2010). *INVESTIGACIÓN DE LA UTILIZACIÓN DEL VIDRIO MOLIDO COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN Y TECNICAS CONSTRUCTIVAS*.

Catalán Aretaga, C. J. (2013). *ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL VIDRIO MOLIDO EN HORMIGONES GRADO H15, H20 Y H30*. Chile.

CFE. (1994). *Manual de tecnología del concreto*.

Colegio de Ingenieros Civiles de Michoacán. (1999). Obtenido de Reglamento de construcción del estado de Michoacán.

Contreras, M. (2023).

CSI. (2009). Iniciativa por la sostenibilidad del concreto. *CONSEJO MUNDIAL EMPRESARIAL PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE*.

Din Nassar, R. U., & Parviz Soroushian. (2012). *Strength and durability of recycled aggregate concrete containing milled glass as partial replacement for cement*.



“CONCRETO ECOLÓGICO ELABORADO A PARTIR DE DESECHOS DE VIDRIO COMO SUSTITUTO PARCIAL DE LOS AGREGADOS FINOS Y GRUESOS”

Dyer, T. D., & Dhir, R. (2001). *Chemical Reactions of Glass Cullet Used as Cement Component*. England.

EFE, A. (5 de Mayo de 2019). *Agencia EFE S.A. de C.V.*

García Guillen, G. (2011). *ESTUDIO DEL PROCESO DE HIDRATACIÓN DE PASTAS DE CEMENTO PORTLAND REEMPLAZADAS CON ESCORIA GRANULADA DE ALTO HORNO*. Nuevo León.

García Lemus, G. (2016). *Concreto reforzado con fibras de polipropileno*.

Gestiopolis. (2023). Obtenido de <https://www.gestiopolis.com/analisis-del-ciclo-vida-producto-acv/>

Google Earth. (2022).

H. Kosmatka, S., Kerkhoff, B., & C. Panarese, W. (2002). *Design and Control of Concrete Mixtures*. Canada.

Hernández Z, J. B., López, T., Horta R., J., & Serrano G., G. (2017). *Impacto ambiental generado por la explotación de bancos de material en Queretaro, México*. Queretaro.

Hidalgo Laguna, D. E., & Poveda Claderón, R. A. (2013). *Obtención de adoquines fabricados con vidrio reciclado como agregados*.

INEGI. (2015). *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*.

ISM. (2021). *Instituto Superior del Medio ambiente*. Obtenido de <https://www.ismedioambiente.com/programas-formativos/simapro-herramienta-de-analisis-de-ciclo-de-vida/>

ISO 14044. (2006). *Gestión ambiental — Análisis del ciclo de vida — Requisitos y directrices*.



“CONCRETO ECOLÓGICO ELABORADO A PARTIR DE DESECHOS DE VIDRIO COMO SUSTITUTO PARCIAL DE LOS AGREGADOS FINOS Y GRUESOS”

- Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., Panarese, W. C., & Tanesi, J. (2004). *Diseño y proporcionamiento de mezclas de concreto normal*. Illinois.
- Mata, A., & Gálvez, C. (2015). *Conocimiento del proceso de reciclaje de envases de vidrio; propuestas de mejora del proceso actual y análisis costo-beneficio de la implantación del mismo en la planta Vidriera Guadalajara*.
- Mejía Ojeda, A. E. (2009). *Obtención de mezclas de concreto a partir de la utilización del vidrio como agregado grueso*.
- Mora Chacón, W. F. (2015). *Concreto Ecológico a Partir de Material PET, Vidrio y Tapas de Bebidas Refrescantes y Alcohólicas*. Colombia.
- Neville, A. M. (1999). *Tecnología del concreto*. M. en A. Soledad Moliné Venanzi.
- Neville, A. M. (1999). *Tecnología del concreto*. M. en A. Soledad Moliné Venanzi .
- NMX-C-030-ONNCCE. (2004). *Industria de la Construcción – Agregados – Muestreo*.
- NMX-C-057-ONNCCE. (2015). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN - CEMENTANTES HIDRÁULICOS - DETERMINACIÓN DE LA CONSISTENCIA NORMAL*.
- NMX-C-073-ONNCCE. (2004). *Industria de la construcción-Agregados-Masa volumétrica*.
- NMX-C-077-ONNCCE. (2019). *Industria de la Construcción – Agregados para Concreto – Análisis Granulométrico – Método de Ensayo*.
- NMX-C-083-ONNCCE. (2014). *Industria de la construcción-concreto-Determinación de la Resistencia a la Compresión de Especímenes*.
- NMX-C-088-ONNCCE. (2019). *Industria de la construcción-Agregados-Determinación de las impurezas orgánicas en el agregado fino*.



- NMX-C-111-ONNCCE. (2018). *Industria de la construcción-Agregados para concreto hidráulico Especificaciones y métodos de prueba.*
- NMX-C-128-ONNCCE. (2013). *Industria de la Construcción – Concreto Sometido a Compresión – Determinación del Módulo de Elasticidad Estático y Relación de Poisson – Método de Ensayo.*
- NMX-C-152-ONNCCE. (2015). *Industria de la Construcción - Cementantes Hidráulicos – Determinación de la Densidad.*
- NMX-C-155-ONNCCE. (2014). *Industria de la Construcción – Concreto Hidráulico – Dosificado en Masa – Especificaciones y Métodos de Ensayo.*
- NMX-C-156-ONNCCE. (2010). *Industria de la construcción-Concreto hidráulico-Determinación del revenimiento.*
- NMX-C-159-ONNCCE. (2016). *Industria de la construcción-Concreto-Elaboración y curado de especímenes de concreto en laboratorio.*
- NMX-C-163-ONNCCE. (2019). *Industria de la Construcción – Concreto Hidráulico – Determinación de la Resistencia a la Tensión por Compresión Diametral de Cilindros de Concreto – Método de ensayo.*
- NMX-C-164-ONNCCE. (2014). *Industria de la construcción-Agregados-Determinación de la densidad relativa y absorción del agregado grueso.*
- NMX-C-165-ONNCCE. (2020). *Industria de la construcción – Agregados – Determinación de la Densidad Relativa y Absorción de Agua del Agregado Fino – Método de Ensayo.*
- NMX-C-170-ONNCCE. (2019). *Industria de la Construcción – Agregados – Reducción de las Muestras de Agregados Obtenidas en el Campo al Tamaño Requerido para los ensayos.*



“CONCRETO ECOLÓGICO ELABORADO A PARTIR DE DESECHOS DE VIDRIO COMO SUSTITUTO PARCIAL DE LOS AGREGADOS FINOS Y GRUESOS”

NMX-C-191-ONNCCE. (2015). *Industria de la Construcción – Concreto – Determinación de la resistencia a la flexión del concreto usando una viga simple con carga en los tercios del claro.*

NMX-C-275-ONNCCE. (2020). *Industria de la construcción -concreto- Determinación de la velocidad de pulso a través del concreto.*

NMX-C-414-ONNCCE. (2017). *Industria de la construcción - Cementantes hidráulicos - Especificaciones y métodos de ensayo.*

NMX-C-414-ONNCCE. (2017). *Industria de la construcción-Cementos hidráulicos especificaciones y métodos de prueba.*

NMX-C-504-ONNCCE. (2015). *Industria de la construcción – Determinación de la absorción capilar en concreto hidráulico - Método de ensayo.*

NMX-C-514-ONNCCE. (2019). *Industria de la Construcción – Resistividad Eléctrica del Concreto Hidráulico – Especificaciones y Métodos de Ensayo.*

NMX-C-515-ONNCCE. (2016). *Industria de la construcción – Concreto hidráulico – Durabilidad - Determinación de la profundidad de carbonatación en concreto hidráulico - Especificaciones y método de ensayo.*

NMX-C-530-ONNCCE. (2018). *Industria de la Construcción-Durabilidad-Norma General de Durabilidad de Estructuras de Concreto Reforzado.*

Palacios Martínez, L. A. (2019). *DETERMINACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO EN ESTADO FRESCO Y ENDURECIDO, UTILIZANDO VIDRIO MOLIDO COMO SUSTITUTO PARCIAL DEL AGREGADO FINO.*
El Salvador.

Peñañiel Carrillo, D. A. (2016). *ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN AL EMPLEAR VIDRIO RECICLADO MOLIDO EN REEMPLAZO PARCIAL DEL AGREGADO FINO.*



- Putzmeister. (2019). *Putzmeister*. Obtenido de La relación agua-cemento: un frágil equilibrio: <http://bestsupportunderground.com/relacion-agua-cemento/>
- Red Durar. (1998). *Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado*.
- Rojas Vega, L. D., Hidalgo Madrigal, C., Pizarro García, M., & Segura Guzmán, G. (2011). *Efecto de la variación Agua/Cemento en el concreto* (Vol. 25).
- S. Winfield, M., & Taylor, A. (2005). *Rebalancing the Load: The Need for an Aggregates Conservation Strategy for Ontario*. Canada.
- S.E., C., & L.M., F. (2009). *Waste glass as a supplementary cementitious material in concrete – Critical review of treatment methods*.
- Sánchez, A. (2019). *Vidrio, el residuo ‘olvidado’ en el proceso de reciclaje en México*. México. Obtenido de <https://www.elfinanciero.com.mx/empresas/vidrio-el-residuo-olvidado-en-el-proceso-de-reciclaje-en-mexico/>
- Segura Terrones, L. A., & Siguenza Abanto, R. W. (2022). *Effect of the use of recycled glass on concrete design*. Perú.
- SimaPro. (2023). *SimaPro Cadis*. Obtenido de <https://www.simapro.mx/>
- SinCeO2. (2023). *SinCeO2 Consultoría Energética*. Obtenido de <https://www.sinceo2.com/servicios/energia-cambio-climatico/analisis-ciclo-vida/>
- Vargas Castro, A. D. (2015). *REUTILIZACIÓN DE VIDRIO PLANO COMO AGREGADO FINO EN LA ELABORACIÓN DE MORTEROS DE CEMENTO Y CONCRETOS*. Cartago, Costa Rica.
- Vidrala. (2021). *Vidrala*. Obtenido de El vidrio: <https://www.vidrala.com/es/vidrala/vidrio/proceso-productivo/>



“CONCRETO ECOLÓGICO ELABORADO A PARTIR DE DESECHOS DE VIDRIO COMO SUSTITUTO PARCIAL
DE LOS AGREGADOS FINOS Y GRUESOS”



Zamora, L., & Cabezas, J. (2012). *RECICLAJE DE ENVASES DE VIDRIO* .