



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIAPAS**



**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**CAMPUS I**

**EVALUACIÓN DE LAS ADICIONES EN EL DESEMPEÑO**

**FÍSICO-MECÁNICO DEL CONCRETO**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN**

**INGENIERÍA CON TERMINACIÓN EN CONSTRUCCIÓN**

**PRESENTA**

**MICHAEL PÉREZ RUIZ C021111**

**DIRECTOR DE TESIS**

***DR. ALEXANDER LÓPEZ GONZÁLEZ***

**TUXTLA GUTIÉRREZ, CHIAPAS, MARZO DE 2024**



Tuxtla Gutiérrez, Chiapas  
15 de abril del 2024  
Oficio No. F.I.01.667/2024

**C. MICHAEL PÉREZ RUIZ**  
**EGRESADO**  
**MAESTRÍA EN INGENIERÍA CON FORMACIÓN EN CONSTRUCCIÓN**  
**PRESENTE.**

Con base en el Reglamento de Evaluación Profesional para los egresados de la Universidad Autónoma de Chiapas, y habiéndose cumplido con las disposiciones en cuanto a la aprobación por parte de los integrantes del jurado en el contenido de su Tesis Titulada:

**“EVALUACIÓN DE LAS ADICIONES EN EL DESEMPEÑO FÍSICO - MECÁNICO DEL CONCRETO”.**

**CERTIFICO** el **VOTO APROBATORIO** emitido por este jurado, y autorizo la entrega de tesis digital elaborada a través del Programa Institucional para la Obtención del Grado Académico (PIGA), para que sea sustentado en su Examen de grado de Maestro en Ingeniería con Formación en Construcción.

Sin otro particular, reciba un cordial saludo.

**ATENTAMENTE**  
**“POR LA CONCIENCIA DE LA NECESIDAD DE SERVIR”**

  
**DR. OMAR ANTONIO DE LA CRUZ COURTOIS**  
**DIRECTOR**





Ccp. Dr. Humberto Miguel Sansebastián García. Coordinador de Investigación y Posgrado. Facultad de Ingeniería, Campus I. UNACH.

Archivo/minutario

OACC/HMSG/tpg\*





Código: FO-113-05-05

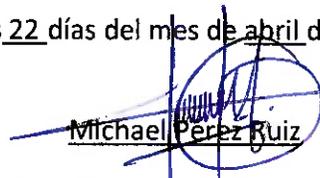
Revisión: 0

### **CARTA DE AUTORIZACIÓN PARA LA PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA DE LA TESIS DE TÍTULO Y/O GRADO.**

El (la) suscrito (a) Michael Pérez Ruiz, Autor (a) de la tesis bajo el título de Evaluación de las Adiciones en el Desempeño Físico-Mecánico del Concreto presentada y aprobada en el año 2024 como requisito para obtener el título o grado de Maestro en Ingeniería con Terminación en Construcción, autorizo licencia a la Dirección del Sistema de Bibliotecas Universidad Autónoma de Chiapas (SIBI-UNACH), para que realice la difusión de la creación intelectual mencionada, con fines académicos para su consulta, reproducción parcial y/o total, citando la fuente, que contribuya a la divulgación del conocimiento humanístico, científico, tecnológico y de innovación que se produce en la Universidad, mediante la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Consulta del trabajo de título o de grado a través de la Biblioteca Digital de Tesis (BIDITE) del Sistema de Bibliotecas de la Universidad Autónoma de Chiapas (SIBI-UNACH) que incluye tesis de pregrado de todos los programas educativos de la Universidad, así como de los posgrados no registrados ni reconocidos en el Programa Nacional de Posgrados de Calidad del CONACYT.
- En el caso de tratarse de tesis de maestría y/o doctorado de programas educativos que sí se encuentren registrados y reconocidos en el Programa Nacional de Posgrados de Calidad (PNPC) del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), podrán consultarse en el Repositorio Institucional de la Universidad Autónoma de Chiapas (RIUNACH).

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas; a los 22 días del mes de abril del año 2024.

  
Michael Pérez Ruiz

Nombre y firma del Tesista o Tesistas

## Agradecimientos

### UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIAPAS

Especialmente a la Facultad de Ingeniería Civil por brindarme los conocimientos y herramientas indispensables para desenvolverme profesional y laboralmente.

### DIRECTOR DE TESIS

Por todo el apoyo y asesoría brindada durante el proceso de elaboración de la presente tesis, por su tiempo y dedicación y sobre todo por su gran amistad.

### PROGRAMA INSTITUCIONAL PARA LA OBTENCIÓN DEL GRADO ACADÉMICO (PIGA)

Por ser uno de los medios de apoyo en la obtención del grado académico, así también, como a mi asesora del programa por su excelente dirección en la elaboración del presente trabajo de investigación.

## Dedicatorias

### A DIOS

Por la vida que me da y permitirme culminar una etapa más de mi vida, con gran satisfacción, con salud y rodeado de las personas que amo.

### A MI FAMILIA

Por ser una de las principales motivaciones para crecer profesionalmente y esforzarme cada día y sobre todo ser ejemplo para mi hija Aruna.

### A MIS PADRES

Por enseñarme a ser perseverante y diligente ante cualquier meta que me proponga, que con esfuerzo y dedicación puedo lograr todo lo que ambicione en la vida, sobre todo a mi madre por sus consejos en la culminación de esta etapa.

## Índice General

|                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------|----|
| Introducción .....                                                     | 13 |
| Antecedentes .....                                                     | 14 |
| Justificación .....                                                    | 15 |
| Planteamiento del Problema .....                                       | 15 |
| Hipótesis .....                                                        | 17 |
| Preguntas de Investigación .....                                       | 18 |
| Objetivo General .....                                                 | 18 |
| Objetivos Específicos.....                                             | 18 |
| I. Marco Teórico .....                                                 | 21 |
| I.1 Concretos Convencionales .....                                     | 23 |
| I.2 El Vidrio como Agregado del Concreto .....                         | 23 |
| I.3 La Ceniza de Bagazo de Caña (CBC) como Agregado del Concreto ..... | 24 |
| I.4 El Mucilago de Nopal como Agregado del Concreto.....               | 25 |
| I.5 Polvo de Vidrio.....                                               | 26 |
| I.6 Ceniza de Bagazo de Caña .....                                     | 28 |
| I.7 Extracto de Nopal .....                                            | 30 |
| II. Metodología .....                                                  | 35 |
| III. Resultados y Discusión .....                                      | 40 |
| III.1 Desarrollo Experimental .....                                    | 40 |
| III.2 Caracterización de Materiales.....                               | 40 |
| III.2.1 Agregado Fino .....                                            | 41 |
| III.2.2 Agregado Grueso .....                                          | 43 |

---

|                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| III.2.3 Agua.....                                                                            | 45 |
| III.2.4 Cemento .....                                                                        | 46 |
| III.2.5 Vidrio .....                                                                         | 46 |
| III.2.6 Ceniza de bagazo de caña .....                                                       | 46 |
| III.2.7 Extracto de nopal .....                                                              | 46 |
| III.3 Diseño de la mezcla de concreto.....                                                   | 50 |
| III.3.1 Proporcionamiento para adiciones de polvo de vidrio y ceniza de bagazo de caña ..... | 51 |
| III.3.2 Proporcionamiento para aditivos de extracto de nopal .....                           | 52 |
| III.4 Revenimiento .....                                                                     | 53 |
| III.5 Elaboración de cilindros de concreto .....                                             | 56 |
| III.6 Ensayo de resistencia a la compresión simple .....                                     | 58 |
| III.7 Ensayo de pulso de ultrasonido.....                                                    | 66 |
| VI. Conclusiones.....                                                                        | 70 |
| Referencias.....                                                                             | 72 |

## Índice de Tablas

|                                                                                                                                                            |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1. Propiedades físicas de la Arena del Río Santo Domingo, Chiapas. ....                                                                              | 42 |
| Tabla 2. Propiedades físicas de la grava. ....                                                                                                             | 44 |
| Tabla 3. Proporcionamiento de dosificación para concreto con relación $a/c=0.62$ .....                                                                     | 50 |
| Tabla 4. Proporcionamiento de dosificación para concretos con adición de polvo de vidrio .....                                                             | 51 |
| Tabla 5. Proporcionamiento de dosificación para concretos con adición de ceniza de bagazo....                                                              | 52 |
| Tabla 6. Proporcionamiento de dosificación para concretos con aditivo natural de extracto de Nopal.....                                                    | 52 |
| Tabla 7. Resultados de la prueba de Revenimiento por cada tipo de mezcla .....                                                                             | 55 |
| Tabla 8. Resultados de la prueba de Resistencia a la Compresión Simple.....                                                                                | 59 |
| Tabla 9. Valores de pulso de ultrasonido de referencia para determinar la calidad del concreto. 67                                                         |    |
| Tabla 10. Resultados obtenidos del ensayo de pulso de ultrasonido a las probetas de concreto con diferentes tipos de adiciones a los 28 días de edad. .... | 67 |

## Índice de Figuras

|                                                                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1.Grafica de curva granulométrica de la arena andesita, Rio Santo Domingo, Chiapas. ..                                                                    | 43 |
| Figura 2.Grafica de curva granulométrica de la grava.....                                                                                                        | 45 |
| Figura 3.Nopal crinado .....                                                                                                                                     | 47 |
| Figura 4.Nopal lavado y sin impurezas.....                                                                                                                       | 47 |
| Figura 5.Mezclado del extracto de nopal.....                                                                                                                     | 48 |
| Figura 6.Colado del extracto de nopal .....                                                                                                                      | 49 |
| Figura 7.Almacenaje de extracto de nopal.....                                                                                                                    | 49 |
| Figura 8.Toma del ensayo de revenimiento de una mezcla de concreto con polvo de vidrio de acuerdo a la Norma NMX-C-156 .....                                     | 53 |
| Figura 9.Toma del ensayo de revenimiento de una mezcla de concreto con CBC de acuerdo a la Norma NMX-C-156.....                                                  | 54 |
| Figura 10.Mezclado de los materiales en una revolvedora con capacidad de 1 saco .....                                                                            | 56 |
| Figura 11.Varillado de cilindros para compactar el material.....                                                                                                 | 57 |
| Figura 12.Ensayo de especímenes de acuerdo a la Norma NMX-C-083-ONNCCE-2014, 2015                                                                                | 58 |
| Figura 13.Grafica de comparación de los ensayos de resistencia a la compresión de la mezcla de control vs mezclas con adiciones de polvo de vidrio.....          | 62 |
| Figura 14.Grafica de comparación de los ensayos de resistencia a la compresión de la mezcla de control vs mezclas con adiciones de ceniza de bagazo de caña..... | 63 |
| Figura 15.Grafica de comparación de los ensayos de resistencia a la compresión de la mezcla de control vs mezclas con aditivo de extracto de nopal.....          | 64 |

## Resumen

En este estudio, se presenta la evaluación del uso de adiciones no convencionales como agregado extra o *filler* a la mezcla de concreto para mejorar el desempeño y comportamiento físico-mecánico del concreto convencional mediante el uso de polvo de vidrio, cenizas de bagazo de caña (CBC) y extracto de nopal, respectivamente como material alternativo al cemento Portland (CP). El presente estudio se basó en el diseño experimental puro el cual consistió en incluir dos grupos de investigación, el de control y los manipulables es decir con adiciones, y siguiendo los estudios disponibles, así como el uso de las Normas Mexicanas de la Industria de la Construcción, se llevaron cabo los estudios de caracterización, ensayos de revenimiento en estado fresco y resistencia a la compresión en estado endurecido, así como ensayos de pulso de ultrasonido. La relación a/c utilizada fue de 0.62 para la elaboración de los especímenes de concreto los cuales fueron ensayados a los 7, 14, 28 y 56 días de edad curados por inmersión en un tanque de curado, así también los porcentajes de adición utilizados para el polvo de vidrio fueron de 5%, 10%, 15% y 20%, para la adición de la ceniza de bagazo de caña los porcentajes utilizados fueron de 5%, 10%, 15% y 20% y para el extracto de nopal el porcentaje de aditivo utilizado fue de 0.5%, 1% y 2%; además se utilizó una mezcla de control sobre la cual se evaluó cada una de las pruebas realizadas. Los resultados revelaron que los valores más altos fueron los de la CBC y el extracto de nopal mostrando un mejor desempeño principalmente en el extracto de nopal debido al incremento en consistencia plástica y trabajabilidad así como un incremento del 24% de la resistencia a la compresión por arriba de la muestra control con el uso de 2% de aditivo. Así también, se mostró que para edades tempranas el pulso de ultrasonido se incrementó para las adiciones de CBC, pero sobre todo para el extracto de nopal, siendo a edades de 28 días el comportamiento más notorio en cada uno de los ensayos. Por el contrario, para el caso del polvo

de vidrio los resultados no fueron favorables debido a que no incremento su desempeño frente a la mezcla control ya que los resultados en cada uno de los ensayos fueron valores relativamente inferiores al de la mezcla control. A partir de estos resultados se concluyó que el extracto de nopal presenta un mejor desempeño como agregado adicional al concreto frente al uso de la CBC y el polvo de vidrio, sin embargo, de igual forma el uso de la CBC es una opción prometedora a implementar, ya que incrementa el desempeño físico-mecánico del concreto para el mismo diseño de mezcla de concreto.

**Palabras clave:** concreto, polvo de vidrio, ceniza de bagazo, nopal, adición, resistencia a compresión.

## Introducción

En la presente investigación se evalúa la eficiencia del bagazo de caña, polvo de vidrio y el extracto de nopal como agregado extra (*filler*) y aditivo respectivamente en las mezclas de concreto, con el fin de explorar alternativas ya sea de origen agrícola o industrial, de origen vegetal o mineral, que sean menos contaminantes para el medio ambiente, de bajo costo y que garanticen una buena efectividad en su desempeño y comportamiento físico-mecánico y durabilidad al de un concreto convencional.

A través de un estudio publicado en el 2019, en México solo se reciclaba el 6,1% de todos los residuos valorizables: latas, cartón, papel y plástico. Por eso, la solución más viable contra la contaminación es el reciclaje y el aprovechamiento de materiales, mantener su valor en la industria. Que un material se mantenga útil por el mayor tiempo posible, que una botella vuelva a ser otra nueva como parte del ciclo de la economía circular (Arratibel, 2023).

La producción de desechos en las grandes ciudades es un problema que ha conducido a la realización de estudios para el aprovechamiento de los residuos. Entre los residuos urbanos más comunes se encuentra el vidrio (Rodríguez y Ruiz, 2016).

En México, de acuerdo a dato publicados por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), únicamente el 12% se recicla de los más de 2.5 millones de toneladas de envases de vidrio que se tiran anualmente.

Otro dato importante es la CBC, cada tonelada de caña de azúcar molida produce en promedio 270 kg de bagazo, y cada tonelada de bagazo quemado genera aproximadamente 25 kg de ceniza. La ceniza de bagazo de caña se ha utilizado como material cementante alternativo en la preparación de mezclas de hormigón ambientalmente amigable (Arbeláez et al., 2022). Esto, por

mencionar algunos de los materiales utilizados en la presente investigación, ya que en general existen muchos materiales, reciclados, producto de desechos que se han estudiado como adiciones a las mezclas de concreto, con el objetivo de disminuir el impacto ambiental causado por el desecho de residuos.

La durabilidad de las construcciones de concreto es una característica igualmente importante que la resistencia mecánica, ya que determina la capacidad para resistir las condiciones del medio ambiente a las cuales estará la construcción sometida durante varias décadas. La mayoría de los problemas de durabilidad del concreto están asociados con su porosidad y permeabilidad, propiedades de las que depende la capacidad para permitir el flujo de líquidos y gases (Solís-Carcano, 2019).

### **Antecedentes**

La preocupación por disminuir el impacto ambiental generado por los residuos agrícolas e industriales, así como disminuir el impacto que genera la producción del concreto debido a las cantidades de emisiones de CO<sub>2</sub> generados a la atmósfera durante la fabricación del cemento ha llevado a muchos investigadores a realizar investigaciones enfocadas en el uso de los residuos agrícolas e industriales para el diseño de un concreto no convencional.

Es por ello, que existe una amplia información bibliográfica de variados investigadores los cuales han realizado estudios similares, en los que se ha pretendido demostrar que el uso de residuos como adición en la mezcla de concreto mejora sus propiedades físico-mecánicas, la cual será utilizada como soporte y guía durante del desarrollo del presente trabajo de investigación.

## Justificación

La investigación propuesta pretende demostrar que el uso de adiciones como la ceniza de bagazo de caña, polvo de vidrio o extracto de nopal en el diseño y elaboración de mezclas de concreto como material de complemento o *filler* permite mejorar el desempeño y comportamiento físico-mecánico de las mismas con respecto al de un concreto convencional.

La trascendencia metodológica de esta investigación radica en la utilización de las adiciones (ceniza de bagazo de caña, polvo de vidrio o extracto de nopal) como material de complemento o *filler*, ya sea natural o industrial, la cual, al ser corroborada y justificada, pretende proponer el uso y aplicación de innovadores métodos de diseño de mezcla en la fabricación del concreto, aportando así una reducción en el impacto ambiental generado por residuos agrícolas e industriales.

Al comprobar que el uso de adiciones (ceniza de bagazo de caña, polvo de vidrio o extracto de nopal) mejoran las propiedades físico-mecánicas del concreto como son la resistencia a la compresión del concreto y su durabilidad, se tendrán ventajas empíricas como alternativas modernas e innovadoras en el diseño de la mezcla de concreto, aminorando los costos de producción, consiguiendo productos con una mejor calidad, desempeño y sobre todo durables en las obras de construcción.

## Planteamiento del Problema

Existen materiales de desecho que no se reciclan por completo en México, que se pueden implementar en procesos constructivos de la ingeniería civil, esto ayudaría a que dichos materiales (vidrio, cenizas, etc.), que contaminan los suelos y/o mantos freáticos; se les pueda dar un segundo uso, como material alternativo o complementario para procesos constructivos como adición.

Como ejemplo, los residuos de ceniza de bagazo de caña en algunos ingenios azucareros son almacenados a cielo abierto, lo cual ha causado afectación al ecosistema de las regiones, así como influir en problemas respiratorios. Así también el vidrio el cual es uno de los productos de desecho urbano más comunes, en México, según los últimos datos de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), de los más de 2,5 millones de toneladas de envases de vidrio que se tiran anualmente en el país, solo el 12 % se recicla.

Muchos investigadores han aprovechado esta necesidad de reciclar, y se han realizado estudios enfocados en la adición de materiales producto del reciclaje (vidrio, cenizas, etc.) a la mezcla de concreto con el fin de mejorar las propiedades físico - mecánicas del mismo (Espinosa y Escalante, 2011; Frómeta, 2009; Hwan et.al. 2004; Tórrez-Rivas et al., 2014; Farfán, 2018; Hernández, 2012; Ramírez et al. 2012; Inga, 2019), en su mayoría han sido investigaciones en las que se busca sustituir parcialmente el cemento portland y/o los agregados en el concreto por algunas de las adiciones.

En lo que respecta a la sustitución parcial del cemento en la mezcla de concreto ha sido pensado como aporte para disminuir la contaminación existente a nivel mundial por el uso de este material, esto debido a que el cemento es uno de los materiales de mayor uso en la construcción al igual que la gran cantidad de agregados naturales que se emplean por año para generar infraestructura, así mismo, como las cantidades de emisiones de CO<sub>2</sub> generados a la atmosfera durante la fabricación del cemento.

El uso del concreto como material de construcción se ha intensificado en los últimos años debido al crecimiento poblacional y crecimiento urbano, por lo que se tiene una mayor demanda del mismo. Sin embargo, a pesar de que es un material muy versátil y resistente, es susceptible a

deteriorarse, por lo que mejorar su durabilidad es importante. Para evitar el deterioro de las estructuras de concreto hoy en día se utilizan materiales suplementarios (adiciones) y aditivos químicos que mejoran sus propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad (Hoff, 1991), las cuales suelen incrementar el costo de producción del mismo concreto. Ante esta situación se busca en este trabajo, poder implementar materiales de desecho que puedan mejorar las propiedades físico-mecánicas del concreto y de forma indirecta incrementar su durabilidad, así como lo hacen los aditivos y adiciones comerciales, pero a un más bajo costo con materiales de desecho de la región.

Las investigaciones que han realizado autores anteriores han sido en su mayoría enfocados en la sustitución parcial del cemento por adiciones, para la presente investigación será enfocada en la adición de materiales no convencionales a la mezcla de concreto pero como material extra (*Filler*) a dichas mezclas de concreto, sin la sustitución parcial de alguno de los materiales originales que lo conforman, con el mayor control de calidad posible durante el proceso de elaboración de las mezclas y agregado de las adiciones se busca mejorar el desempeño físico-mecánico del concreto y su durabilidad.

### **Hipótesis**

El uso de adiciones como la ceniza de bagazo de caña, polvo de vidrio o extracto de nopal en el diseño y elaboración de mezclas de concreto como material de complemento o *filler* permite mejorar el desempeño y comportamiento físico-mecánico de las mismas con respecto al de un concreto convencional.

### Preguntas de Investigación

- I. ¿Qué porcentaje de adición es la adecuada a implementar en una mezcla de concreto?
- II. ¿Qué propiedades mecánicas del concreto se ven mejoradas con las adiciones?
- III. ¿Qué resistencia mecánica alcanza el concreto con adición respecto al diseño de mezcla o concreto de control?
- IV. ¿Qué adición logra un mejor comportamiento físico-mecánico en comparación a las demás?

### Objetivo General

Evaluar el desempeño físico-mecánico del concreto con el uso de adiciones no convencionales (ceniza de bagazo de caña, extracto de nopal, polvo de vidrio) como *filler* mediante el uso de cilindros de ensayo.

### Objetivos Específicos

- I. Identificar la influencia de las adiciones en las propiedades mecánicas del concreto ( $F'c$ ,  $Mr$ ).
- II. Determinar las propiedades de pulso de ultrasonido de los concretos con adiciones.
- III. Determinar el porcentaje óptimo de las adiciones para mezclas de concreto.
- IV. Comparar y analizar los resultados de las pruebas realizadas a cada tipo de mezcla para definir la adición y porcentaje óptimo en el desempeño físico-mecánico del concreto.

Para el presente trabajado se evaluó el desempeño físico-mecánico del concreto con el uso de adiciones no convencionales (ceniza de bagazo de caña, extracto de nopal, polvo de vidrio) como *filler* al igual que su durabilidad mediante el uso de cilindros de ensayo, por lo que esta investigación se compone de 5 capítulos dentro de los cuales se concluye y define la veracidad de la hipótesis establecida.

En el primer capítulo se da un parámetro general del objetivo de la investigación, con el fin de que el lector tenga una idea del propósito de la misma. Así también, se presentan los antecedentes que dieron el fundamento, dirección del tema a investigar. Se justifica el porqué de este trabajo, así como el planteamiento del problema que se busca resolver e implementar, la formulación de la hipótesis y preguntas de investigación; y por último se presentan los objetivos generales y específicos desarrollados en este proyecto.

En el capítulo dos se presenta el marco teórico en el cual se desarrollan las definiciones de los términos del tema de investigación para que el lector tenga una mejor comprensión de cada concepto plasmado y usado en el desarrollo del tema. También se realiza un análisis bibliográfico de autores que han realizado investigaciones similares, relacionadas con el uso de adiciones en la mezcla de concreto con la finalidad de mejorar el desempeño del mismo y su durabilidad.

En el tercer capítulo se presenta la metodología desarrollada, en donde se establecen los procedimientos y tipo de investigación, se definen los componentes y probetas elaboradas, los tipos de muestra, técnicas y ensayos realizados, instrumentos, materiales y herramientas implementadas para la recopilación de la información y análisis de los datos.

En el cuarto capítulo se encuentra el desarrollo experimental en el que se muestran los resultados obtenidos del análisis cuantitativo de los datos recopilados, así como una interpretación

y análisis de los mismos. Esta información será resultado de cada prueba hecha, así como los datos representados en tablas y graficas como reporte de resultados. Se realiza una breve discusión de los resultados obtenidos y se comparan con trabajos similares para la validación de los resultados obtenidos.

Y finalmente, el quinto capítulo presenta las conclusiones del trabajo, los cuales validan los objetivos planteados y presentan una respuesta a la hipótesis establecida y preguntas de investigación presentados.

## I. Marco Teórico

Para dar soporte a este tema de investigación se realizó una revisión bibliográfica de estudios similares elaborados en diferentes países, buscando encontrar información similar al caso planteado en este estudio. Existen diferentes formas de aplicar las adiciones y aditivos al concreto, con diferentes resultados, todos ellos enfocados al final en conseguir mejoras en sus propiedades mecánicas y concretos más durables.

El cemento portland es uno de los materiales más importantes y uno de los más usados en el ámbito de la construcción; incluso puede ser empleado para toda clase de infraestructura, ya que es compatible prácticamente con todos los materiales convencionales y no convencionales de la construcción. Es un producto muy versátil y de alta calidad.

De acuerdo a Guevara (2013), menciona que:

El concreto elaborado con cemento portland es el material más utilizado en la construcción, el cual presenta propiedades mecánicas resistentes y costos de producción ventajosos, por esta razón el sector de la construcción moviliza el 10% del total de la economía mundial, sin embargo, su proceso de fabricación resulta problemático, según criterios energéticos y ecológicos; la obtención de las materias primas ocasiona la destrucción de canteras naturales, pues de éstas se obtiene el componente principal del cemento, llamado “*clínker*”, que necesita temperaturas altas aproximadamente de 1500° C, para su fabricación, después de esto, el *clínker* se enfría y se pulveriza.

Así también Guevara (2013), menciona que, durante este proceso, se incorpora un porcentaje mínimo de yeso para tener control del fraguado del cemento en lo que respecta al tiempo así como mejorar las propiedades de contracción (retracción) y el desarrollo de resistencia. Por

otro lado, en el molino, el *clínker* se pulveriza tan fino que un porcentaje alto o total logra pasar a través de un tamiz de 45  $\mu\text{m}$ , este polvo gris extremadamente fino es el que se conoce como cemento portland.

De acuerdo a Vidaeud (2013), la composición química media aproximada de un cemento Portland está formada por un porcentaje oscilante entre 61 y 67% de óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ), entre 19 y 23 % de óxido de sílice ( $\text{SiO}_2$ ), entre 2.5 y 6 % de óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), entre 0 y 6% de óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), y entre 1.5 y 4.5% de otros compuestos químicos minoritarios; los cuatro primeros componentes (el primero básico y los otros tres ácidos) son los principales, sin embargo, no se encuentran libres, sino combinados formando los silicatos, aluminatos y ferritoaluminatos.

El cemento Portland-puzolana es el producto de la mezcla del Clinker de Portland, yeso y puzolana en proporción aproximada entre el 15 y 55%, la puzolana natural es de origen volcánico, ésta contiene sílice y alúmina que, al combinarse químicamente con la cal en conjunto con el agua, da como resultado el denominado cemento; por su parte, la puzolana artificial tiene propiedades análogas y se encuentra en las cenizas volantes, la tierra de diatomeas o las arcillas activas (Vidaud, 2013, p.23). Las puzolanas se utilizan en los cementos para mejorar características como la resistencia química, mejora la trabajabilidad, aumenta permeabilidad, aumenta la resistencia a la agresión de los sulfatos, reducir la reacción contra alcalinidad y así también se emplea para el uso de concretos de obras hidráulicas y marítimas.

## I.1 Concretos Convencionales

El concreto de matriz de cemento *Pórtland* se aplica en numerosos usos en la industria de la construcción de edificios, entre los que se encuentran: las estructuras, los entrepisos, los techos, los muros, los cimientos, los pisos, los pavimentos, los puentes, las guarniciones, las presas, las carreteras, etc., pero, ¿cómo se puede hacer sustentable al material más usado en el mundo?, la respuesta es buscar nuevos métodos, estrategias y prácticas sustentables para la elaboración del concreto, enfocándose principalmente en el manejo de las materias primas a usar, y sus procesos de producción, sin afectar sus características para determinado uso y aplicación al que normalmente está destinado. (Villas, 1995; como se citó en Hernández Moreno, 2008)

Por lo tanto, desde una perspectiva científica, se han desarrollado estudios muy importantes e interesantes en los que demuestran que es viable reemplazar proporciones de material pétreo e incluso cemento por otro tipo de material: residuos inertes agrícolas o industriales, residuos de origen vegetal o mineral; se muestran las alternativas para la producción de concretos con los residuos antes mencionados así como las ventajas técnicas debido al aumento de la resistencia del concreto a nivel estructural, aunque para el presente trabajo de investigación el enfoque sea usar materiales no convencionales como agregado extra (*filler*) y no como reemplazo, con la misma finalidad de mejorar las características físico-mecánicas del concreto, minimizar el impacto ambiental y crear un concreto que sea sustentable.

## I.2 El Vidrio como Agregado del Concreto

El vidrio es un material cuyo componente mayor es la sílice proveniente de arena, pedernal o cuarzo de apariencia dura, frágil y generalmente transparente, aunque se comporta como un sólido, es un fluido de muy alta viscosidad. Está compuesto por una mezcla de óxidos metálicos,

siendo su componente principal el óxido de sílice, conocido como silicio ( $\text{SiO}_4$ ). Si bien a simple vista pareciera ser muy similar a un cristal, la diferencia con éste radica en el ordenamiento que tienen las moléculas que lo componen, donde los enlaces Si-O están distribuidos de manera irregular, sin un patrón determinado, siendo por definición, un material amorfo (Silvestre et al., 2017, p.22).

El uso de vidrio reciclado como agregado mejora en gran medida el atractivo estético del concreto. Investigaciones recientes han demostrado que el concreto hecho con el agregado de vidrio reciclado tiene una mejor resistencia a largo plazo y un mejor aislamiento térmico debido a sus mejores propiedades térmicas de los agregados de vidrio (Hosanna et al., 2018, p. 2).

### **I.3 La Ceniza de Bagazo de Caña (CBC) como Agregado del Concreto**

La ceniza de bagazo de caña (CBC) es un residuo agrícola resultado de la quema del bagazo en las calderas de los ingenios azucareros, este residuo en otras palabras es consecuencia del desecho del bagazo usado en el proceso de la fabricación de la azúcar de caña. Una vez molida la caña y extraído el jugo de la misma, lo que resulta es lo que se conoce como bagazo de caña, la cual es almacenada para ser posteriormente quemada en calderas, para producir vapor y proveer un aproximado del 90% de la energía usada en la planta. En el fondo de estos hornos o calderas se encuentra depositada la ceniza del bagazo, la cual se limpia periódicamente y toda la ceniza extraída es llevada a depósitos de almacenaje controlados.

Gracias a que investigadores ha realizado las caracterizaciones y pruebas físicas y químicas de este residuo, se ha visto la similitud existente con el cemento, por lo que según Pinel (2014), una alternativa para hacer uso de este residuo que se genera en grandes cantidades es incorporarlo a la matriz conglomerante de hormigones y morteros; numerosos estudios se han realizado con

respecto al uso de la CBCA como adición puzolánica, se han analizado aspectos como la reactividad, la resistencia mecánica de los hormigones, las propiedades reológicas y la durabilidad, de igual manera, se han realizado investigaciones para su uso en hormigones autocompactables así como hormigones de alta resistencia (p. 26).

#### **I.4 El Mucilago de Nopal como Agregado del Concreto**

El nopal es conocido generalmente como un alimento muy popular en todo México y Chiapas, debido a su existencia en grandes cantidades ya que es una fruta que crece de manera silvestre en gran parte de Latinoamérica, por otro lado el mucilago del nopal es un polímero compuesto por polisacáridos el cual es extraído de cladodios de diferentes especies ha recibido mucha atención debido a que es un material orgánico de fácil obtención y caracterización y ha sido de utilidad en diferentes sectores industriales. Por ejemplo, como coagulante químico en la potabilización de agua y en la elaboración de películas y recubrimientos comestibles para frutas altamente perecederas; es un hidrocoloide natural soluble en agua y un aditivo agroindustrial debido a que puede actuar como agente espesante, gelificante, estabilizante y antioxidante.

Es debido a estas características que se ha aplicado en el rubro de la construcción por sus propiedades aglutinantes en adobes, impermeabilidad en bloques y sobre todo en México, este material combinado con cal, aumenta sus propiedades adhesivas y mejora su repelencia al agua.

A continuación, se presentan los trabajos de algunos investigadores que han realizado estudios basados en cada una de las adiciones orgánicas e inorgánicas en particular mencionadas con anterioridad.

## I.5 Polvo de Vidrio

Se realizó una investigación experimental con la finalidad de analizar las posibilidades de reciclar vidrios de desecho triturados de Corea como son el ámbar, verde esmeralda, pedernal y vidrio mixto, como agregados finos para concreto. Los resultados de las pruebas del concreto en estado fresco mostraron que los factores de revenimiento y de compactación disminuyeron debido a la existencia de numerosas partículas pequeñas existentes en los vidrios de desecho. Además, se demostró que la resistencia a la compresión, la tensión y la flexión del concreto disminuyeron cuando se aumentó la cantidad de residuos de vidrio. En conclusión, los resultados de este estudio indicaron que el vidrio de desecho de color verde esmeralda cuando se usa por debajo del 30% en la mezcla de concreto es práctico junto con el uso de látex SBR al 10%. Además, es práctico un contenido de vidrio de desecho inferior al 30 % junto con el uso de una mezcla pertinente que es necesaria para obtener trabajabilidad y contenido de aire. (Hwan et. al., 2004)

Frómeta-Salas, et al., (2009) se realizó una investigación enfocada en el empleo del vidrio reciclado triturado en sustitución parcial del árido fino para elaborar hormigón con fines de sostenibilidad; Se le realizaron ensayos físicos que permitieron obtener la composición granulométrica, peso específico, absorción y módulo de finura. A partir de la revisión bibliográfica se concluyó que el vidrio reciclado triturado puede sustituir parcialmente el árido fino en el hormigón en proporciones de 10%, 20 %, 30 % y 40 %. Se concluyó que es un producto que cumple con los requisitos de los ensayos físicos que establecen las NC 251: 2018 (Cuba. Oficina Nacional de Normalización, julio, 2018) y ASTM C33 (ASTM International, 2018) en cada uno de los tamices, excepto el tamiz No. 100, donde los porcentajes pasados son superiores a los de la norma. Igualmente, los valores de módulos de finura no fueron superiores a 3, por lo que también se encuentra en los rangos establecidos por las normativas. Así también, se demostró que este

material tiene valores muy similares a los de la arena natural. Al comparar los resultados obtenidos del ensayo de peso volumétrico, se comprobó que el peso suelto y compactado del vidrio es similar al de la arena.

Se analizaron cementos compuestos de escoria de alto horno y vidrio de desecho. Este último se sometió a activación mecano-química con el fin de solubilizar  $\text{SiO}_4$  en una solución alcalina y generar silicato de sodio con módulo de sílice mayor a cero que favorece la resistencia a compresión. Los morteros elaborados con un 100% de vidrio activado, un 4% de  $\text{Na}_2\text{O}$  y curado a 20 y a 60°C, presentaron resistencia a la compresión de 16 MPa a los 28 días. Esta resistencia disminuyó al aumentar la dosificación de vidrio activado. El análisis estadístico indicó que en la activación mecano-química las variables de mayor influencia sobre la disolución de la red vítrea del vidrio de desecho fueron: el tiempo de molienda, la relación  $\text{Na}_2\text{CO}_3/\text{NaOH}$  y el porcentaje de  $\text{Na}_2\text{O}$ . En los morteros 100% vidrio presentaron las mayores resistencias mecánicas de compresión, obteniendo así, 48MPa con 12%  $\text{Na}_2\text{O}$  y curado a 60°C. (Espinosa y Escalante, 2011).

Choca (2020), en la presente investigación tuvo como problema general: ¿Cuál es la influencia del polvo de vidrio en las propiedades del concreto en estado fresco y endurecido?; por lo que planteó y realizó lo siguiente:

El objetivo general fue: Analizar la influencia del polvo de vidrio en las propiedades del concreto en estado fresco y endurecido y la hipótesis general que se verificó fue: El polvo de vidrio influye positivamente en las propiedades del concreto en estado fresco y endurecido. El método general de investigación fue el científico, el tipo de investigación fue aplicada, de nivel explicativo y con diseño de investigación experimental; la población correspondió al concreto con adición de polvo de vidrio y el concreto convencional, siendo

un total de 120 especímenes y para la selección de muestra no se aplicó técnica de muestreo porque correspondió a la totalidad de la población, es decir los 120 especímenes. Como conclusión principal se obtuvo que, la adición de polvo de vidrio influye significativamente en las siguientes propiedades del concreto en estado fresco: El asentamiento, peso unitario y el rendimiento y el contenido de aire ( $p < 0.05$ ), pero no influye en la temperatura ( $p > 0.05$ ). Con respecto a las propiedades en estado endurecido se ha demostrado que la adición del polvo de vidrio influye significativamente ( $p < 0.05$ ) en la resistencia a la compresión y flexión a los 14, 21 y 28 días.

### **I.6 Ceniza de Bagazo de Caña**

En un estudio realizado en 2014 al concreto en donde se sustituyó el cemento Portland por ceniza de bagazo de caña, se hizo lo siguiente:

Se presentó la valoración del uso de las cenizas de bagazo de caña (CBCA) proveniente del Ingenio Monte Rosa (Nicaragua) como material alternativo al cemento Portland (CP) mediante estudios de caracterización avanzada y propiedades mecánicas, en pastas endurecidas de CP sustituidas en 15 y 45 % por CBCA; además se utilizó pastas de referencia con 100 % CP sobre las cuales se evaluó las resistencias mecánicas (RM), el consumo de hidróxido de calcio y el desarrollo de los productos de reacción. Los resultados revelaron que los valores más altos de RM reportados fueron por el sistema de referencia indicando que la RM disminuyó con el incremento en el porcentaje de sustitución. Por medio de los análisis de difracción de rayos X (DRX) y análisis térmicos por ATG/ATD fue demostrado el consumo de  $\text{Ca(OH)}_2$  que dio lugar a la formación de gel CSH como principal producto de hidratación y responsable de la ganancia de las propiedades

mecánicas. Los productos de reacción fueron observados también por microscopía electrónica de barrido (MEB) donde el mecanismo en estado sólido fue notable. A partir de estos resultados se puede concluir que las CBCA son un material puzolánico con una mejor reactividad frente al  $\text{Ca(OH)}_2$  con 15 % de sustitución. (Tórrez-Rivas, et al., 2014).

En otra investigación realizada en 2015, usando adiciones no convencionales por sustitución del cemento se obtuvo lo siguiente:

Se fabricaron bloques ecológicos con dimensiones comerciales a nivel industrial, en los que se reemplazó un porcentaje del contenido cemento por cascarilla de arroz, ceniza de la cascarilla de arroz y ceniza volante (caracterizadas mediante ensayos de granulometría, masa unitaria y humedad), en 10, 15 y 20 %, manteniendo constante la cantidad de agua y arena de mezclado del bloque. Los bloques ecológicos obtenidos se analizaron mecánicamente, y se determinó la resistencia a compresión, obteniendo como resultados promedio 0.585 MPa, 0,743 MPa y 0,956 MPa para cascarilla de arroz, ceniza de la cascarilla de arroz y ceniza volante, respectivamente, a los 7, 28 y 45 días de curado; dichas resistencias se compararon con la del patrón, que consistían en el bloque de referencia con 100% de cemento, las cuales fueron de 0.802 MPa, para observar las características cementantes de las adiciones, las cuales afectan considerablemente la resistencia del eco-bloque. Mediante los resultados obtenidos, se concluyó que el porcentaje óptimo de adición es el 15 % de ceniza de centrales térmicas a los 28 días de curado, como reemplazo parcial del cemento en bloques de concreto, resaltando que aunque existe una disminución en la resistencia a la compresión y tensión en algunos casos, es viable el uso de las adiciones para la elaboración de bloques de concreto como propuesta efectiva para la reutilización

de estos residuos que sirven de guía hacia el desarrollo de materiales más competitivos técnica, económica y ambientalmente. (Fuentes, et al., 2015).

En otra investigación realizada se evaluó el efecto de la ceniza de caña de azúcar (CBCA) en la resistencia del concreto de 210 kg/cm<sup>2</sup>, reemplazando parcialmente CBCA por el cemento, en proporciones de 20 y 40%. Los resultados mostraron que la resistencia a la compresión del concreto disminuyó con el incremento de la proporción de ceniza, por debajo de la mezcla de diseño. El concreto con 20% de CBCA tuvo mejor comportamiento a compresión a los 7 y 28 días de curado, aunque ambas estuvieron 59% por debajo del concreto estándar (control). Esto sugiere no recomendar la CBCA para el uso estructural por su disminuida resistencia a la compresión. (Farfán, 2018).

### **I.7 Extracto de Nopal**

La investigación realizada en similitud al extracto de nopal, pero utilizando otro proceso de extracción, en resumen, fue la siguiente:

Se utilizaron soluciones de mucílago de nopal y de alginato al 0.50% para sustituir el agua de mezclado, con el objetivo de determinar su efecto en los tiempos de fraguado e hidratación de pastas de cemento, así como en la resistencia a la compresión y en especial en las propiedades de durabilidad de concreto hidráulico. Las pastas de cemento y los concretos se elaboraron con relaciones agua/cemento = 0.30 y 0.60. En las pastas de cemento se determinaron los tiempos de fraguado con la aguja Vicat y se realizaron mediciones de espectroscopia infrarroja en función del tiempo para observar cambios en el proceso de hidratación del cemento a edades tempranas. Se colaron 288 especímenes

cilíndricos de concreto midiendo 100 mm de diámetro y 200 mm de longitud, los cuales se curaron en húmedo por 0 y 28 días a una temperatura de  $23 \pm 3$  °C. Las propiedades evaluadas en estado endurecido fueron la resistencia a la compresión, la absorción capilar de agua, la permeabilidad rápida a cloruros, la difusión de iones cloruro y la carbonatación a diferentes edades. Para conocer el posible efecto de estas adiciones en la solución de poro del concreto, se realizaron pruebas electroquímicas en varillas de acero embebidas en soluciones de mucílago de nopal y alginato a diferentes concentraciones. Los resultados en las pastas de cemento indican que las adiciones orgánicas incrementaron los tiempos de fraguado. Los espectros de FTIR mostraron únicamente un retardo en la aparición de portlandita en la pasta en estado fresco con relación  $a/c = 0.30$  conteniendo mucílago de nopal. Los resultados obtenidos de resistencia a la compresión y propiedades de durabilidad indican en general una mejora en los concretos que contienen las adiciones orgánicas, dependiendo del tiempo de curado y edad del concreto. Las pruebas electroquímicas mostraron que las varillas embebidas en las adiciones estudiadas, principalmente las de mucílago de nopal, tuvieron mayor resistencia a la corrosión por cloruros (Hernández, 2012).

En esta investigación se evaluó el efecto de una solución de mucílago de nopal al 3% en los tiempos de fraguado, fluidez, hidratación y microestructura de pastas de cemento y absorción capilar de agua y difusión de cloruros en hormigón. La hidratación fue caracterizada por XRD y la microestructura por medio de SEM. Las relaciones solución de mucílago/cemento y agua/cemento fueron 0,30, 0,45 y 0,60. Los resultados en las pastas de cemento indican que el mucílago retarda los tiempos de fraguado, reduce la fluidez, retarda la hidratación del cemento e

inhibe la formación de cristales de hidróxido de calcio, comparados con los controles. La absorción capilar en hormigón conteniendo mucílago se redujo significativamente y los coeficientes de difusión de cloruros disminuyeron hasta un 20% en la mezcla mucílago/cemento = 0,30. En la relación mucílago/cemento = 0,45, la reducción fue marginal, y en la relación mucílago/cemento = 0,60, el coeficiente de difusión fue mayor que el control para los especímenes sin curado en húmedo. (Ramírez et al., 2012)

En la investigación realizada, se estudió la influencia de la adición de mucílago de nopal (*Opuntia ficus-índica*) en las propiedades mecánicas del concreto permeable. Las variables estudiadas fueron la resistencia a la compresión, resistencia a la tracción por compresión diametral y la permeabilidad. Se realizó 4 diseños de mezcla considerando los mismos criterios de diseño; relación a/c de 0.35, 16.30 % de contenido de vacíos, 10 % de agregado fino, b/b<sub>0</sub> = 0.93 y 24.5 % de volumen de pasta (Mezcla Tipo I: concreto permeable base, Mezcla Tipo II: concreto permeable (CP) con 1 % de mucílago de nopal (MN), Mezcla Tipo III: CP con 3 % MN y Mezcla Tipo IV: CP con 5 % MN, en peso cemento); de las mezclas elaboradas con mucílago de nopal, la Mezcla Tipo II presentó mejores resultados en comparación a las otras dos mezclas (Mezcla Tipo III y Mezcla Tipo IV) con una resistencia a la compresión de 229.55 kg/cm<sup>2</sup>, resistencia a la tracción por compresión diametral de 20.82 kg/cm<sup>2</sup> y una permeabilidad de 0.66 cm/s. La adición de mucílago de nopal (*Opuntia ficus-índica*) en el diseño de mezcla del concreto permeable mejora la resistencia a la compresión; sin embargo, se presentan tendencias a la reducción de la resistencia a la tracción por compresión diametral y permeabilidad en comparación al concreto permeable base (Mezcla Tipo I). (Inga, 2019).

Hernández, et. al. (2016), publicó un artículo llamado: “*Influence of cactus mucilage and marine brown algae extracto on the compressive strength and durability of concrete*” en donde presentó lo siguiente:

El comportamiento mecánico y de durabilidad de concretos con relaciones agua/cemento de 0.30 y 0.60, conteniendo soluciones de mucílago de nopal y extracto de algas marinas café (0.5 Brix de concentración); se elaboró especímenes cilíndricos (100 mm×200 mm) los cuales fueron curados en húmedo por 0 y 28 días, se evaluó la resistencia a la compresión, permeabilidad rápida y difusión de cloruros a los 60 y 120 días de edad; además, se realizaron pruebas de carbonatación acelerada en especímenes con 180 días de edad, expuestos a 23 grados centígrados, 60% HR y 4.4% de CO<sub>2</sub> por 120 días; los resultados de resistencia a la compresión muestran que únicamente una mezcla de concreto con adición orgánica incrementó su resistencia con respecto al control, con respecto a la permeabilidad rápida a cloruros, difusión de cloruros y carbonatación, los resultados indican que la durabilidad de los concretos que contienen adiciones orgánicas fue mejorada con respecto al control.

A partir de los estudios realizados por los autores anteriores, quienes han enfocado sus trabajos en la mejoría físico-mecánica del concreto por medio de la adición como sustitución parcial de los agregados, explícitamente el cemento, este trabajo de investigación se enfocara en mejorar el desempeño físico-mecánico del concreto con el uso de adiciones no convencionales (ceniza de bagazo de caña, extracto de nopal, polvo de vidrio) como *filler*, es decir, como agregado extra, sin sustitución de algunos de los agregados del concreto.

Es decir, de acuerdo a la información revisada de las investigaciones antes mencionadas, el estudio para mejorar el desempeño físico-mecánico del concreto se viene desarrollando desde el enfoque original de la creación del Cemento Portland Ordinario (CPO), ya que desde sus inicios, este material ha impactado mucho al medio ambiente, debido a que una tonelada de cemento genera una tonelada de CO<sub>2</sub> (France 24, 2021) dando así origen al uso de adiciones complementarias a los materiales cementantes y principio a los cementos con adiciones como el Cemento Portland Compuesto (CPC) y el Cemento Portland Puzolánico (CPP) en los cuales la selección de la adición ha sido fundamental, bien sea de materiales de subproductos de otros procesos o de origen natural como las mismas puzolanas, donde algunos de ellos no tienen propiedades cementantes, pero en combinación con el cemento portland reaccionan para formar un producto cementante, a su vez, dichos materiales han sido utilizados para mejorar las propiedades del concreto como son la consistencia, trabajabilidad, tiempo de fraguado, exudación, la resistencia y la durabilidad, por lo que dichas propiedades se evaluarán a través de métodos de ensayos establecidos para determinar el comportamiento físico-mecánico del concreto de acuerdo a las Normas Mexicanas correspondientes, como son NMX-C-159, NMX-C-161, NMX-C-156, NMX-C-083, entre otras, las cuales permitirán comprender las mejoras en el desempeño del concreto por el uso de adiciones no convencionales (ceniza de bagazo de caña, extracto de nopal, polvo de vidrio) como *filler*.

## II. Metodología

La combinación de diferentes panoramas metodológicos para analizar distintos ángulos de un mismo objeto de investigación permite combinar distintos niveles de análisis. (Cantor, G, 2002, p.2).

El presente estudio de investigación tendrá un diseño experimental puro ya que está realizada con un enfoque científico y es el que mejor se adapta a los requerimientos del estudio. El diseño experimental tiene como objetivo “medir probabilísticamente la relación causal que se establece entre las variables y estar en posibilidad de confirmar o rechazar las hipótesis sometidas a prueba” (Rojas, 2013, p.272).

Por su parte el diseño experimental puro consiste en incluir dos grupos de investigación, el que recibe el tratamiento experimental y el que no, el cual llamaremos “patrón” o “grupo de control”, una vez concluida la manipulación, a ambos grupos se les aplicará una medición. Para dicha investigación se pretende estudiar 3 tipos de adiciones no convencionales a una mezcla de concreto para evaluar el desempeño físico-mecánico, y dentro de dicha evaluación también se analizará que porcentaje de adición es el adecuado a implementar en dicha mezcla. De la misma manera, esta investigación, conforme a lo mencionado anteriormente será una investigación descriptiva como lo menciona Lafuente (2008), quien argumenta que “la investigación descriptiva se lleva a cabo cuando se quiere mostrar las características de un grupo, de un fenómeno o de un sector, a través de la observación y medición de sus elementos” (p. 9).

Dado que se pretende comprobar la hipótesis previamente establecida, así como los objetivos establecidos, el presente trabajo de investigación se realizará bajo el planteamiento metodológico del enfoque cuantitativo. Por lo que, partiendo de que “las investigaciones

cuantitativas se centran en la teoría sustantiva del problema a investigar, ya que de ahí se derivan las proposiciones o conceptos que luego serán incorporados al objetivo de investigación” (Sautu, 2010, p. 46), esta investigación está centrada en la elaboración de probetas de ensayo y recolección de datos para comprobar la hipótesis de que la adición de elementos no convencionales empleados como *filler* en la mezcla de concreto mejora su desempeño físico-mecánico.

Dichos datos se conseguirán a partir de la medición numérica y estadística la cual es obtenida de los ensayos experimentales que se aplicarán en este proyecto de investigación a cada probeta, por medio de la caracterización de los materiales en donde se determinan las propiedades de cada uno de los materiales agregados, diseños de mezclas de concreto, así como la realización de distintos métodos de pruebas y ensayos, todo esto con el fin de establecer pautas de comportamiento y evaluar el desempeño de las adiciones en las mezclas de concreto.

Se iniciará seleccionando y caracterizando los materiales pétreos, vítreos y orgánicos seleccionados para la investigación, como son el vidrio, la ceniza de bagazo de caña y extracto de nopal que podrán ser utilizados, siendo más recomendables los que presenten menor cantidad de impurezas, para mejorar la reactividad con el cemento al ser usados como adición en los respectivos ensayos.

Se determinarán los diversos porcentajes de vidrio, ceniza de bagazo de caña y extracto de nopal a adicionar en el concreto, cuyos ensayos estarán basados en las normativas nacionales, como por ejemplo la NMX-C-159-OnNCCE-2004, la cual menciona que, los aditivos en polvo que sean completamente o en gran parte insolubles, que no contienen sales higroscópicas y que deban agregarse en pequeñas cantidades, deben ser mezclados con una porción del cemento antes de introducir los materiales a la revolvedora, para asegurar una mezcla uniforme en todo el

concreto, materiales, esencialmente insolubles que sean empleados en cantidades mayores de un 10 % en masa del cemento, tales como puzolanas, deben ser manejados y agregados a la revoltura en la misma forma que el cemento.

Otro ejemplo sería la NMX-C-414-ONNCCE-2017, esta norma establece los requisitos de los componentes (escoria granulada de alto horno, puzolana, humo de sílice y caliza) las características físicas (resistencia a 28 y 3 días, tiempo de fraguado y estabilidad de volumen), las características químicas (pérdida por ignición, residuo insoluble y trióxido de azufre) y las características especiales (Resistente a los sulfatos, baja reactividad álcali agregado, bajo calor de hidratación y blanco) de los cementos hidráulicos de acuerdo a su tipo (CPO, CPP, CPEG, CPC, CPS y CEG), clase resistentes (20, 30, 30 R, 40, y 40 R) y clasificación por características especiales.

Así también, dichos ensayos estarán basados en los trabajos realizados por distintos investigadores para analizar y comparar los resultados obtenidos en este proyecto. Por ejemplo, Muñoz-Pérez, S. P. et al. (2015); que establecen un estudio sobre el Comportamiento físico-mecánico del concreto adicionando residuos de acero, otro autor es Frómeta-Salas, Z.P., et. al., (2020) quién hace el empleo del vidrio reciclado triturado en sustitución parcial del árido fino para elaborar hormigón con finos de sostenibilidad, por mencionar alguno. En el caso del uso de bagazo de caña podemos citar como ejemplo a Farfán Córdova, M. G. (2018) y Tórrez-Rivas, B., Gaitán-Arévalo, J., Espinoza-Pérez, L., y Escalante-García, J. (2014), quienes estudiaron el uso de la ceniza de bagazo de caña (CBC) como remplazo parcial del cemento portland, y por último Flores Gutiérrez, E., Domínguez Flores, Osias quienes realizaron una evaluación de la eficiencia del

extracto de nopal en la matriz de concreto usando agregados de la región para el mejoramiento de sus propiedades de resistencia a la compresión.

Para realizar los ensayos se aplicará la norma NMX-C-159-ONNCCE-2016 y NMX-C-161-ONNCCE-2013, las cuales instaran los procedimientos para la elaboración de especímenes de concreto convencional y de concreto alternativo ya sea en obra o dentro de un ambiente controlado como es el laboratorio para los distintos porcentajes de adición del agregado que van de 0 a 20% como *filler* para el estudio de polvo de vidrio y ceniza de bagazo de caña y, del 0 al 2% como aditivo en el caso del extracto de nopal, de acuerdo a porcentajes usados en estudios de referencia.

Se elaborarán un estimado de 12 probetas cilíndricas de 15x30 cm por tipo de mezcla de concreto para el ensayo de resistencia a la compresión, es decir para el análisis de 7, 14, 28 y 56 días se ensayarán 3 probetas por día de prueba para cada diseño de mezcla y 2 probetas para el ensayo de pulso de ultrasonido para el día 28 en cilindros de 10 x 20 cm, sumando así un total de 14 probetas de concreto. Esta misma cantidad de probetas se elaborarán respectivamente para el ensayo de la ceniza de bagazo de caña, como material extra a la mezcla de concreto para los porcentajes de adición del 0%, 5%, 10%, 15% y 20%. Para el caso de polvo de vidrio se efectuarán para los porcentajes de adición del 0%, 5% 10%, 15% y 20%. Y, por último, para el caso del extracto de caña al igual como material extra a la mezcla de concreto, se usará para los porcentajes de aditivo del 0%, 0.5%, 1% y 2%. Es importante mencionar que los materiales a utilizar en este estudio son de la región de Chiapas, así como el desarrollo de la investigación que será en el laboratorio de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Chiapas.

Una vez definido esto, se comenzará con la primera etapa para la evaluación de la adición o proporción adecuada a implementar de los materiales no convencionales, es decir, cantidad de polvo de vidrio, ceniza de bagazo de caña y cuantos mililitros de extracto de nopal son los adecuados a usar para una mezcla de concreto con cierto requerimiento de resistencia mecánica, lo anterior se basará de acuerdo a la norma NMX-C-156 en donde se establece los procedimientos para diagnosticar la consistencia de la mezcla de concreto en estado fresco a través del método de ensayo conocido como revenimiento.

Se realizará el ensayo a compresión de cada una de las muestras de acuerdo a lo establecido en la norma NMX-C-083, la cual indica el método de ensayo para determinar las propiedades mecánicas del concreto convencional de las muestras cilíndricas, con las que se evaluará la mezcla con adición parcial por polvo de vidrio, ceniza de bagazo de caña y extracto de nopal respectivamente.

Se realizará la prueba de pulso de ultrasonido respectivamente en cada una de los especímenes de concreto conforme al porcentaje de adición de polvo de vidrio, ceniza de bagazo de caña y extracto de nopal. Dicho ensayo de pulso estará basado en la norma ASTM C597 – Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete, que consiste en medir el tiempo que demora un pulso ultrasónico (frecuencia entre 20 y 150 kHz) al recorrer la distancia entre un transductor emisor  $T_x$  y un transductor receptor  $R_x$ , ambos acoplados al concreto en estudio.

Por último, se evaluarán y compararán los resultados obtenidos de los especímenes elaborados con la finalidad de determinar el porcentaje óptimo de cada adición en particular, para así poder evaluar en general cual adición y en qué porcentaje mejora el desempeño físico-mecánico del concreto, todos comparados con respecto a las probetas de control.

### III. Resultados y Discusión

A continuación, se presentan los resultados y discusión de las pruebas realizadas a los especímenes de concreto de acuerdo a cada tipo de adición y aditivo respectivamente, siendo esto posterior al desarrollo experimental de los ensayos normativos, en donde se pudo identificar la influencia de las adiciones en las propiedades mecánicas del concreto, se determinó las propiedades de pulso de ultrasonido de los concretos con adiciones, el porcentaje óptimo de las adiciones así como una comparativa entre los resultados de cada adición por lo que se logró determinar el porcentaje óptimo en el desempeño físico-mecánico del concreto. El estudio de investigación se realizó como un diseño experimental puro el cual consistió en incluir 4 grupos de investigación, los que recibieron el tratamiento experimental y el que no, al que se le denominó “mezcla control”, dando como resultado lo siguiente:

#### III.1 Desarrollo Experimental

En lo que respecta al desarrollo experimental, se presentan cada uno de los puntos que lo componen, los cuales van desde la caracterización de materiales, diseño de la mezcla, proporcionamiento de adiciones y aditivo, elaboración de los especímenes de concreto, ensayos de revenimiento, ensayos de resistencia a la compresión simple, pulso de ultrasonido a utilizar hasta los resultados del ensayo de cada una de las muestras cilíndricas.

#### III.2 Caracterización de Materiales

Se analizaron las propiedades de cada uno de los agregados tanto fino como grueso, los cuales se utilizaron en la elaboración de los especímenes de concreto, dichas propiedades fueron:

- **Granulometría:** es un ensayo que tiene por objeto determinar los tamaños de las partículas de cada uno de los agregados pétreos con la ayuda de tamices, los cuales son charolas con

mallas, las cuales tienen aberturas cuadradas de variados tamaños, de acuerdo al número de tamiz.

- Densidad: es una propiedad definida por la relación que existe entre el peso y el volumen de una masa determinada.
- Absorción: este se determina de acuerdo al incremento en masa del agregado pétreo por el agua absorbida, esta diferencia se expresa en porcentaje entre el estado saturado del material y seco.
- Peso Volumétrico: es el peso del agregado pétreo que se necesita para llenar un volumen específico.
- Peso específico: es la relación en peso de la densidad del agregado pétreo respecto al peso del agua.

### III.2.1 Agregado Fino

El agregado fino empleado es el proveniente del Río Santo Domingo del Estado de Chiapas. En la Tabla 1 se presentan las propiedades físicas del agregado, así como la granulometría de la arena representada en la gráfica siguiente (Figura 1), en donde se puede apreciar que la curva que representa la arena andesita se encuentra dentro del rango de límites establecidos por las normas NMX-C-073, NMX-C-077-ONNCCE, NMX-C-165, NMX-C-166, lo cual nos indica que la arena utilizada cumple con los requisitos

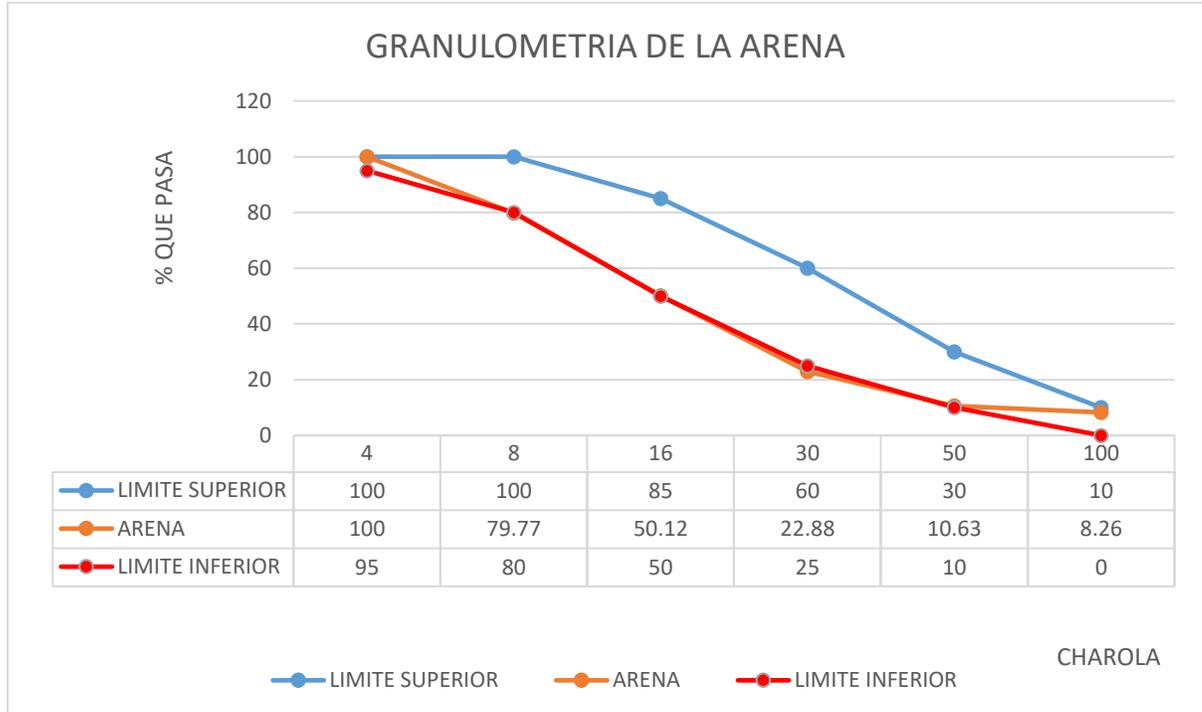
**Tabla 1.**

*Propiedades físicas de la Arena del Río Santo Domingo, Chiapas.*

| <b>Propiedades</b>                                         |              |
|------------------------------------------------------------|--------------|
| Módulo de finura                                           | 2.8          |
| Calificación de las arenas en función del módulo de finura | Arena gruesa |
| Peso específico, seco                                      | 2.23         |
| Peso específico, sss                                       | 2.38         |
| Absorción, %                                               | 6.73         |
| Densidad                                                   | 2.97         |
| Pasa malla #200, %                                         | 3            |
| Peso volumétrico seco (suelto) kg/m <sup>3</sup>           | 1502         |
| Peso volumétrico seco (compactado) kg/cm <sup>3</sup>      | 1646         |

**Figura 1.**

*Grafica de curva granulométrica de la arena andesita, Rio Santo Domingo, Chiapas.*



### III.2.2 Agregado Grueso

Para la elaboración de los especímenes de concreto se utilizó agregado grueso de 19mm (3/4”) de tamaño máximo, de origen calizo proveniente del Banco de materiales Río Grijalva. En la Tabla 2 se presentan las propiedades físicas del agregado, así como la granulometría de la grava caliza representada en la gráfica siguiente (Figura 2), en donde se puede apreciar que la curva que representa la grava caliza se encuentra dentro del rango de límites establecidos por las normas NMX-C-073, NMX-C-077, NMX-C-164 y NMX-C-166.

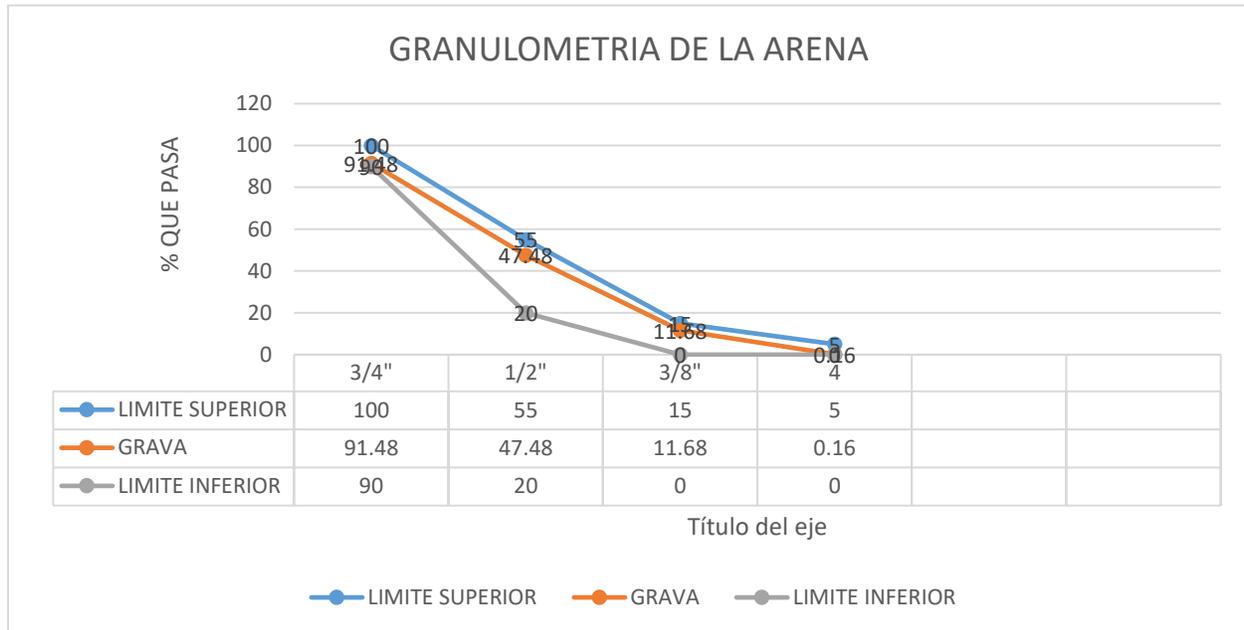
**Tabla 2.**

*Propiedades físicas de la grava.*

| <b>Propiedades</b>                                    |           |
|-------------------------------------------------------|-----------|
| Tamaño Máximo, mm(pulg)                               | 19 (3/4") |
| Peso específico, seco                                 | 2.69      |
| Peso específico, sss                                  | 2.70      |
| Absorción, %                                          | 2.49      |
| Densidad                                              | 2.87      |
| Peso volumétrico seco (suelto) kg/m <sup>3</sup>      | 1300      |
| Peso volumétrico seco (compactado) kg/cm <sup>3</sup> | 1488      |

**Figura 2.**

*Grafica de curva granulométrica de la grava.*



### III.2.3 Agua

El agua, la cual fue utilizada para la elaboración de las mezclas de concreto durante las pruebas realizadas fue agua potable, proporcionada por el sistema de distribución de la Universidad Autónoma de Chiapas, por lo tanto, entendemos por agua potable la idónea para el consumo y empleo humano ya que existen en ella sustancias como aceites, ácidos, sustancias alcalinas ni materias orgánicas que puedan ser perjudiciales para la salud y para su uso en las pruebas realizadas de acuerdo a la norma NMX-C-122, la cual establece los valores característicos y límites máximos tolerables de sales e impurezas de las aguas que se pretendan emplear en la elaboración o curado del concreto hidráulico; asimismo, refiere la acción agresiva de diferentes tipos de agua.

### III.2.4 Cemento

El cemento utilizado para la elaboración de las mezclas de concreto fue un cemento portland Tipo II compuesto (CPC 30 R RS) marca “Cruz Azul”, el cual cemento con resistencia especificada a 3 días y resistencia a sulfatos que al combinar el *clinker* con materiales cementantes suplementarios pueden alcanzar resistencias mecánicas altas.

### III.2.5 Vidrio

El polvo de vidrio utilizado proviene en su mayoría de vidrierías y botellas de uso común desechadas en viviendas. Este se procesó y homogenizó a través del triturado, molienda y tamizado por la malla #100, para así obtener la granulometría que permitan usarlo como agregado complementario de relleno o *filler*. Los materiales ajenos al vidrio se retiran de forma manual antes del triturado, a fin de evitar la existencia de contaminantes que influyan de manera negativa en las pruebas.

### III.2.6 Ceniza de bagazo de caña

El material utilizado para la elaboración de las muestras se obtuvo del ingenio azucarero ubicado en el Municipio de Venustiano Carranza, Chiapas, denominado San Francisco Pujiltilic, producto de la incineración del bagazo de caña en calderas a temperaturas aproximadas entre los 700 y 900°C. Con la finalidad de obtener un material libre de residuos se realizó el proceso de tamizado utilizando los tamices No. 100 y 200, consiguiendo así un material más óptimo.

### III.2.7 Extracto de nopal

El nopal utilizado en el desarrollo de esta investigación fue nopal crinado (*Opuntia pilifera*), coloquialmente conocido como nopal de puebla, este fue extraído en la localidad de Vicente Guerrero, municipio de Ocozocoautla de Espinoza. Para su extracción, primero se

escogieron y cortaron las hojas de nopal que se usaron para después limpiarlas y lavarlas con agua potable, posteriormente con la ayuda de un cuchillo se eliminaron las espinas, tallos e impurezas de las hojas de nopal para después cortarlas en trozos medianos y poder introducirlos en un extractor de jugos sin el uso de agua para poder así obtener el extracto puro de nopal seco.

**Figura 3.**

*Nopal crinado*



**Figura 4.**

*Nopal lavado y sin impurezas*



Una vez hecho esto, la pulpa extraída se mezcló con agua a una proporción 1:1 y con el apoyo de una batidora se mezcló para después colar el contenido y obtener un extracto mucho más limpio, es decir, extracto de nopal con agua. Como siguiente paso, al extracto obtenido se procedió a calentarlo dentro de una olla durante un periodo de tiempo de 15 min mezclando el extracto constantemente para así dejarlo enfriar y almacenar en botellas dentro de un enfriador para su uso en las mezclas de concreto.

**Figura 5.**

*Mezclado del extracto de nopal*



**Figura 6.**

*Colado del extracto de nopal*



**Figura 7.**

*Almacenaje de extracto de nopal*



### III.3 Diseño de la mezcla de concreto

Las mezclas de concreto realizadas en este proyecto de investigación se realizaron de acuerdo al Método de volúmenes absolutos del ACI 211. En la siguiente tabla se presenta el proporcionamiento de materiales necesarios para realizar 1 m<sup>3</sup> de concreto con una dosificación de relación a/c de 0.62, las cuales fueron ensayados a los 7, 14, 28 y 56 días de edad curados por inmersión en un tanque de curado.

**Tabla 3.**

*Proporcionamiento de dosificación para concreto con relación a/c=0.62*

| Material | Peso | Unidad |
|----------|------|--------|
| Cemento  | 330  | Kg     |
| Grava    | 984  | Kg     |
| Arena    | 826  | Kg     |
| Agua     | 205  | L      |

Para este proyecto se consideraron adiciones y un aditivo natural, las cuales se caracterizaron en estado fresco mediante ensayos de revenimiento, temperatura y peso volumétrico, por lo que se presentaran las proporciones empeladas:

### III.3.1 Proporcionamiento para adiciones de polvo de vidrio y ceniza de bagazo de caña

Para el diseño de mezclas de concreto con adiciones, se empleó el polvo de vidrio y ceniza de bagazo de caña como *filler* o material de relleno, para densificar las mezclas de concreto sin modificar la relación a/c. El proporcionamiento empleado para cada diseño se presenta en las siguientes tablas:

**Tabla 4.**

*Proporcionamiento de dosificación para concretos con adición de polvo de vidrio*

| <b>Material</b>        | <b>0%</b> |    | <b>5%</b> |    | <b>10%</b> |    | <b>15%</b> |    | <b>20%</b> |    |
|------------------------|-----------|----|-----------|----|------------|----|------------|----|------------|----|
| <b>Cemento</b>         | 330       | Kg | 330       | Kg | 330        | Kg | 330        | Kg | 330        | Kg |
| <b>Grava</b>           | 984       | Kg | 984       | Kg | 984        | Kg | 984        | Kg | 984        | Kg |
| <b>Arena</b>           | 826       | Kg | 836       | Kg | 826        | Kg | 826        | Kg | 826        | Kg |
| <b>Agua</b>            | 205       | L  | 205       | L  | 205        | L  | 205        | L  | 205        | L  |
| <b>Polvo de vidrio</b> | 0         | Kg | 16.5      | kg | 33         | kg | 49.5       | kg | 66         | kg |

**Tabla 5.**

*Proporcionamiento de dosificación para concretos con adición de ceniza de bagazo*

| Material       | 0%  |    | 5%   |    | 10% |    | 15%  |    | 20% |    |
|----------------|-----|----|------|----|-----|----|------|----|-----|----|
| <b>Cemento</b> | 330 | Kg | 330  | Kg | 330 | Kg | 330  | Kg | 330 | Kg |
| <b>Grava</b>   | 984 | Kg | 984  | Kg | 984 | Kg | 984  | Kg | 984 | Kg |
| <b>Arena</b>   | 826 | Kg | 836  | Kg | 826 | Kg | 826  | Kg | 826 | Kg |
| <b>Agua</b>    | 205 | L  | 205  | L  | 205 | L  | 205  | L  | 205 | L  |
| <b>CBC</b>     | 0   | Kg | 16.5 | kg | 33  | kg | 49.5 | kg | 66  | kg |

### III.3.2 Proporcionamiento para aditivos de extracto de nopal

Para el extracto de nopal, se empleó como aditivo en 3 diferentes porcentajes. A continuación, se presenta la tabla de proporcionamiento para este aditivo natural:

**Tabla 6.**

*Proporcionamiento de dosificación para concretos con aditivo natural de extracto de Nopal*

| Material                 | 0%  |    | 0.5% |    | 1%  |    | 2%  |    |
|--------------------------|-----|----|------|----|-----|----|-----|----|
| <b>Cemento</b>           | 330 | Kg | 330  | Kg | 330 | Kg | 330 | Kg |
| <b>Grava</b>             | 984 | Kg | 984  | Kg | 984 | Kg | 984 | Kg |
| <b>Arena</b>             | 826 | Kg | 836  | Kg | 826 | Kg | 826 | Kg |
| <b>Agua</b>              | 205 | L  | 205  | L  | 205 | L  | 205 | L  |
| <b>Extracto de Nopal</b> | 0   | L  | 1.65 | L  | 3.3 | L  | 6.6 | L  |

### III.4 Revenimiento

De las mezclas de concreto elaboradas, se les realizo la prueba de revenimiento, para evaluar la consistencia y trabajabilidad de las mismas en estado fresco, las cuales se presentan en la siguiente tabla de resultados.

#### Figura 8.

*Toma del ensayo de revenimiento de una mezcla de concreto con polvo de vidrio de acuerdo a la Norma NMX-C-156*



**Figura 9.**

*Toma del ensayo de revenimiento de una mezcla de concreto con CBC de acuerdo a la Norma NMX-C-156*



**Tabla 7.**

*Resultados de la prueba de Revenimiento por cada tipo de mezcla*

| Mezcla de concreto         | Revenimiento (cm) |
|----------------------------|-------------------|
| Mezcla de control          | 9                 |
| Mezcla polvo de vidrio 5%  | 8                 |
| Mezcla polvo de vidrio 10% | 8                 |
| Mezcla polvo de vidrio 15% | 8                 |
| Mezcla polvo de vidrio 20% | 7.5               |
| Mezcla CBC 5%              | 8.5               |
| Mezcla CBC 10%             | 8                 |
| Mezcla CBC 15%             | 8                 |
| Mezcla CBC 20%             | 7                 |
| Mezcla Extracto Nopal 0.5% | 9.5               |
| Mezcla Extracto Nopal 1.0% | 11                |
| Mezcla Extracto Nopal 2.0% | 12.5              |

Los resultados obtenidos muestran la consistencia conseguida para la mezcla de control y las mezclas con adiciones y aditivos. La mezcla de control se diseñó para un revenimiento aproximado de 8 cm, la cual se considera aceptable de acuerdo al resultado obtenido por el ensayo. Sin embargo, para los diferentes porcentajes de adición de polvo de vidrio, la consistencia no se vio disminuida por el uso del polvo de vidrio y fue aceptable; para el caso de la ceniza de bagazo de caña, se obtuvieron resultados considerablemente aceptables de acuerdo al mismo diseño, notando que entre más ceniza se empleaba, tenía una consistencia más espesa la mezcla de concreto, diferente a la de control y polvo de vidrio, disminuyendo levemente su trabajabilidad. Por último, las mezclas de concreto con extracto de nopal, mostraron un mejor desempeño a este ensayo, pues incrementaron su consistencia plástica y trabajabilidad, proporcionando una mezcla

un poco más fluida, permitiendo notar un comportamiento como el de un aditivo fluidificante de concreto.

### III.5 Elaboración de cilindros de concreto

Una vez establecido el diseño de las mezclas de concreto así como el proporcionamiento de la dosificación para las distintas adiciones y aditivos se procedió a la elaboración de las mezclas de concreto con base a las normas NMX-C-159 y NMX-C-161, las cuales establecen los procedimientos para la elaboración y curado ya sea en obra o en el laboratorio, de los especímenes de concreto utilizados para los ensayos así como el método para la obtención de muestras de concreto fresco para poder realizar los ensayos y determinar el cumplimiento de los requisitos de la calidad.

#### Figura 10.

*Mezclado de los materiales en una revolvedora con capacidad de 1 saco*



**Figura 11.**

*Varillado de cilindros para compactar el material*



Se elaboraron 12 probetas cilíndricas de 15x30 cm de acuerdo a la especie de mezcla de concreto para el ensayo de resistencia a la compresión, es decir para poder analizar de 7, 14, 28 y 56 días y poder ensayar 3 probetas por día de prueba para cada diseño de mezcla y 2 probetas para el ensayo de pulso de ultrasonido para el día 28 en cilindros de 10 x 20 cm, sumando así un total de 14 probetas de concreto. Esta misma cantidad de probetas se elaboraron respectivamente para el ensayo de la ceniza de bagazo de caña, polvo de vidrio y extracto de nopal de acuerdo a cada porcentaje de proporcionamiento de dosificación, dando un total de 196 cilindros de concreto.

### III.6 Ensayo de resistencia a la compresión simple

La resistencia a compresión del concreto se determinó con el objetivo de comprobar si las dosificaciones propuestas para los distintos porcentajes de adiciones y aditivos son adecuadas con la resistencia de diseño propuesta, en este caso las resistencias forman parte de un análisis comparativo entre los especímenes de control y los que conforman un porcentaje de adiciones y aditivo para determinar su comportamiento mecánico.

#### Figura 12.

*Ensayo de especímenes de acuerdo a la Norma NMX-C-083-ONNCCE-2014, 2015*



Una vez obtenida la carga de falla de los especímenes se procedió a calcular la resistencia a compresión de cada espécimen, los resultados que se presentan a continuación son del promedio de 3 cilindros de cada uno ensayados a las edades correspondientes de 7, 14, 28 y 56 días de edad, los cuales se muestran en la siguiente tabla.

Donde:

PV: Polvo de vidrio

CBC: Ceniza de Bagazo de Caña

EN: Extracto de Nopal

**Tabla 8.**

*Resultados de la prueba de Resistencia a la Compresión Simple*

| Muestra | Edad, Días | Volumen cm <sup>3</sup> | Peso kg | Peso volumétrico kg/m <sup>3</sup> | Carga de ruptura, kg | Resistencia, kg/cm <sup>2</sup> |
|---------|------------|-------------------------|---------|------------------------------------|----------------------|---------------------------------|
| Control | 7          | 5301.40                 | 12.319  | 2332                               | 29113                | 165.25                          |
| Control | 14         | 5301.40                 | 12.305  | 2351                               | 39984                | 226.95                          |
| Control | 28         | 5301.40                 | 12.312  | 2359                               | 44045                | 250.02                          |
| Control | 56         | 5301.40                 | 12.318  | 2328                               | 48824                | 277.13                          |
| PV 5%   | 7          | 5301.40                 | 12.318  | 2293                               | 28188                | 160.00                          |
| PV 5%   | 14         | 5301.40                 | 12.388  | 2330                               | 38778                | 220.11                          |
| PV 5%   | 28         | 5301.40                 | 12.314  | 2314                               | 44002                | 249.76                          |
| PV 5%   | 56         | 5301.40                 | 12.335  | 2322                               | 48014                | 272.53                          |
| PV 10%  | 7          | 5301.40                 | 12.316  | 2308                               | 27307                | 154.99                          |
| PV 10%  | 14         | 5301.40                 | 12.397  | 2319                               | 38406                | 218.00                          |
| PV 10%  | 28         | 5301.40                 | 12.415  | 2325                               | 42286                | 240.02                          |

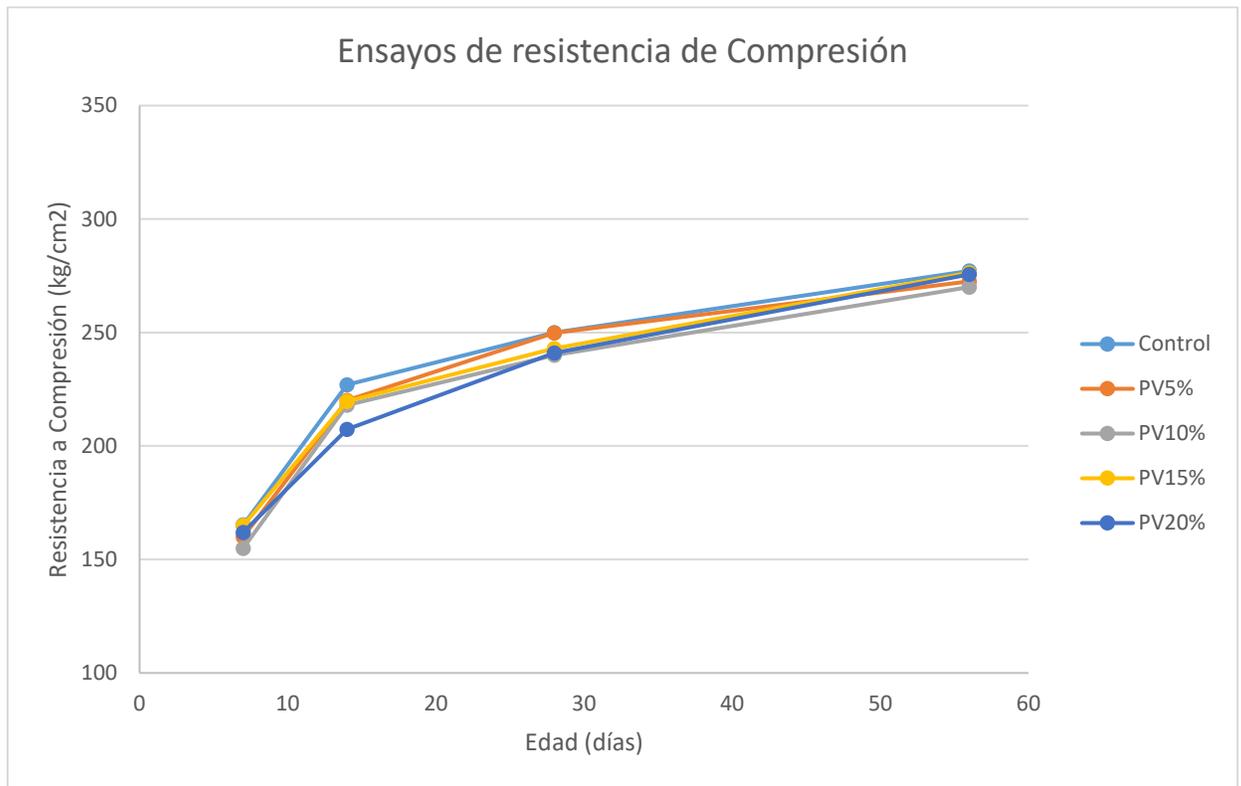
|         |    |         |        |      |       |        |
|---------|----|---------|--------|------|-------|--------|
| PV 10%  | 56 | 5301.40 | 12.408 | 2321 | 47570 | 270.01 |
| PV 15%  | 7  | 5302.56 | 12.287 | 2314 | 29065 | 164.97 |
| PV 15%  | 14 | 5302.56 | 12.355 | 2370 | 38708 | 219.71 |
| PV 15%  | 28 | 5302.56 | 12.461 | 2351 | 42810 | 242.99 |
| PV 15%  | 56 | 5302.56 | 12.328 | 2341 | 48680 | 276.32 |
| PV 20%  | 7  | 5302.56 | 12.314 | 2323 | 28540 | 161.99 |
| PV 20%  | 14 | 5302.56 | 12.324 | 2324 | 36532 | 207.36 |
| PV 20%  | 28 | 5302.56 | 12.330 | 2326 | 42455 | 240.98 |
| PV 20%  | 56 | 5302.56 | 12.492 | 2388 | 48551 | 275.58 |
| CBC5%   | 7  | 5301.40 | 12.220 | 2305 | 29949 | 169.99 |
| CBC5%   | 14 | 5301.40 | 12.185 | 2298 | 42224 | 239.67 |
| CBC5%   | 28 | 5301.40 | 12.222 | 2305 | 45805 | 260.00 |
| CBC5%   | 56 | 5301.40 | 12.218 | 2303 | 50735 | 287.98 |
| CBC10%  | 7  | 5372.40 | 12.320 | 2294 | 30665 | 174.05 |
| CBC10%  | 14 | 5372.40 | 12.393 | 2318 | 43665 | 247.85 |
| CBC10%  | 28 | 5372.40 | 12.519 | 2330 | 48820 | 277.11 |
| CBC10%  | 56 | 5372.40 | 12.433 | 2324 | 53385 | 303.02 |
| CBC15%  | 7  | 5372.40 | 12.315 | 2292 | 32149 | 182.48 |
| CBC15%  | 14 | 5372.40 | 12.357 | 2299 | 40030 | 223.53 |
| CBC15%  | 28 | 5372.40 | 12.397 | 2308 | 46646 | 264.77 |
| CBC15%  | 56 | 5265.96 | 12.415 | 2311 | 51355 | 291.49 |
| CBC20%  | 7  | 5265.96 | 12.267 | 2314 | 34532 | 196.00 |
| CBC20%  | 14 | 5265.96 | 12.461 | 2351 | 40455 | 229.63 |
| CBC20%  | 28 | 5265.96 | 12.428 | 2347 | 48551 | 275.58 |
| CBC20%  | 56 | 5265.96 | 12.328 | 2341 | 52392 | 297.38 |
| EN 0.5% | 7  | 5302.56 | 12.408 | 2328 | 34893 | 198.05 |
| EN 0.5% | 14 | 5302.56 | 12.397 | 2307 | 42149 | 239.24 |
| EN 0.5% | 28 | 5302.56 | 12.435 | 2365 | 48448 | 274.99 |
| EN 0.5% | 56 | 5302.56 | 12.456 | 2372 | 53735 | 305.00 |
| EN 1%   | 7  | 5372.40 | 12.399 | 2302 | 34887 | 198.02 |

|       |    |         |        |      |       |        |
|-------|----|---------|--------|------|-------|--------|
| EN 1% | 14 | 5372.40 | 12.440 | 2368 | 41860 | 237.60 |
| EN 1% | 28 | 5372.40 | 12.393 | 2358 | 51687 | 293.38 |
| EN 1% | 56 | 5372.40 | 12.477 | 2370 | 60680 | 344.43 |
| EN 2% | 7  | 5372.40 | 12.403 | 2325 | 33310 | 189.07 |
| EN 2% | 14 | 5372.40 | 12.417 | 2333 | 44110 | 250.37 |
| EN 2% | 28 | 5372.40 | 12.425 | 2335 | 54900 | 311.62 |
| EN 2% | 56 | 5372.40 | 12.420 | 2328 | 64250 | 364.69 |

Los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia a compresión muestran la influencia de las adiciones en el desempeño mecánico del diseño de mezcla, la cual corresponde a una relación agua cemento de 0.62 y una resistencia aproximada de  $f'c=245 \text{ kg/cm}^2$  a los 28 días de edad. Los resultados muestran que el diseño de mezcla elaborado, alcanza una resistencia promedio  $f'c=250 \text{ kg/cm}^2$  a los 28 días para la mezcla de control. Sin embargo, para las mezclas de concreto con adición de polvo de vidrio las resistencias alcanzadas fueron inferiores a las de la mezcla de control o referencia, como se muestra en la siguiente figura, evidenciando que entre más polvo de vidrio se emplea menor era su desempeño a edades tempranas, no obstante, a la edad de 56 días las resistencias eran bastante similares, por lo que se podría esperar que a mayores edades pueda igualar la resistencia de diseño o incluso a superarla.

**Figura 13.**

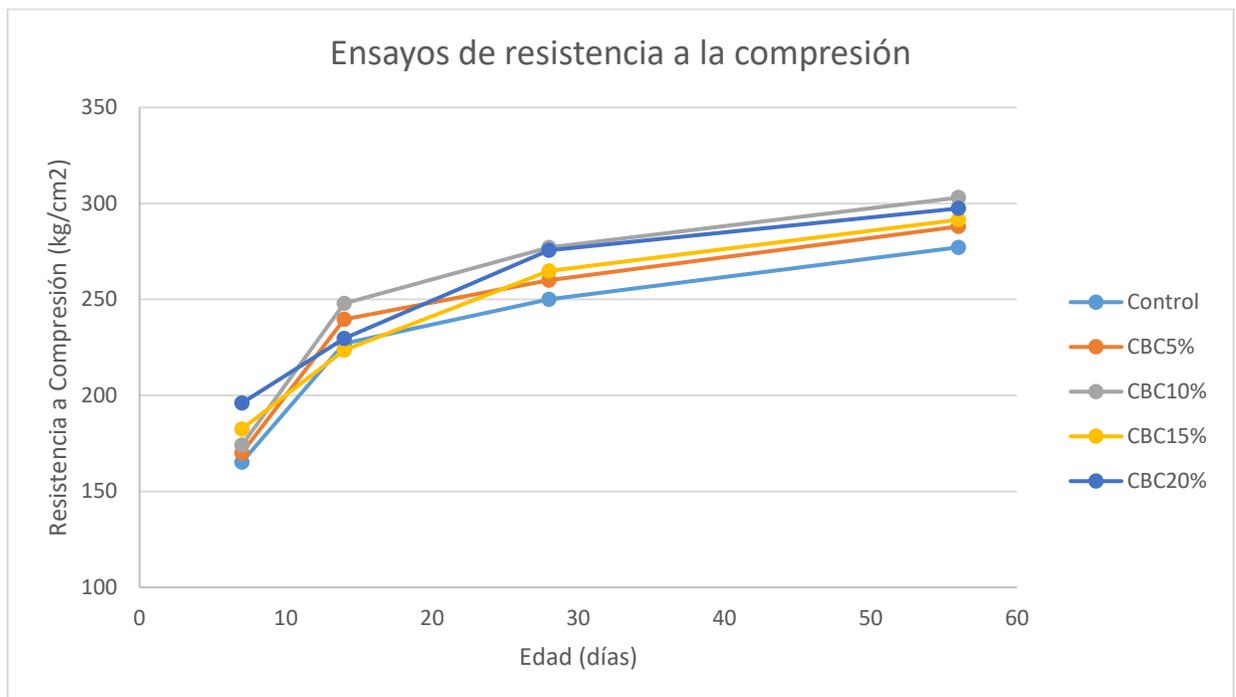
*Grafica de comparación de los ensayos de resistencia a la compresión de la mezcla de control vs mezclas con adiciones de polvo de vidrio*



Para las mezclas de concreto con ceniza de bagazo de caña, se observaron resultados con mejor desempeño. Las mezclas de control presentaban resistencias inferiores al de la mezcla de control a edades tempranas (7 días), sin embargo, al pasar de los días las mezclas con adición de ceniza de bagazo de caña iban incrementando mucho más su resistencia mecánica en comparación a la mezcla de control como se puede observar en la siguiente figura, a la edad de los 28 días las mezclas con adiciones de CBC superaban la resistencia de la mezcla de control, por lo que las cenizas muestran ser un excelente material alternativo a considerar como adición a las mezclas de concreto.

**Figura 14.**

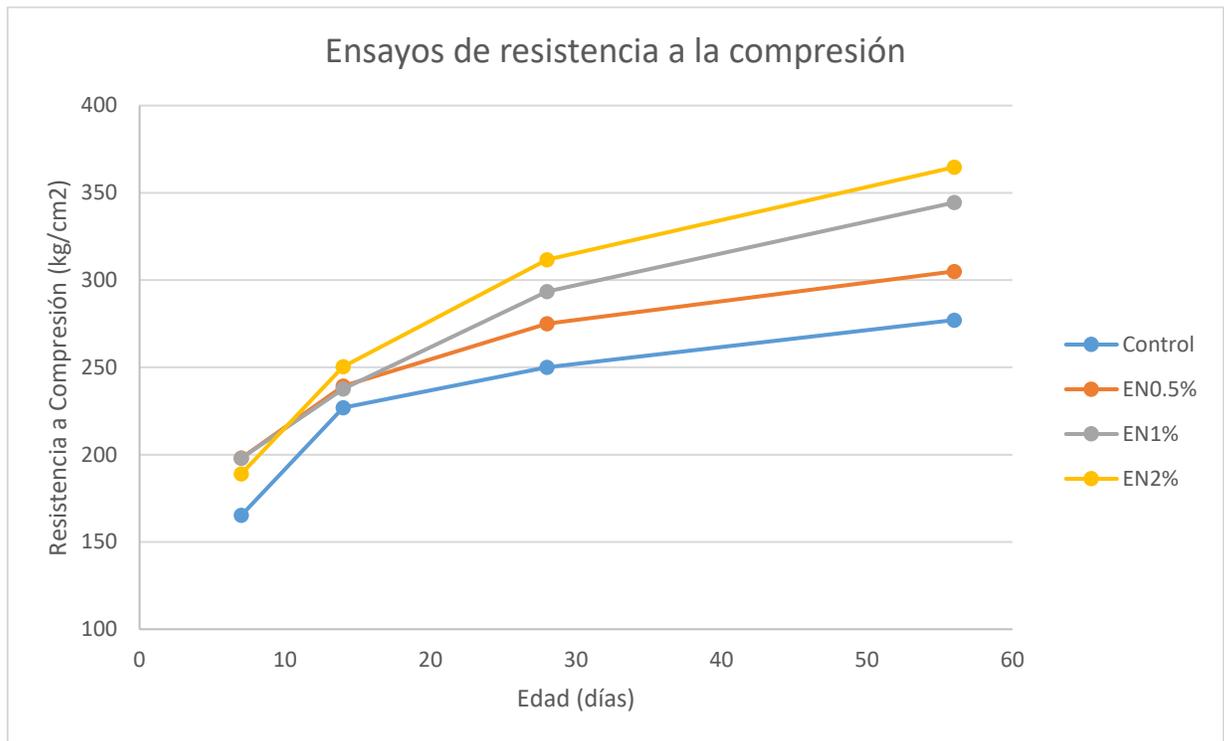
*Grafica de comparación de los ensayos de resistencia a la compresión de la mezcla de control vs mezclas con adiciones de ceniza de bagazo de caña*



Por último, las mezclas con aditivo orgánico (extracto de nopal) se compararon versus la mezcla de control, esto con el fin de evidenciar la influencia de este aditivo en la resistencia a la compresión, así como el de las adiciones vistas con anterioridad. De los resultados obtenidos se pudo observar que el extracto de nopal mejoro notablemente su resistencia a compresión inclusive a edades tempranas como se puede observar en la siguiente figura, así como mostrar una mejor consistencia de las mezclas de concreto. en estado fresco.

**Figura 15.**

*Grafica de comparación de los ensayos de resistencia a la compresión de la mezcla de control vs mezclas con aditivo de extracto de nopal*



Las mediciones del ensayo de resistencia a la compresión promedio (Figuras III.13 – III.15) muestran que las resistencias de las probetas experimentales están cercanas e incluso por arriba de la muestra patrón. Para el caso de las cenizas y el extracto de nopal lograron superar la resistencia de diseño de la muestra control, para el caso del polvo de vidrio presentaron valores inferiores a las de la muestra control para el mismo diseño. De forma particular las muestras con mejores resultados fueron las del 10% ceniza de bagazo en adición (10% de incremento de la resistencia por arriba de la muestra control) y el 2% del extracto de nopal (24% de incremento de la resistencia por arriba de la muestra de control).

En trabajos realizados por Cabrera y Díaz (2010) en las que utilizaron sustituciones parciales del cemento portland por cenizas de bagazo de caña, los resultados obtenidos determinaron disminuciones de hasta el 62% de la resistencia de diseño para reemplazos parciales del 40%, mientras que Chávez (2017) empleó porcentajes de sustitución del 1 y 5% registro decrementos de la resistencia a la compresión de hasta 10.41% y 35.16% a los 28 días de edad. Por su parte Alvarado et al. (2016) encontró que a los 7 días de curado las resistencias fueron menores a las de diseño (210 kg/cm<sup>2</sup>) hasta de un 37.38% para porcentajes del 5, 10, 15 y 20% de CBC, pero a los 28 días las adiciones de 5 y 10% de CBC fueron mayores, por lo que el uso de las cenizas, en cuestión de sustitución, requieren de una caracterización más detallada para este tipo de uso, ahora, si se utiliza como material complementario se podrían conseguir mejores resultados, como el caso de este proyecto de investigación, el cual demuestra un mejor desempeño de las cenizas en las mezclas de concreto, ya que incrementan sus propiedades mecánicas (resistencia a la compresión).

Por otro lado, de acuerdo a los trabajos realizados por Hernández (2012) en las que sustituyeron porcentaje de agua por mucílago de nopal para un tipo de mezcla  $a/c = 60$ , los resultados obtenidos fueron favorables únicamente en los especímenes sin curado a los 60 días de edad presentando incrementos significativos sobre todo en el caso del mucílago de nopal con un 17.3% respecto al de control. Pero para el caso de los especímenes curados a los 28 días presentaron reducciones en la resistencia a la compresión respecto al de control en un 1.56%. Por su parte Inga (2019), usando un diseño de mezcla  $a/c = 56$  con probetas de 15 cm de diámetro x 30 cm de altura y adiciones (sin sustitución) de mucílago de nopal de 1%, 3% y 5%, encontró que la mayor resistencia a la compresión es de 229.55 kg/cm<sup>2</sup> a los 28 días de edad y se obtuvo utilizando 1% de mucílago de nopal en peso cemento (Mezcla Tipo II). Mientras que la mezcla control sin

ninguna adición de mucílago de nopal (Mezcla Tipo I) alcanzó una resistencia de 188.85 kg/cm<sup>2</sup>. Por lo que tomando en cuenta los resultados obtenidos en la presente investigación se pudo observar un mejor desempeño en el uso de extracto de nopal como adición ya que con el diseño de mezcla a/c= 62 a los 28 días de edad y con el 1% de adición se logró una resistencia a la compresión de 293.38 kg/cm<sup>2</sup>.

### III.7 Ensayo de pulso de ultrasonido

Se midió la velocidad de pulso ultrasónico en las probetas de concreto convencional (sin adiciones o aditivos) y de las probetas con diferentes porcentajes de adiciones de polvo de vidrio y ceniza de bagazo de caña, así como de las probetas con un aditivo orgánico natural (extracto de nopal).

La unidad de estudio fue el concreto fabricado con agregados calizos triturados de la región de Tuxtla Gutiérrez Chiapas y arena del río de Santo Domingo, así como adiciones de desecho de la región y un extracto natural de nopal disponible en el estado de Chiapas. La velocidad se midió siguiendo la norma ASTM C597 - 16 Método de prueba estándar para la velocidad del pulso a través del concreto. Se utilizaron transductores de onda longitudinal de 54 kHz de frecuencia siguiendo el método directo (colocados en forma alineada en lados opuestos de las probetas). Las mediciones de la velocidad tuvieron tres repeticiones y cada valor reportado en el estudio corresponde a la media de los datos medidos a edades de 7 y 28 días de cada tipo de mezcla de concreto.

**Tabla 9.**

*Valores de pulso de ultrasonido de referencia para determinar la calidad del concreto*

| Condición general del concreto | Velocidad de pulso (m/s) |
|--------------------------------|--------------------------|
| Excelente                      | >4575                    |
| Bueno                          | 3660<V<4575              |
| Cuestionable                   | 3050<V<3660              |
| Pobre                          | 2125<V<3050              |
| Muy Pobre                      | <2125                    |

La siguiente tabla presenta los resultados obtenidos del ensayo de pulso ultrasónico a las probetas de concreto simple y de las probetas con diferentes porcentajes de adiciones y aditivo orgánico.

**Tabla 10.**

*Resultados obtenidos del ensayo de pulso de ultrasonido a las probetas de concreto con diferentes tipos de adiciones a los 28 días de edad.*

| Tipo de concreto | Pulso Ultrasónico 7 días                  | Pulso ultrasónico 28 días                 |
|------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|
|                  | F'c (kg/cm <sup>2</sup> ) / V Pulso (m/s) | F'c (kg/cm <sup>2</sup> ) / V Pulso (m/s) |
| Control          | 165.25/3650                               | 250.02/4630                               |
| PV 5%            | 160.00/3600                               | 249.76/4600                               |
| PV 10%           | 154.99/3450                               | 240.02/4440                               |
| PV 15%           | 164.97/4080                               | 242.99/4490                               |
| PV 20%           | 161.99/4000                               | 240.98/4280                               |
| CBC 5%           | 169.99/4300                               | 260.00/4650                               |
| CBC 10%          | 174.05/4320                               | 277.11/4670                               |
| CBC 15%          | 182.48/4330                               | 264.77/4655                               |
| CBC 20%          | 196.00/4360                               | 275.58/4670                               |

|         |             |             |
|---------|-------------|-------------|
| EN 0.5% | 198.05/4380 | 274.99/4660 |
| EN 1%   | 198.02/4380 | 293.38/4780 |
| EN 2%   | 189.07/4390 | 311.62/4850 |

Los resultados obtenidos de este ensayo permiten observar la variabilidad de la velocidad del pulso a través de las mezclas de concreto en función de la edad y del porcentaje de adición presente. Los resultados muestran que a edades tempranas el pulso de ultrasonido se incrementó para las mezclas con adiciones de CBC y extracto de nopal, ya que mostraban densificar la matriz de concreto, y a edades de 28 días este comportamiento fue más notorio, evidenciando el desempeño de estos dos materiales. Para el caso del polvo de vidrio, este no incremento su desempeño frente a la mezcla de control, ya que se mostró en valores relativamente inferiores al de la mezcla de control.

Para finalizar esta etapa de la investigación, a modo de discusión se pudo demostrar la hipótesis de que el uso de adiciones en el diseño y elaboración de las mezclas de concreto si permitieron mejorar el desempeño y comportamiento físico-mecánico del mismo. Las adiciones de CBC y extracto de nopal mejoraron las propiedades mecánicas y de trabajabilidad de las mezclas de concreto, es decir que para el mismo diseño de mezcla se incrementaron sus propiedades de resistencia.

Los porcentajes óptimos que se encontraron en esta investigación en comparación con la muestra de control la cual obtuvo una resistencia a la compresión promedio de 250.02 kg/cm<sup>2</sup> a la edad de 28 días, fue la del 10% de CBC obteniendo una resistencia de 277.11 kg/cm<sup>2</sup> y la de 2% de extracto de nopal alcanzando una resistencia de 311.62 kg/cm<sup>2</sup>, siendo esta ultima la más adecuada a implementar, ya que mejora la consistencia, trabajabilidad y resistencia mecánica en

comparación a la muestra control. Caso contrario para el uso de polvo de vidrio el cual con un 5% alcanzo una resistencia de  $249.76 \text{ kg/cm}^2$  siendo esta una diferencia mínima por debajo de la muestra control; la falta de desempeño se atribuye al proceso de molienda, ya que no se logró un polvo más fino, sino que granulométricamente era relativamente similar al de la arena, por lo que si se pudiese optimizar el proceso de molienda quizá se podría tener mejores resultados.

Cabe mencionar que en comparativa con las investigaciones que han realizado autores anteriores en su mayoría enfocados en la sustitución parcial del cemento por adiciones, la presente investigación se enfocó en la adición de materiales no convencionales a la mezcla de concreto pero como material extra (*Filler*) a dichas mezclas de concreto, sin la sustitución parcial de alguno de los materiales originales que lo conforman, esto debido a que se busca poder implementar materiales de desecho (polvo de vidrio y ceniza de bagazo) en procesos constructivos, demostrando que pueden ser usados en las mezclas de concreto, dando así resultados favorables que permiten obtener mejoras del desempeño del concreto con este tipo de materiales.

## VI. Conclusiones

Se evaluó y determinó la influencia de las adiciones en las mezclas de concreto para un diseño de mezcla con relación  $a/c=0.62$  en estado fresco y endurecido, de acuerdo a los resultados conseguidos se obtuvieron las siguientes conclusiones:

Las proporciones empleadas de polvo de vidrio no mostraron diferencias significativas a los 28 días, ya que su resistencia mecánica se encontraba por debajo de las de la mezcla de control. Sin embargo, para las proporciones de ceniza de bagazo de caña evaluadas se lograron resistencias a la compresión superiores a la de la mezcla de control inclusive a edades tempranas, por lo que representan una alternativa de material complementario para el diseño de mezclas de concreto con esta relación  $a/c$ , evidenciando el mejor desempeño para una adición del 10% con respecto al peso de cemento.

Las proporciones de aditivo natural de extracto de nopal, demostraron modificar las propiedades del concreto tanto en estado fresco como en estado endurecido, ya que incrementaron su consistencia plástica y trabajabilidad de acuerdo a los resultados observados en el ensayo de revenimiento y, para los ensayos de resistencia a la compresión mostraron incrementos significativos con respecto a la mezcla de control, siendo la dosificación óptima de este aditivo del 1% con respecto al peso de cemento.

De los resultados de pulso de ultrasonido como se pudo observar en el capítulo anterior, que de acuerdo a la edad del ensayo, en este caso 7 y 28 días conservando las mismas características técnicas de las mezclas (relación  $a/c$ , tipo y cantidad de agregados, curado, etc.) se obtienen que a medida que aumenta la edad de ensayo de las probetas, aumenta también los valores de velocidad de ultrasonido y los valores de resistencia a la compresión de los concretos, y son proporcionales

a la edad y características específicas de cada tipo de concreto, es decir, mantienen una relación directamente proporcional, entre mayor es la velocidad de pulso de ultrasonido, mayor es la resistencia del concreto y viceversa.

Dado que ha quedado demostrado que el uso de adiciones en la elaboración de las mezclas de concreto como *filler* mejora el desempeño y comportamiento físico-mecánico del concreto sobre todo con el uso de un aditivo natural como es el extracto de nopal por ser el más óptimo en comparación con la CBC y el polvo de vidrio principalmente a edades de 28 días en donde fue más notorio su comportamiento de acuerdo a los resultados de los ensayos realizados, por lo que se podría considerar su uso formal del aditivo de extracto de nopal en procesos constructivos futuros.

## Referencias

- Alvarado, J., Andrade, J., y Hernández, H. (2016). *Estudio del empleo de cenizas producidas en ingenios azucareros como sustituto parcial del cemento portland en el diseño de mezclas de concreto* [Tesis de pregrado]. Universidad de El Salvador.  
<http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/14162/1/50108276.pdf>
- Arratibel, A. J. (20 enero 2023). El dilema de Mexico y las siete millones de toneladas de plástico que acaban en la basura o en el mar. *El País*. <https://elpais.com/america-futura/2023-01-20/el-dilema-de-mexico-y-las-siete-millones-de-toneladas-de-plastico-que-acaban-en-la-basura-o-en-el-mar.html>
- Arbeláez Pérez, O. F., Castañeda mena, J. D., Delgado Varela, K. A. (2022). *Efecto de la incorporación de ceniza de bagazo de caña en las propiedades mecánicas y las emisiones de dióxido de carbono del hormigón preparado con residuos de vidrio*. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0366317522000462#:~:text=Cada%20tonelada%20de%20ca%C3%B1a%20de,hormig%C3%B3n%20ambientalmente%20amigable%20%5B13%5D.>
- ASTM C597 – 16 (2016), Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. West Conshohocken: ASTM International.

Cabrera, Y. y Díaz, J. (2010). *Evaluación del efecto de la adición de cenizas volantes producto de la incineración del bagazo de caña de azúcar en mezclas de concreto de bajas a medias resistencias como sustitución parcial del cemento* [Tesis de pregrado]. Universidad Central de Venezuela.

<http://saber.ucv.ve/bitstream/123456789/11567/1/TRABAJO%20ESPECIAL%20DE%20GRADO.pdf>

Chávez, C. (2017). *Empleo de la ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA) como sustituto porcentual del agregado fino en la elaboración del concreto hidráulico* [Tesis de pregrado]. Universidad Nacional de Cajamarca.

[http://repositorio.unc.edu.pe/bitstream/handle/UNC/1048/T016\\_44477012\\_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.unc.edu.pe/bitstream/handle/UNC/1048/T016_44477012_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Choca Ramos, I. L.(2020). *Influencia del polvo de vidrio en las propiedades del concreto en estado fresco y endurecido*. [Tesis para optar el título profesional de ingeniero civil]. Universidad Peruana Los Andes. <https://hdl.handle.net/20.500.12848/2813>

Espinosa, L., y Escalante, I. (2011). Morteros a base de vidrio de desecho/escoria de alto horno, Nexo, Revista científica, 24(2). <https://doi.org/10.5377/nexo.v24i2.657>

Farfán Córdova, M. G. (2018). Ceniza de bagazo de caña de azúcar en la resistencia a la compresión del concreto. *Revista de Investigación y Cultura*.

<https://www.redalyc.org/journal/5217/521758012002/521758012002.pdf>

France24 (2021). El hormigón, tercer emisor mundial de gases de efecto invernadero. Minuto a minuto. [https://www.france24.com/es/minuto-a-minuto/20211019-el-](https://www.france24.com/es/minuto-a-minuto/20211019-el-hormig%C3%B3n-tercer-emisor-mundial-de-gases-de-efecto-invernadero)

[hormig%C3%B3n-tercer-emisor-mundial-de-gases-de-efecto-invernadero](https://www.france24.com/es/minuto-a-minuto/20211019-el-hormig%C3%B3n-tercer-emisor-mundial-de-gases-de-efecto-invernadero)

Frómeta-Salas, ZP, Vidaud-Quintana, IN, Font-Morales, E., y Negret-Ortiz, D. (2020). Empleo del vidrio reciclado triturado en sustitución parcial del árido fino para elaborar hormigón con fines de sostenibilidad. *Ciencia en su PC* , 1 (4), p. 64-78.

Fuentes Molina, N., Fragozo Tarifa, O., Vizcaino Mendoza, L. (2015). Residuos agroindustriales como adiciones en la elaboración de bloques de concreto no estructural. *Revista de ciencia e ingeniería*, 25(2), p. 99-116. <https://www.redalyc.org/pdf/911/91142868006.pdf>

Guevara Laureano, M. S. (2013). *Desarrollo de nuevos materiales cementantes utilizando residuos vítreos, mediante activación mecano-química*. [Tesis para obtener el grado de Maestría en Ciencias]. Universidad Autónoma de Nuevo Leon.

Hernández Moreno, S., (2008). Diseño sustentable de materiales de construcción; caso del concreto de matriz de cemento Pórtland. *CIENCIA ergo-sum, Revista Científica Multidisciplinaria de Prospectiva*, 15(3).

<https://www.redalyc.org/pdf/104/10415308.pdf>

Hernández, E. F. (2012). *Permeabilidad a cloruros y carbonatación en concreto conteniendo mucílago de nopal y alginato*. [Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias]. Instituto Politécnico Nacional.

- Hernández, E. F., Cano Barrita, P. d., y Torres Acosta, A. A. (2016). *influence of cactus mucilage and brown seaweed extract on compressive strength and durability of concrete*. CSIC, p. 2-12. <https://doi.org/10.3989/mc.2016.07514>
- Hoff G. C. (1991), “Durable concrete-Offshore”, Raymundo Rivera International Symposium on Durability of Concrete.
- Hosanna, S., Karthikeyan, AR., Bhuvaneswari, S. (2018). *Análisis del polvo de vidrio como reemplazo parcial del cemento en el hormigón*. <https://www.ijert.org/analysis-of-glass-powder-as-a-partial-replacement-of-cement-in-concrete>
- Hwan, k., Lee, B., y Park, S. (2004). Studies on Mechanical Properties of Concrete Containing Waste Glass Aggregate. Cement & Concrete Research.
- Inga Julka, T. G. (2019). *Influencia de la adición de mucílago de nopal (Opuntia ficus-índica) en las propiedades mecánicas del concreto permeable*.
- Lafuente Ibáñez, C., y Marín Egoscozábal, A. (2008). Metodologías de la investigación en las ciencias sociales: Fases, fuentes y selección de técnicas. Revista Escuela de Administración de Negocios, (64), 5-18. <https://www.redalyc.org/pdf/206/20612981002.pdf>
- Muñoz-Pérez, S. P., Cabrera-Alcantara, A. L., Delgado-Bravo, C. C., Renilla-Lau, P. A., (2022). Comportamiento físico-mecánico del hormigón adicionando residuos de acero: una revisión literaria. *Revista UIS ingenierías*, 21(1). <https://doi.org/10.18273/revuin.v21n1-2022005>

NMX-C-083-ONNCCE-2014. (20 de Marzo de 2015). *Industria de la Construcción – Concreto – Determinación de la Resistencia a la Compresión de Especímenes-Método de Ensayo*, Secretaría de Economía.

NMX-C-156-ONNCCE-2020. *Industria de la Construcción-Concreto Hidráulico-Determinación del Revenimiento en el Concreto Fresco-Método de Ensayo*.

NMX-C-159-ONNCCE-2016. *Industria de la Construcción – Concreto – Elaboración y Curado de Especímenes de Ensayo. Concreto*.

NMX-C-161-ONNCCE-2013. *Industria de la Construcción – Concreto Fresco – Muestreo*

NMX-C-414-ONNCCE-2004 “*Industria de la Construcción - Cementos Hidráulicos - Especificaciones y Métodos de Prueba*”

Ramirez-Arellanes, S., Cano-Barrita, P. F. de J., Julian-Caballero, F., Gómez-Yañez, C., (2012). *Propiedades de durabilidad en hormigón y análisis microestructural en pastas de cemento con adición de mucílago de nopal como aditivo natural*.  
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4240712>

Rodriguez, M., y Ruiz Caturelli, M. E. (2016). Evaluación del desempeño de un hormigón con incorporación de vidrio reciclado finamente molido en reemplazo de cemento mediante ensayos de laboratorio. *Revista De La Facultad De Ciencias Exactas, Físicas Y Naturales*, 3(2) Recuperado a partir de  
<https://revistas.unc.edu.ar/index.php/FCEFyN/article/view/13637>

Rojas Soriano, R. (2013). *Guía para realizar investigaciones sociales* ( ed.). Instituto Politécnico Nacional. <https://elibro.net/es/lc/uachiapas/titulos/73142>

Sautu, R. (2010) Manual de metodología: construcción del marco teórico, formulación de los objetivos y elección de la metodología: (ed.). CLACSO.

<https://elibro.net/es/lc/uachiapas/titulos/76355>

Silvestre Gutierrez, A., Cano Cano, J. D., Cruz Pulgarin, C. M.(2017). *Análisis de mezclas de concreto con proporciones de vidrio molido, tamizado y granular como aditivo a fin de aumentar la resistencia a la compresión del hormigón.*

<https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/17082/ANALISIS%20DE%20MEZCLAS%20DE%20CONCRETO.pdf?sequence=1>

Solís-Carcano, RG y Alcocer-Fraga, MA (2019). Durabilidad del concreto con agregados de alta absorción. *Ingeniería. Investigación y Tecnología* , XX (4).

<https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2019.20n4.039>

Tórrez-Rivas, B., Gaitán-Arévalo, J., Espinoza-Pérez, L., y Escalante-García, J. (2014). Valorización de ceniza de bagazo de caña de la industria azucarera Nicaragüense como sustituto parcial al cemento Portland. *Nexo Revista Científica*.27(2).

<https://doi.org/10.5377/nexo.v27i2.1944>

Vidaud, E. (2013) De la Historia del Cemento. *Construcción y Tecnología en Concreto*.

<https://www.imcyc.com/revistacyt/index.php/ingenieria/60-de-la-historia-del-cemento>