

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
Centro Interdisciplinario de Investigación
para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca
Maestría en Ciencias en Conservación y
Aprovechamiento de Recursos Naturales

Título de tesis

INFLUENCIA DE LA CV_{mx} Y CBC_{st} EN ALGUNAS
PROPIEDADES DE CONCRETOS TERNARIOS

Tesis que para obtener el grado de académico de:

Maestría en Ciencias en Conservación y Aprovechamiento de Recursos
Naturales

Presenta:

Ing. Alejandra Verónica Pacheco Hernández

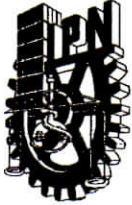
Directores de tesis

Dr. Víctor Guillermo Jiménez Quero

Dr. Pedro Montes García

Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, México

22 de enero de 2021



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

SIP-13
REP 2017

ACTA DE REGISTRO DE TEMA DE TESIS Y DESIGNACIÓN DE DIRECTOR DE TESIS

Ciudad de México, 22 de Enero del 2021

El Colegio de Profesores de Posgrado de CIIDIR UNIDAD OAXACA en su Sesión
(Unidad Académica)

Ordinaria No. 3 celebrada el día 10 del mes Marzo de 2020 conoció la solicitud presentada por la alumna:

Apellido Paterno:	Pacheco	Apellido Materno:	Hernández	Nombre (s):	Alejandra Verónica
--------------------------	---------	--------------------------	-----------	--------------------	--------------------

Número de registro: B 1 8 0 0 5 5

del Programa Académico de Posgrado: Maestría en Ciencias en Conservación y Aprovechamiento de Recursos Naturales

Referente al registro de su tema de tesis; acordando lo siguiente:

1.- Se designa al aspirante el tema de tesis titulado:

Influencia de la CV_{mx} y CBC_{st} en algunas propiedades de concretos ternarios

Objetivo general del trabajo de tesis:

Evaluar el efecto de la adición de CV_{mx}, CBC_{st}, y la combinación de éstas, en las propiedades de concretos ternarios mediante pruebas de RC, VPU y RE. Además, establecer ecuaciones de correlación entre los resultados de las pruebas para estimar la RC de los concretos ternarios con base en lecturas de VPU y RE.

2.- Se designa como Directores de Tesis a los profesores:

Director: Dr. Víctor Guillermo Jiménez Quero 2° Director: Dr. Pedro Montes García
No aplica:

3.- El Trabajo de investigación base para el desarrollo de la tesis será elaborado por el alumno en:

El laboratorio de Materiales de construcción del CIIDIR Unidad Oaxaca que cuenta con los recursos e infraestructura necesarios.

4.- El interesado deberá asistir a los seminarios desarrollados en el área de adscripción del trabajo desde la fecha en que se suscribe la presente, hasta la aprobación de la versión completa de la tesis por parte de la Comisión Revisora correspondiente.

Director(a) de Tesis

Dr. Víctor Guillermo Jiménez Quero

Aspirante

Verónica

Pacheco Hernández Alejandra Verónica

2° Director de Tesis (en su caso)

Dr. Pedro Montes García

Presidente del Colegio

Dr. Salvador Isidro Belmonte Jiménez





INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

SIP-14
REP 2017

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de siendo las horas del día del mes de del se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Posgrado de: para examinar la tesis titulada:

de la alumna:

Apellido Paterno:	Pacheco	Apellido Materno:	Hernández	Nombre (s):	Alejandra Verónica
--------------------------	----------------	--------------------------	------------------	--------------------	---------------------------

Número de registro:

Aspirante del Programa Académico de Posgrado:

Una vez que se realizó un análisis de similitud de texto, utilizando el software antiplagio, se encontró que el trabajo de tesis tiene 7% de similitud. **Se adjunta reporte de software utilizado.**

Después que esta Comisión revisó exhaustivamente el contenido, estructura, intención y ubicación de los textos de la tesis identificados como coincidentes con otros documentos, concluyó que en el presente trabajo SI NO **SE CONSTITUYE UN POSIBLE PLAGIO.**

JUSTIFICACIÓN DE LA CONCLUSIÓN:


No se constituye un posible plagio debido a que el porcentaje total de similitud del contenido de la tesis con otros trabajos, de acuerdo con el reporte del software Turnitin, es de 7%. Este porcentaje es bajo y se concentra principalmente en las secciones de Marco Teórico en el cual se emplearon fuentes debidamente referenciadas.

****Es responsabilidad del alumno como autor de la tesis la verificación antiplagio, y del Director o Directores de tesis el análisis del % de similitud para establecer el riesgo o la existencia de un posible plagio.**

Finalmente, y posterior a la lectura, revisión individual así como el análisis e intercambio de opiniones, los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR** **SUSPENDER** **NO APROBAR** la tesis por **UNANIMIDAD** o **MAYORÍA** en virtud de los motivos siguientes:

La tesis satisface los requerimientos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes


Dr. Víctor Guillermo Jiménez Quero
Director de Tesis
Nombre completo y firma


Dr. Juan Rodríguez Ramírez
Nombre completo y firma


Dr. Prisciliano Felipe de Jesús Cano Barrita
Nombre completo y firma


Dr. Pedro Montes García
2º Director de Tesis (en su caso)
Nombre completo y firma


M. C. Frank Manuel León Martínez
Nombre completo y firma


Dr. Salvador Isidro Belmonte Amérez
Nombre completo y firma

**COMITÉ INTERDISCIPLINARIO
PRESIDENTE DEL CONSEJO DE
DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL
C.I.I.D.I.R.
UNIDAD OAXACA**



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de **Oaxaca** el día **22** del mes **enero** del año **2021**, la que suscribe **Alejandra Verónica Pacheco Hernández** alumna del Programa de **Maestría en Ciencias en Conservación y Aprovechamiento de Recursos Naturales** con número de registro **B180055**, adscrita al **Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca**, manifiesta que es autora intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de los **Dres. Dr. Víctor Guillermo Jiménez Quero y Dr. Pedro Montes García** y cede los derechos del trabajo titulado: **Influencia de la CV_{mx} y CBC_{st} en algunas propiedades de concretos ternarios**, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o directores del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección electrónica ing.veronicaph@gmail.com. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

A handwritten signature in black ink that reads 'Verónica'. The signature is written in a cursive style and is positioned above a horizontal line.

Alejandra Verónica Pacheco Hernández
Nombre y firma

RESUMEN

En esta investigación se evaluaron los efectos del uso de ceniza volante mexicana proveniente de una planta carboeléctrica ubicada en el estado de Coahuila y ceniza de bagazo de caña de azúcar procedente de un ingenio azucarero del estado de Veracruz como puzolanas en propiedades mecánicas y durabilidad del concreto. Se diseñaron una mezcla control con 100% de cemento Portland, una mezcla binaria donde el 15% de cemento se reemplazó por ceniza volante, y otra mezcla binaria donde el 15% de cemento se reemplazó por ceniza de bagazo de caña, y una mezcla ternaria donde el 30% de cemento se reemplazó por la combinación de 15% ceniza volante más 15% de ceniza de bagazo de caña. Todas las mezclas de concreto se prepararon con una relación agua/material-cementante de 0.5. Se elaboraron especímenes cilíndricos de 10×20 cm midiéndose la velocidad de pulso ultrasónico y resistividad eléctrica (pruebas no destructivas), y posteriormente la resistencia a la compresión (prueba destructiva). Todas las pruebas se realizaron a 7, 14, 28, 56, 90, 180 y 365 días. Se aplicaron correlaciones entre los resultados de las pruebas no destructivas y destructivas, con el objetivo de estimar la resistencia a la compresión con base en los resultados de las pruebas no destructivas. Los resultados muestran que el reemplazo parcial cemento por 15% de ceniza volante mexicana disminuye la resistencia a la compresión del concreto a edades tempranas, disminuye la velocidad de pulso ultrasónico y mejora la resistividad eléctrica. El reemplazo parcial de cemento por 15% ceniza de bagazo de caña no afecta la resistencia, disminuye la velocidad de pulso ultrasónico e incrementa significativamente la resistividad eléctrica del concreto. En este mismo sentido, la combinación de 15% ceniza volante y 15% de ceniza de bagazo de caña disminuye la resistencia a la compresión a edades tempranas, y la velocidad de pulso ultrasónico, e incrementa significativamente el valor de la resistividad eléctrica del concreto. La resistividad eléctrica de la mezcla ternaria es similar a la obtenida en las mezclas binarias desde los 0 días hasta los 56 días de edad, a partir de la cual se incrementa considerablemente hasta duplicar esos valores a 180 días y triplicarlos a 365 días. Se encontró que la velocidad de pulso ultrasónico y la resistividad eléctrica son predictores confiables de la resistencia a la compresión de acuerdo a los altos coeficientes de correlación y que las predicciones mejoran cuando se considera la incorporación de la ceniza volante y la ceniza de bagazo de caña en el concreto estableciendo ecuaciones de correlación por tipo de mezcla. Aunque ambos predictores son confiables, la resistividad eléctrica es un mejor predictor de la resistencia a la compresión del concreto que la velocidad de pulso ultrasónico. Finalmente, la estimación de la resistencia a la compresión con base en una ecuación que contenga ambas dos, velocidad de pulso ultrasónico y resistividad eléctrica, no mejora la predicción utilizando únicamente la resistividad eléctrica.

Palabras clave: ceniza volante mexicana, ceniza de bagazo de caña, resistencia a la compresión, resistividad eléctrica, velocidad de pulso ultrasónico.

A B S T R A C T

In this research, the effects of the use of Mexican fly ash from a coal plant located in the state of Coahuila and sugar cane bagasse ash from a sugar mill in the state of Veracruz as pozzolans on mechanical properties and concrete durability were evaluated. A control mix was designed with 100% Portland cement, a binary mix where 15% of cement was replaced by fly ash, and another binary mix where 15% of cement was replaced by cane bagasse ash, and a ternary mix. where 30% cement was replaced by the combination of 15% fly ash plus 15% cane bagasse ash. All concrete mixes were prepared with a water / material-cementitious ratio of 0.5. Cylindrical specimens of 10 \square 20 cm were made by measuring the ultrasonic pulse speed and electrical resistivity (non-destructive tests), and subsequently the compressive strength (destructive test). All tests were carried out at 7, 14, 28, 56, 90, 180 and 365 days. Correlations were applied between the results of non-destructive and destructive tests, with the aim of estimating the compressive strength based on the results of the non-destructive tests. The results show that the partial replacement of cement by 15% Mexican fly ash decreases the compressive strength of concrete at early ages, decreases the speed of the ultrasonic pulse and improves the electrical resistivity. The partial replacement of cement by 15% cane bagasse ash does not affect resistance, decreases the ultrasonic pulse speed and significantly increases the electrical resistivity of concrete. In this same sense, the combination of 15% fly ash and 15% cane bagasse ash decreases the compressive strength at early ages, and the speed of the ultrasonic pulse, and significantly increases the value of the electrical resistivity of concrete. The electrical resistivity of the ternary mixture is similar to that obtained in binary mixtures from 0 days to 56 days of age, after which it increases considerably until these values double at 180 days and triple them at 365 days. Ultrasonic pulse velocity and electrical resistivity were found to be reliable predictors of compressive strength according to high correlation coefficients and that predictions improve when incorporating fly ash and sugar cane bagasse ash is considered. in concrete establishing correlation equations by type of mix. Although both predictors are reliable, electrical resistivity is a better predictor of concrete compressive strength than ultrasonic pulse velocity. Finally, estimating compressive strength based on an equation that contains both, ultrasonic pulse speed and electrical resistivity, does not improve prediction using electrical resistivity alone.

Key words: compressive strength, electrical resistivity, Mexican fly ash, sugarcane bagasse ash, ultrasonic pulse velocity.

DEDICATORIA

A mi abuelita
Adela Hernández Martínez
Por su amor y cariño infinito como el universo

A mi hermana, prima y madre
Blanca Ximena Hernández García
Gran espíritu, nutriste las raíces de mi alma con tus ojos de agua infinita,
el árbol florece y la vida perdura

A mis sobrinos amados
Carlitos, Hannia, Kahlil y Sarita
El amor más puro y bello de mi vida, sagrada familia

A mis estimados doctores
Luis Manuel Martínez Ramírez, Pedro Montes García y Marco A. Maldonado García
Si he llegado a ver más lejos es porque me subí a hombros de gigantes
A ustedes mi respeto y admiración

Con cariño
Alejandra Verónica Pacheco Hernández

AGRADECIMIENTOS

Al **Instituto Politécnico Nacional y CIIDIR-Oaxaca** por permitirme la realización de este proyecto de tesis. Así mismo por las facilidades académicas otorgadas.

Al **Instituto Politécnico Nacional** por el apoyo económico brindado a través de los siguientes proyectos de investigación: “Estudio de la amorficidad de dos cenizas con y sin post-tratamiento que serán utilizadas como materiales cementantes suplementarios” clave SIP-20190199, “Concretos hidráulicos elaborados con residuos industriales como sustitutos parciales de cemento Portland” clave SIP-20190278, “Caracterización de polvos de vidrio para su empleo como materiales sustitutos de cemento Portland” clave SIP-20201342 y “Resistividad eléctrica para la caracterización de concretos ternarios” clave SIP-20200390.

A la **Comisión de operación y Fomento de Actividades Académicas (COFFA)**, por la beca otorgada a través del **Programa Institucional de Formación de Investigadores (PIFI)** durante el periodo agosto de 2018 a diciembre de 2020.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT)**, por la beca nacional a nivel Maestría.

A mis directores de tesis: **Dr. Víctor Guillermo Jiménez Quero y Dr. Pedro Montes García**, por brindarme la oportunidad de emprender el camino hacia la investigación científica a través de sus enseñanzas y conocimientos, también por su tiempo, apoyo y confianza brindada durante la elaboración de este trabajo.

A los miembros de la comisión revisora y jurado de examen: **Dr. Prisciliano Felipe de Jesús Cano Barrita, Dr. Juan Rodríguez Ramírez, y M. Frank Manuel León Martínez** por sus recomendaciones para mejorar este trabajo.

A mis compañeros: los doctores **Marco Antonio García Maldonado y Víctor Franco Lujan** por la orientación, ayuda y amistad brindada.

De manera especial al **Dr. Pedro Montes García y al Dr. Marco Antonio García Maldonado** por su asesoría, apoyo incondicional, amistad e inspiración para seguir en este camino de conocimiento.

Al personal Docente del CIIDIR Oaxaca quienes intervinieron en mi formación académica.

Al laboratorio de materiales del CIIDIR-Unidad Oaxaca y al Grupo de materiales basados en cemento por permitir el uso del equipo para las pruebas realizadas.

A todos, muchas gracias

Alejandra Verónica Pacheco Hernández

Siglas y Abreviaturas

Tipos de Cemento

CPO	Cemento Portland Ordinario
CPC	Cemento Portland Compuesto

Componentes del cemento

C ₂ S	Silicato Dicálcico
C ₃ S	Silicato Tricálcico
C ₃ A	Aluminato Tricálcico
C ₄ AF	Aluminoferrito Tretracálcico
C-S-H	Silicato Hidratado de Calcio

Adiciones minerales

CV	Ceniza Volante
CV _{mx}	Ceniza Volante Mexicana
CBC	Ceniza de Bagazo de Caña
CBC _{st}	Ceniza de Bagazo de Caña sin Tratar
MCS	Materiales Cementantes Suplementarios

Mezclas

TM	Tipo de mezcla
MC	Mezcla Control
MB1	Mezcla Binaria Adicionada con 15% de CV _{mx}
MB2	Mezcla Binaria Adicionada con 15% de CBC _{st}
MT	Mezcla Ternaria Adicionada con 15% de CV _{mx} y 15% de CBC _{st}

Pruebas y Técnicas

DRX	Difracción de Rayos X
IAR	Índice de Actividad Resistente
PPI	Pérdidas por Ignición o Pérdidas por Calcinación “Loss of Ignition”
MEB	Microscopio Electrónico de Barrido
PVSS	Peso Volumétrico Seco Suelto (kg/m ³)
PVSC	Peso Volumétrico Seco Compacto (kg/m ³)
RC	Resistencia a la Compresión (MPa)
RE	Resistividad Eléctrica (Ω•m)
VPU	Velocidad de Pulso Ultrasónico (m/s)

Otros

ANOVA	Análisis de Varianzas
ASTM	“American Society for Testing and Materials”
CO ₂	Dióxido de carbono
MPa	Mega Pascales
R	Coefficiente de correlación
R ²	Coefficiente de determinación
SP	Aditivo Súper Plastificante
SiO ₂	Dióxido de Silicio
µm	Micrómetro

Índice

RESUMEN	i
ABSTRACT	ii
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
Índice	vi
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN	3
1.1 Planteamiento del problema	3
1.2 Justificación	4
1.3 Antecedentes	4
1.4 Objetivos	7
1.4.1 Objetivo general	7
1.4.2 Objetivos específicos	7
1.5 Hipótesis	7
CAPÍTULO 2. MARCO REFERENCIAL	8
2.1 Generalidades del cemento	8
2.1.1 Cemento Portland	8
2.1.2 Manufactura y componentes	8
2.1.3 Tipos de Cemento Portland	9
2.1.4 Hidratación del cemento Portland	10
2.1.5 Reacciones de hidratación del cemento Portland	11
2.2 Sistemas compuestos	12
2.2.1 Sistemas binarios	12
2.2.2 Sistemas ternarios	12
2.3 Materiales puzolánicos	13
2.3.1 Definición de puzolana (ASTM C-125)	13
2.3.2 Clasificación de las puzolanas	13
2.3.3 Índice de actividad puzolánica	13
2.3.4 Reacción puzolánica	13

2.3.5 Ceniza volante (CV)	14
2.3.4 Ceniza de Bagazo de caña (CBC)	16
2.3.5. Caracterización de las puzolanas	17
2.4 Generalidades del concreto	17
2.4.1 Definición	17
2.4.2 Concreto hidráulico	18
2.4.3 Diseño de mezclas de concreto	18
2.5 Propiedades de concretos en estado fresco	18
2.6 Principales propiedades del concreto en estado endurecido	18
2.6.1 Resistencia a la compresión ASTM C-109	18
2.6.2 Prueba de velocidad de pulso ultrasónico ASTM C-597	19
2.6.3 Prueba de Resistividad eléctrica RILEM TC-154	20
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA	21
3.1 Descripción del experimento	21
3.2 Diseño experimental	22
3.3 Materiales	23
3.3.1 Descripción de los materiales	23
3.3.2 Características y propiedades de los materiales	23
3.3.2.3 Distribución de tamaños de partículas	27
3.3.2.4 Morfología por Microscopia Electrónica de Barrido (MEB)	29
3.3.2.5 Granulometría de los agregados pétreos	30
3.3.3 Otras propiedades físicas de los materiales	31
3.4 Métodos	32
3.4.1 Diseño y elaboración de las mezclas de concreto	32
3.4.2 Caracterización de los concretos en estado fresco	32
3.4.3 Elaboración de especímenes	34
3.4.4 Caracterización de los concretos en estado endurecido	34
3.4.5 Metodología para el análisis de los resultados	35
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	36
4.1 Resistencia a la compresión	36
4.2. Velocidad de pulso ultrasónico (VPU)	38

4.3 Resistividad eléctrica (RE) _____	41
4.4. Correlaciones entre propiedades _____	45
4.4.1 VPU vs. RC _____	45
4.4.2 RE contra RC _____	48
4.4.3 VPU-RE contra RC _____	51
Conclusiones _____	52
Bibliografía _____	54
Anexos _____	68

Índice de tablas

Tabla 1. Compuestos principales del cemento Portland.....	9
Tabla 2. Propiedades físico-mecánicas de los compuestos principales del cemento	9
Tabla 3. Composición química de las principales fases del cemento.....	9
Tabla 4. Tipos de Cemento Portland	9
Tabla 5. Composición química.....	10
Tabla 6. Reacciones de hidratación de las principales fases del cemento Portland	12
Tabla 7. Composición química típica de la ceniza volante (%)	16
Tabla 8. Diseño experimental.....	23
Tabla 9. Composición química del cemento y puzolanas utilizadas	24
Tabla 10. Resumen de las propiedades de los agregados pétreos	31
Tabla 11. Resultado de las pruebas del IAR para la CV_{mx} y CBC_{st}	31
Tabla 12. Proporciones de las mezclas de concreto por m^3	32
Tabla 13. Resultados de las pruebas en estado fresco de los concretos estudiados	33
Tabla 14. Resumen de los resultados del ANOVA efectuado a los datos de RC.....	37
Tabla 15. Resumen de los resultados del ANOVA efectuado a los datos de VPU.....	40
Tabla 16. Resumen de los resultados de RE de las mezclas en estudio.	42
Tabla 17. Ecuaciones lineales entre VPU y RC por TM.....	46
Tabla 18. Ecuaciones entre RC y RE por TM.....	49
Tabla 19. Ecuaciones de correlación múltiple entre VPU-RE vs. RC	52

Índice de Figuras

Figura 1. Evaluación del impacto ambiental por producción de cemento	3
Figura 2. Etapas de hidratación del cemento Portland	10
Figura 3. Volúmenes de los compuestos en pastas de cemento durante la hidratación	11
Figura 4. Mecanismos de hidratación en los sistemas puzolánicos C_3S y C_3A	14
Figura 5. Micrografía de CV	15
Figura 6. Micrografía de CV con mala combustión y alto contenido de carbón.....	15
Figura 7. Micrografía de CBC sin tratar.....	17
Figura 8. Representación de la prueba de la resistencia a la compresión.....	19
Figura 9. Esquema de la prueba de pulso ultrasónico	20
Figura 10. Representación de la prueba de la resistividad por método de cuatro electrodos	20
.....	
Figura 11. Principio del método de los cuatro electrodos.	21
Figura 12. Representación esquemática de metodología desarrollada.....	22
Figura 13. Difractograma de ceniza volante mexicana (CV_{mx}).....	25
Figura 14. Difractograma de ceniza de bagazo de caña sin tratar (CBC_{st}).....	26
Figura 15. Difractograma del Cemento Portland compuesto	26
Figura 16. Cantidad acumulada de las partículas de CPC, CV_{mx} y CBC_{st}	27
Figura 17. Distribución de la densidad de las partículas de CPC, CV_{mx} y CBC_{st}	28
Figura 18. Micrografía de la CV_{mx}	29
Figura 19. Micrografía de la CBC_{st}	29
Figura 20. Micrografía de CPC	30
Figura 21. Curva granulométrica de la arena	30
Figura 22. Curva granulométrica de la grava	31
Figura 23. Secuencia de caracterización de las mezclas de concreto en estado fresco	33
Figura 24. Elaboración y curado de especímenes	34
Figura 25. Arreglo para la realización de la prueba de RC	34
Figura 26. Arreglo para la medición de la VPU utilizando el equipo PUNDIT	35
Figura 27. Prueba de Resistividad Eléctrica en concretos y equipo Resipod.....	35
Figura 28. Resumen de los resultados de RC de los concretos en estudio.....	36

Figura 29. Resumen de los resultados de VPU de las mezclas en estudio	39
Figura 30. Resumen de los resultados de RE de las mezclas en estudio.....	41
Figura 31. Correlación lineal entre VPU y RC considerando todas las mezclas	45
Figura 32. Correlaciones lineales entre VPU y RC por TM.....	46
Figura 33. Correlación logarítmica entre RC y RE considerando todas las mezclas	49
Figura 34. Correlaciones logarítmicas entre RE y RC por TM.....	49

INTRODUCCIÓN

En la actualidad existe un incremento acelerado en la producción de cemento Portland por la industria de la construcción para elaborar concreto hidráulico y satisfacer la creciente demanda de infraestructura a nivel global. Se estima que la producción mundial de cemento alcanzó más de 4000 millones de toneladas en 2017 (CemNet, 2017), y un consumo en México de 40 millones de toneladas durante 2019 (CANACEM, 2020).

Es importante destacar que durante el proceso de fabricación del cemento se libera a la atmósfera una gran cantidad de dióxido de carbono (CO_2) durante la combustión de hidrocarburos, principalmente durante la conversión de la materia prima, además de la trituración y molienda. En este contexto, algunos estudios indican que se genera una tonelada CO_2 a la atmósfera por cada tonelada producida de cemento (Shekhawat et al., 2014).

Por otra parte, existe un incremento significativo en la generación de residuos industriales como consecuencia de diferentes actividades humanas. Entre estos residuos se encuentran la ceniza volante (CV) resultado de la combustión de carbón mineral de centrales térmicas, y la ceniza de bagazo de caña (CBC) proveniente de los ingenios azucareros, en donde el bagazo se utiliza como combustible para la producción de azúcar entre otros productos derivados.

La reutilización y el manejo de estos y otros residuos como alternativas para la sustitución parcial del cemento Portland se están convirtiendo en un gran reto para los investigadores de distintas áreas de la ingeniería. Por lo tanto, es muy importante generar alternativas factibles que permitan emplear residuos industriales (solos o combinados) como materiales cementantes (o puzolánicos) y que al mismo tiempo contribuyan a reducir las emisiones de CO_2 generadas durante la producción del cemento.

Una alternativa para reducir el uso del cemento es la elaboración de concretos ternarios. Estos concretos son elaborados con la combinación de cemento Portland y dos materiales que reemplazan parcialmente el cemento Portland (estos materiales de reemplazo se denominan materiales cementantes suplementarios (MCS) o puzolanas). La incorporación de dos MCS promueve el surgimiento de un efecto sinérgico, el cual permite combinar los beneficios de cada material sustituto y contrarrestar algunas de sus desventajas.

Los concretos ternarios fueron propuestos a principios de este siglo por diversos investigadores y han resultado ventajosos con respecto a algunos sistemas binarios, en donde se reemplaza parcialmente cemento Portland por un solo MCS (Antiohos et al., 2007; Thomas et al., 2007 y Bagheri et al., 2012). Residuos como la CV y el humo de sílice (HS) han sido ampliamente estudiados mostrando efectos benéficos en concretos. Sin embargo, la CV y el HS no se encuentran disponibles en todas las regiones, lo que eleva su costo, y limita su uso; por lo tanto, se requiere la utilización de MCS obtenidos de residuos localmente disponibles.

La CV es un subproducto de las plantas carboeléctricas producida en la mayoría de los países, generando casi 800 millones de toneladas anuales a nivel mundial (Heidrich et al., 2013) pero una cantidad significativa de este material (alrededor del 50%) no cuenta con una disposición final adecuada, ocasionando un grave riesgo ambiental (Yu et al., 2018).

En México, se cuenta con dos plantas carboeléctricas localizadas en el estado de Coahuila, en donde se produce energía eléctrica y como subproducto se obtiene ceniza volante, (la cual se denominará de aquí en adelante como ceniza volante mexicana, CV_{mx}), generando alrededor de 3.7 millones de toneladas anuales de residuos (durante 2015) (INECC, 2017). Hasta el momento, esta ceniza no ha sido del todo aprovechada y los reportes sobre su utilización son escasos.

Por otro lado, en México existen 50 ingenios azucareros (CNIAA, 2020) que generan más de 42 mil toneladas de ceniza de bagazo de caña anualmente (CONADESUCA, 2017). Se han reportado algunas investigaciones para el uso de esta ceniza como MCS; sin embargo, se requiere mayor investigación sobre sus efectos. Esta ceniza se ha denominado ceniza de bagazo de caña sin tratar (CBC_{st}), caracterizada y estudiada en morteros y concretos en el CIIDIR Oaxaca desde 2010. La CBC_{st} recibe un tratamiento posterior a su recepción del ingenio (postratamiento) que consume poca energía, el cual consiste en un cribado por cuatro minutos, procedimiento propuesto por Hernandez (2010) y empleado exitosamente por Arenas-Piedrahita (2016) y Ríos-Parada (2017).

Tomando en cuenta la actual disponibilidad y potencial puzolánico de ambas cenizas (CV_{mx} y CBC_{st}), y con la finalidad de aprovechar estos residuos en esta investigación se utilizaron como sustitutos parciales del cemento Portland en forma aislada para elaborar y evaluar concretos binarios y en conjunto para concretos ternarios. Dichos concretos fueron caracterizados en estado fresco y en estado endurecido. En estado endurecido, el principal propósito de esta investigación, se determinaron las resistencias a la compresión (RC), las velocidades de pulso ultrasónico (VPU) y las resistividades eléctricas (RE) de los concretos en estudio, así como las correlaciones entre dichas propiedades con el objetivo de obtener modelos predictivos. Es decir, con base en los resultados de técnicas no destructivas tales como la VPU y RE se propone estimar los valores de las RCs a edades tardías.

El presente documento se dividió en cuatro capítulos. En el primer capítulo se describe brevemente la problemática, justificación, estudios previos, objetivos e hipótesis de este proyecto. En el segundo capítulo se presenta el fundamento teórico y conceptual que facilita la comprensión de términos y fenómenos considerados en la presente investigación. El tercer capítulo se incluye el diseño experimental, los materiales utilizados y los procedimientos implementados para la elaboración de los especímenes, su caracterización y el análisis de los resultados. En el cuarto capítulo se presentan los resultados, el análisis de éstos, sus correlaciones y la discusión. Finalmente se agregan las conclusiones, el listado de la bibliografía consultada y anexos.

CAPÍTULO 1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Planteamiento del problema

A nivel mundial la industria del cemento Portland (CP) es responsable de emitir entre el 5% y 10% de las emisiones globales de CO₂ a la atmósfera, posicionándola en una de las tres industrias con mayor cantidad de emisiones durante su proceso de producción (Martirena, 2003; Scrivener, 2008; Castillo, 2010 y Habert et al., 2010). Es por ello, que estudios recientes han evaluado los impactos globales que genera la producción de CP y su asociación con las emisiones de CO₂. En la Figura 1 se presenta una evaluación del impacto ambiental ocasionado por la producción de este material (Chen et al., 2010).

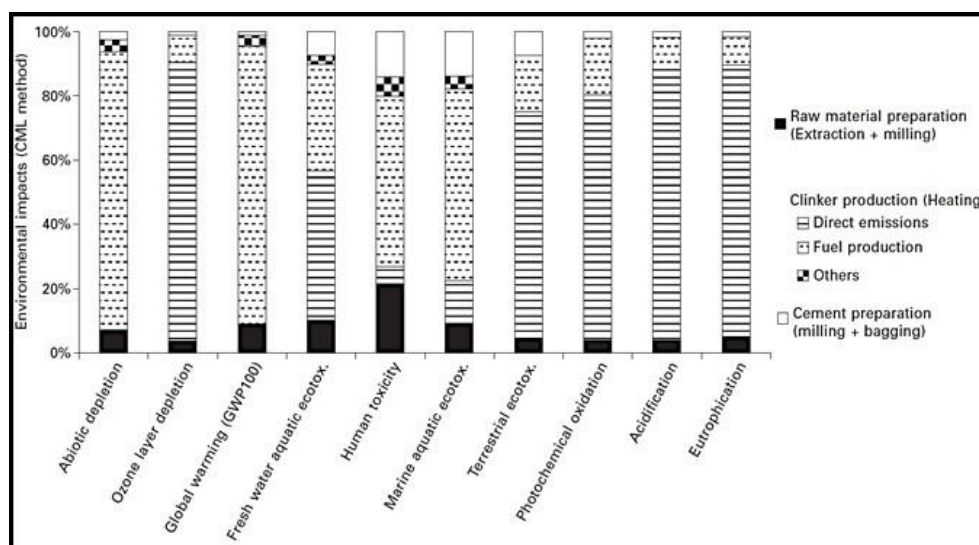


Figura 1. Evaluación del impacto ambiental por producción de cemento

Fuente. Chen et al. (2010)

Impactos como el agotamiento abiótico, la destrucción de la capa de ozono, el calentamiento global, la contaminación en cuerpos agua, suelo y aire, así como afectaciones tóxicas en seres humanos y animales (ecotoxicología), la acidificación de distintos ciclos biogeoquímicos y la eutroficación afectan y amenazan el entorno, por lo que se requieren alternativas de producción o de nuevos materiales con propiedades similares a las del CP.

La importancia del CP radica en las demandas de las sociedades actuales de infraestructura y vivienda, siendo el CP el material que satisface estas necesidades con gran resistencia y durabilidad en la edificación.

México es uno de los principales productores de materiales de América Latina, pero en el último sexenio mostró un ligero incremento (0.6%), según la SEGOB (2018) “atribuido a las incertidumbres políticas, presiones inflacionarias, depreciación del peso mexicano y en especial a la reducción del presupuesto federal en el programa de acceso al Financiamiento para Soluciones Habitacionales de la Comisión Nacional de Vivienda”. Estos hechos no han permitido la implementación de nuevas tecnologías más amigables con el medio ambiente en la industria cementera (Mincomercio, 2019).

Una alternativa para aliviar el problema de emisiones generadas por producción de CP sería la sustitución parcial del CP por residuos industriales, tales como las cenizas. De hecho, las cenizas volantes de centrales carboeléctricas (CV) han sido objeto de diversas investigaciones en varios países y se utilizan como materiales cementantes suplementarios (MCS); mientras que en años recientes se han empezado a estudiar otros tipos de cenizas como la de bagazo de caña (CBC).

La CV que ha sido ampliamente estudiada, estandarizada y utilizada mundialmente no se encuentra disponible en México limitando su uso y encareciendo su precio; no obstante, México cuenta con plantas carboeléctricas que generan ceniza volante (CV_{mx}) que podría ser utilizada como MCS. Además, las propuestas de diversos investigadores en la literatura para el uso de CBC, la cual se produce en grandes cantidades en México, no se han implementado porque requieren largos y costosos procesos (denominados postratamientos) como son la molienda, el cribado, y la calcinación, entre otros. Aunado a esto, hoy en día no existe en México ninguna empresa dedicada al aprovechamiento de estas cenizas para el reemplazo parcial del CP.

Por lo anterior, es necesario investigar el uso de materiales alternos, disponibles regionalmente y procesos que no sea altamente demandantes de energía para su postratamiento como es el caso de la CBC. Actualmente estas cenizas no se aprovechan ampliamente y representan un problema ambiental creciente por su inadecuada disposición final. Cabe mencionar que la disposición final de algunos residuos industriales en México se lleva a cabo en rellenos sanitarios y tiraderos a cielo abierto sin un control establecido, propiciando la generación de especies nocivas, contaminación de los cuerpos de agua, suelo y aire (SEMARNAT, 2013).

1.2 Justificación

Las CV_{mx} y CBC_{st} son residuos económicos que prácticamente no requieren un gasto energético significativo para su aprovechamiento, además de los altos volúmenes disponibles de ambas cenizas que representa una oportunidad para su uso.

Este proyecto se justifica ampliamente porque se evalúan dos cenizas residuales de industrias mexicanas con potencial puzolánico, siendo una alternativa técnicamente viable para la disposición final lo que reduciría el impacto negativo que generan estos subproductos en tiraderos a cielo abierto, además de reducir un porcentaje importante de cemento Portland con la sustitución. Al mismo tiempo, esto contribuiría al cuidado del medio ambiente y a la reducción de emisiones de CO_2 a la atmosfera, debido al ahorro energético y al impacto ambiental que conlleva la producción del cemento Portland.

1.3 Antecedentes

El uso de CVs en el concreto se remonta principalmente a finales del siglo XX y sus ventajas y desventajas se han investigado ampliamente en todo el mundo; no obstante, el nivel de reemplazo todavía está limitado a un máximo de 35% que dependen de las características intrínsecas de cada ceniza y de factores que no se pueden generalizar (Hemalatha & Ramaswamy, 2017).

De hecho, se ha reportado que reemplazos menores a 20% de CP por CVs mejora las propiedades de concretos, es decir, mejora la trabajabilidad de las mezclas permitiendo elaborar concretos con relaciones a/c más bajas, lo que contribuye a reducir el calor de hidratación,

disminuir la porosidad, incrementar la durabilidad y contribuir a desarrollar resistencias comparables o mayores que en concretos sin CV después de 28 días (Molina, 2008). Se sabe que los efectos físicos de las CV están relacionados con la densificación de la matriz cementante que dependen del tamaño, forma y textura de partículas de la ceniza. Los efectos químicos se asocian principalmente a las reacciones secundarias, también llamadas reacciones puzolánicas, esto ocurre entre los óxidos de silicio (SiO_2), aluminio (Al_2O_3), fierro (Fe_2O_3) e hidróxido de calcio (C-H), es último se libera durante la hidratación del cemento, generando nuevos productos de hidratación; entre estos nuevos productos se encuentra el silicato hidratado de calcio (C-S-H) el cual contribuye a mejorar las propiedades mecánicas y durabilidad en concretos (Cordeiro et al., 2008).

En general la CV causa efectos positivos en el concreto, pero existen problemas de disponibilidad y por ende de alto costo en México. Con base en lo anterior, se requiere utilizar un material alternativo que se encuentre disponible en México

Una de las primeras investigaciones acerca del aprovechamiento de cenizas volantes residuales mexicanas (CV_{mx}) se publicó en Valdez y col. (2007), quienes “adicionaron” (puntualizando que es adición y no reemplazo ni sustitución) entre 30 y 150% de CV_{mx} con respecto al peso del CP y un aditivo superplastificante para elaborar concretos. Los resultados obtenidos fueron concretos con una alta resistencia a la compresión (RC), incluso triplica el valor de la mezcla de referencia. Los autores comentan que una sustitución de 90% de CV_{mx} en combinación con el uso de aditivo superplastificante redujo problemas en la mezcla en estado fresco y el concreto alcanzó la mayor resistencia a edades tardías de entre las mezclas evaluadas. Otra investigación sobre el tema llevada a cabo por Arenas-Piedrahita y col. (2016) reporta la adición de 10% y 20% de CV_{mx} tamizada por la malla No.100 (ASTM) durante cinco minutos en la preparación de mezclas binarias de morteros. Los resultados mostraron que el uso de 10% de CV_{mx} no afectó significativamente las propiedades de resistencia y durabilidad de los morteros estudiados; sin embargo, el uso de 20% redujo significativamente las propiedades. Con base en lo anterior, en futuras investigaciones sobre la adición de CV_{mx} como MCS sería conveniente utilizar un porcentaje menor.

Por otra parte, la CBC es un residuo que en las últimas dos décadas se ha empezado a evaluar con mayor esfuerzo como sustituto de CP debido al incremento en la demanda de caña de azúcar a nivel mundial, y a las vastas cantidades en la generación de residuos sólidos de manejo especial (NOM-161-SEMARNAT-2011) y con alto potencial puzolánico. El mecanismo de acción de la CBC es similar al de la CV consumiendo C-H liberado durante la hidratación del cemento, y generando nuevo C-S-H que contribuye a mejorar las propiedades mecánicas y durabilidad en concretos, como se mencionó anteriormente. Actualmente, Brasil lidera estas investigaciones seguido de países como la India y Tailandia, entre otros.

Hasta el momento se sabe que “la actividad puzolánica de la CBC depende de parámetros como son: tamaño de partícula de las cenizas, temperatura de calcinación, grado de amorfocidad y composición química” (Payá, et al., 2002). Incluso, existen diversas investigaciones enfocadas en mejorar el potencial puzolánico de las CBC mediante la eliminación del carbón que contiene y la reducción del tamaño de las partículas (Yadav et al., 2019).

Postratamientos como la molienda, tamizado, calcinado e incluso la combinación de algunas de estas son algunas de las propuestas empleadas para el aprovechamiento de este tipo de cenizas; sin embargo, algunos de estos postratamientos demandan una cantidad significativa de energía generando emisiones adicionales de contaminantes a la atmósfera (Cordeiro et al., 2008 y Bahurudeen et al., 2015). Entre ellos, el tamizado es sin duda el postratamiento que demanda una menor cantidad de energía y ocasiona una baja emisión de contaminantes; no obstante, estudios sobre la implementación de este proceso para el tratamiento de la CBC son escasos.

En este contexto, Arenas-Piedrahita y col. (2016) reportaron la adición de 10% y 20% de CBC tamizada por la malla No.200 (ASTM) durante cinco minutos a la cual los autores denominaron ceniza de bagazo de caña sin tratar (CBC_{st}). Los autores concluyeron que el uso de 10% de CBC_{st} no afectó significativamente las propiedades de morteros; sin embargo, el uso de 20% de CBC_{st} sí lo hizo, reduciéndolas, por lo que en futuras investigaciones también sería conveniente utilizar un porcentaje de adición intermedio.

Por su parte, Maldonado-García y col. en 2018 analizaron las propiedades microestructurales y mecánicas de morteros con 0, 10 y 20% de sustitución de CP por CBC_{st} hasta 600 días manteniendo una relación constante de a/c de 0.63. Los resultados mostraron que la adición de 10 y 20% de CBC_{st} provocan una leve disminución en la trabajabilidad de los morteros, pero mejora su microestructura, aumentando la RC a largo plazo; además, se observó que la adición de 10% registra valores mayores de RC en comparación con la mezcla con 20% CBC_{st} . En ambos casos se presentaron problemas de trabajabilidad, pero no de resistencia; por lo que este estudio corrobora lo encontrado en la investigación de Arenas-Piedrahita y col. (2016).

Otra opción para evitar el uso de postratamientos que demandan una gran cantidad de energía y producen una gran cantidad de contaminantes es contrarrestar los efectos negativos de la CBC mediante su combinación con otro material puzolánico, es decir, la elaboración de concretos ternarios, los cuales fueron propuestos a principios de los 90's y han resultado ventajosos con respecto a algunos sistemas binarios (Bagheri et al., 2012).

El estudio de la adición de CBC_{st} en combinación con CV para la preparación de concretos ternarios ha sido abordado por Jiménez-Quero et al., 2012, Ríos-Parada et al., 2017 y Franco-Luján et al., 2019, quienes en general reportaron que la combinación de CV+ CBC_{st} ocasiona problemas de trabajabilidad en concretos, requiriendo la incorporación de una alta dosis de aditivo superplastificante. Las investigaciones reportan que la adición de 10% CBC_{st} +20%CV no afecta las propiedades de concretos ternarios; sin embargo, la adición de 20% CBC_{st} +20%CV sí redujo significativamente la RC; no obstante, las propiedades de durabilidad de los concretos ternarios son mejores que las de un concreto que contiene solamente CP.

Los antecedentes mencionados son importantes; sin embargo, la falta de disponibilidad de alguno de los ingredientes necesarios para la elaboración de estos concretos ternarios ha impedido su implementación. Por ejemplo, la CV de la marca Admix Tech® empleada previamente en la elaboración de concretos ternarios (Ríos-Parada et al., 2017) ya no está disponible comercialmente.

Con base en lo anterior, en México se requieren investigaciones que estudien concretos ternarios donde la CV sea reemplazada por una disponible en México, por ejemplo, la CV_{mx} ; y se

utilice un porcentaje de CBC_{st} que no afecte negativamente las propiedades de los concretos. Es por ello por lo que en este proyecto se evalúan algunas propiedades de concretos donde el CPC sea reemplazada parcialmente por CV_{mx} , CBC_{st} o por la combinación de ambas.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Evaluar el efecto de la adición de CV_{mx} , CBC_{st} , y la combinación de éstas, en las propiedades de concretos ternarios mediante pruebas de RC, VPU y RE. Además, establecer ecuaciones de correlación entre los resultados de las pruebas para estimar la RC de los concretos ternarios con base en lecturas de VPU y RE.

1.4.2 Objetivos específicos

- a) Obtener y caracterizar la CV_{mx} y CBC_{st} mediante pruebas de composición química, identificación de fases minerales, distribución de tamaño de partículas, morfología y densidad.
- b) Determinar los potenciales puzolánicos (IAR) de la CV_{mx} y la CBC_{st} .
- c) Diseñar cuatro mezclas, una mezcla control con 100% CPC, una binaria donde 15% de CPC sea reemplazado por CV_{mx} , otra binaria donde 15% sea reemplazado CBC_{st} , y una ternaria donde 30% de CPC sea reemplazado por 15% CV_{mx} más 15% CBC_{st} .
- d) Elaborar y caracterizar las mezclas en estado fresco mediante pruebas de revenimiento, temperatura, peso volumétrico y contenido de aire.
- e) Elaborar especímenes cilíndricos con las diferentes mezclas de concretos y evaluar su RC, VPU y RE a 7, 14, 28, 56, 90, 180 y 365 días.
- f) Correlacionar los resultados con el fin de proponer ecuaciones que permitan estimar la RC de los concretos con base en los resultados de VPU y RE.

1.5 Hipótesis

- i. El reemplazo parcial de 15% CPC por CV_{mx} no reduce la RC, VPU y RE del concreto.
- ii. El reemplazo parcial de 15% CPC por CBC_{st} no reduce la RC, VPU y RE del concreto.
- iii. El reemplazo parcial de 30% CPC por la combinación de 15% CV_{mx} y 15% CBC_{st} no reduce la RC, VPU y RE del concreto.
- iv. Resultados de VPU y RE son predictores confiables de la RC de concretos ternarios que contienen CV_{mx} y CBC_{st} .

CAPÍTULO 2. MARCO REFERENCIAL

En este capítulo se encuentra el fundamento conceptual y teórico que da sustento al trabajo de tesis. A lo largo de este capítulo se describen los conceptos y fundamentos que explican los componentes del concreto hidráulico, sus propiedades, las técnicas y pruebas empleadas para caracterizarlo, así como una descripción general de las leyes y principios que representan a los fenómenos evaluados durante el desarrollo de la presente investigación.

2.1 Generalidades del cemento

El cemento Portland, es un tipo de cemento hidráulico, el cual al entrar en contacto con el agua se produce una masa resistente. El cemento Portland es una mezcla de varios compuestos químicos. Estos compuestos confieren altas resistencias iniciales al concreto, es decir, se hidratan y son responsables en gran parte del fraguado inicial y de la RC.

2.1.1 Cemento Portland

De acuerdo con lo descrito en la ASTM C-150, “el cemento Portland es un cemento hidráulico producido mediante la pulverización de Clinker que consiste esencialmente de silicatos de calcio hidráulicos, por lo general contiene uno o más tipos de sulfato de calcio”. Es un material en polvo con propiedades de cohesión y adhesión (aglutinante) que, al entrar en contacto con el agua, permiten la unión de fragmentos minerales entre sí. (Hewlett 2001).

De acuerdo con Oss (2010) “el cemento Portland es una mezcla de materiales calcáreos y arcillosos u otros materiales que contienen sílice, alúmina u óxidos de hierro procesados a altas temperaturas y mezclados con yeso”. Esta mezcla “contiene básicamente cuatro compuestos (90%) que corresponden a la masa del cemento, los cuales al ser adicionados en diferentes cantidades proporcionan distintas propiedades al concreto una vez que estas reaccionan” (Hewlett, 2001).

2.1.2 Manufactura y componentes

El cemento Portland se fabrica a partir de calizas, arcillas y esquistos que proporcionan CaO , SiO_2 y Al_2O_3 respectivamente. El proceso de manufactura consiste en que estos materiales sean molidos finamente, mezclados y calcinados en hornos rotatorios a temperaturas aproximadamente de 1400°C hasta obtener el Clinker.

Durante el proceso de calcinación, se forman cuatro compuestos principales (Tabla 1): Silicato dicálcico (C_2S) (Belita), Silicato tricálcico (C_3S) (Mulita), Aluminato tricálcico (C_3A) (Celita) y Aluminoferrito tetracálcico (C_4AF) (Felita), los cuales corresponden aproximadamente al 90 % de la masa total del cemento. De estos compuestos se considera que los silicatos son los más abundantes e importantes puesto que a ellos se les atribuye el incremento de la resistencia de la pasta cementante (Neville, 1998; Estrada 2005; Nilson, 2009 & Kosmatka et al., 2011).

Tabla 1. Compuestos principales del cemento Portland

Compuesto	Composición química	Abreviatura	% en cemento
Silicato tricálcico	3CaO. SiO ₂	C ₃ S	50-70
Silicato dicálcico	2CaO. SiO ₂	C ₂ S	15-30
Aluminato tricálcico	3CaO. Al ₂ O ₃	C ₃ A	5-10
Aluminoferrito	4CaO. Al ₂ O ₃ . Fe ₂ O ₃	C ₄ AF	5-15

Fuente: Kosmatka et al. (2011)

Además de estos cuatro compuestos también existen otros de manera minoritaria, tales como los álcalis y sulfatos. Los iones alcalinos, como el Na⁺, y K⁺, se presentan en concentraciones del 0.3 a 1.5% y provienen de materias primas empleadas para la producción del Clinker mientras que los sulfatos provienen del yeso adicionado o del combustible del horno (Moragues, 2018). Cada compuesto proporciona diversas propiedades físico-mecánicas de acuerdo con su composición química (Tabla 2 y 3), las cuales proporcionan diversas ventajas y dan surgimiento a diversos tipos de cemento que se adapten a las distintas necesidades de construcción (Tabla 3).

Tabla 2. Propiedades físico-mecánicas de los compuestos principales del cemento

Compuesto	% CaO	% SiO₂	% Al₂O₃	% Fe₂O₃
Silicato tricálcico	73.7	26.3	0	0
Silicato dicálcico	64.1	35.9	0	0
Aluminato tricálcico	62.3	0	37.7	0
Ferroaluminato tetracálcico	46.1	0	21	32.9

Fuente: Estrada et al. (2015)

Tabla 3. Composición química de las principales fases del cemento

Compuesto	Propiedades físico-mecánicas
C ₃ S	Presenta endurecimiento rápido y alto calor de hidratación.
C ₂ S	Presenta endurecimiento lento, pero de crecimiento sostenido y bajo calor de hidratación.
C ₃ A	En cantidades altas presenta endurecimiento rápido, fraguado rápido, alto calor de hidratación y tendencia al agrietamiento y fisuración, además de sensibilidad a los sulfuros.
C ₄ AF	Presenta endurecimiento lento.

Fuente: Estrada et al. (2005), obtenido de ASTM C-150

Finalmente, el clinker se deja enfriar para posteriormente molerlo adicionando yeso (entre el 4 y 6% como fuente de sulfato de calcio) hasta lograr la finura requerida y comercializarlo como cemento Portland (Neville1998; Mehta et al., 2006 & Nilson 2009).

2.1.3 Tipos de Cemento Portland

Actualmente se elaboran ocho distintos tipos de cementos para satisfacer los requerimientos y especificaciones los cuales se describen en la norma ASTM C-150 (Tabla 4).

Tabla 4. Tipos de Cemento Portland

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

Por un lado, los cementos se clasifican por su tipo de resistencia, las cuales alcanzan una resistencia mínima de 20 MPa, 30 MPa y 40 MPa (200 kg/cm^2 , 300 kg/cm^2 y 400 kg/cm^2) a 28 días; además de las clases 30R y 40R, que presentar también deben presentar una resistencia de 200 kg/cm^2 y 300 kg/cm^2 , a los 3 días de edad. Por otra parte, los cementos se distinguen en seis tipos de cementos, indicando su resistencia y si posee alguna otra particularidad. En la Tabla 5 se presentan los tipos de cementos según su composición química, potencial y finura (ASTM C-150).

Tabla 5. Composición química

Tipo de cemento	Composición Química (%)							Composición Potencial				Finura Blaine m^2/kg
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	
I	20.5	5.4	2.6	63.9	2.1	3.0	0.61	54	18	10	8	369
II	21.2	4.6	3.5	63.8	2.1	2.7	0.51	55	19	6	11	377
III	20.6	4.9	2.8	63.4	2.2	3.5	0.56	55	17	9	8	548
IV	22.2	4.6	5.0	62.5	1.9	2.2	0.36	42	32	4	15	340
V	21.9	3.9	4.2	63.8	2.2	2.3	0.48	54	22	4	13	373
Blanco	22.7	4.1	0.3	66.7	0.9	2.7	0.18	63	18	10	1	482

2.1.4 Hidratación del cemento Portland

El proceso de hidratación del CP es la combinación de todas las reacciones fisicoquímicas secuenciales y simultáneas entre las partículas minerales del cemento (C₃S, C₂S, C₃A y C₄AF) con el agua, yeso y otros aditivos. Además, deben considerarse la aglomeración, adsorción, evaporación y liberación de energía térmica (Stark 2011), los cuales podrían afectar dicho proceso. En la Figura 2 se muestra las cinco etapas de la hidratación del CP que a continuación se describen.

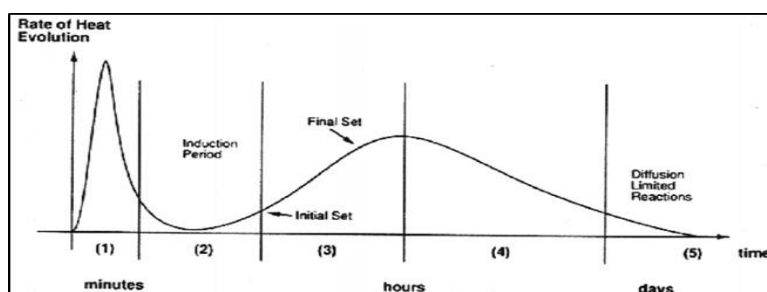


Figura 2. Etapas de hidratación del cemento Portland

Fuente: Gartner et al. (2002)

1. Periodo de pre-inducción: Ocurre entre los 0 a 30 minutos después del contacto del cemento con el agua, es un periodo de hidratación inicial rápido donde ocurre disolución rápida de iones y se liberan grandes cantidades de calor.

2. Periodo de inducción (durmiente): Comienza dos horas después de iniciado el proceso de hidratación, en este periodo ocurre una disolución lenta de iones y formación de C-S-H temprano.

3. Periodo de aceleración: Es la etapa donde inicia el fraguado inicial y ocurre aproximadamente a 7 horas de inicio del proceso de hidratación, se caracteriza por el rápido crecimiento permanente de productos de hidratación.

4. Periodo de desaceleración: Ocurre transcurridas 24 horas, en esta etapa disminuye la tasa de hidratación del cemento a medida que se hidrata, teniendo moderado crecimiento de los productos cementantes y desarrollo de la microestructura.

5. Periodo de difusión estable: La hidratación ocurre lentamente hasta cumplir 40 horas, debido a que las reacciones limitan la difusión de los iones en los poros.

2.1.5 Reacciones de hidratación del cemento Portland

Durante la hidratación del cemento Portland, el C-S-H es el principal producto responsable del fraguado y del desarrollo de la resistencia en pastas, morteros o concretos (Stark, 2011). El hidróxido de calcio tiene efectos positivos, puesto que conserva el pH de la matriz cementante (12-13) manteniendo una reserva alcalina, lo que protege al acero de la corrosión electroquímica (Giraldo & Tobon, 2006). No obstante, este producto es susceptible al deterioro con el consecuente impacto negativo en las propiedades del concreto. La evolución de los productos de hidratación del cemento está ligada a la porosidad del concreto, en la Figura 3 se aprecia que a mayor edad de hidratación dichos productos incrementan y la porosidad disminuye, puesto que ocupan el espacio vacío de los poros dejados por el agua (Kurdowski, 2014).

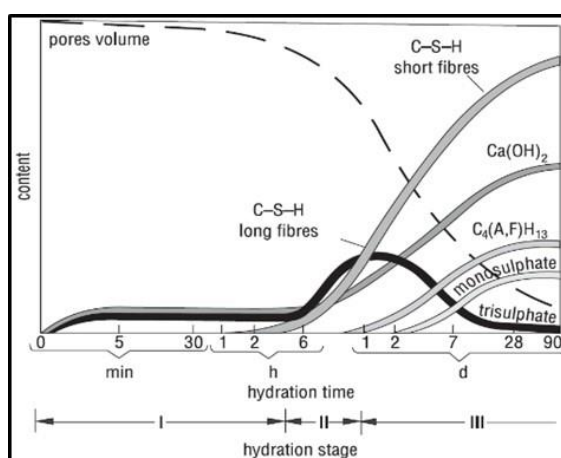


Figura 3. Volúmenes de los compuestos en pastas de cemento durante la hidratación

Fuente: Kurdowski et al. (2014)

El endurecimiento del cemento y tiempo de fraguado del concreto son el resultado de distintos procesos fisicoquímicos entre el cemento Portland y el agua, es decir, durante la hidratación de este. Las reacciones de hidratación son exotérmicas, lo que explica la generación de calor, además, este tipo de reacciones dependerá del tipo de cemento, adiciones minerales y finura, resultado un producto duro y de alta resistencia. De acuerdo con Nevill (1999) “los principales compuestos que reaccionan con el agua para producir productos de reacción son silicato tricálcico (C_3S), silicato dicálcico (C_2S), aluminato tricálcico (C_3A) y aluminoferrito tetracálcico (C_4AF); los productos de hidratación de los dos silicatos de calcio son similares y se diferencian solo en la cantidad de hidróxido de calcio formado, en presencia de agua, las fases del cemento Portland se hidratan para formar nuevos compuestos, los cuales son la microestructura de la pasta de cemento endurecida en el concreto” (Tabla 6).

Tabla 6. Reacciones de hidratación de las principales fases del cemento Portland

Reactants		Products	
2(3CaO•SiO ₂) Tricalcium silicate	+ 11H ₂ O Water	= 3CaO•2SiO ₂ •8H ₂ O Calcium silicate hydrate (C-S-H)	+ 3(CaO•H ₂ O) Calcium hydroxide
2(2CaO•SiO ₂) Dicalcium silicate	+ 9H ₂ O Water	= 3CaO•2SiO ₂ •8H ₂ O Calcium silicate hydrate (C-S-H)	+ CaO•H ₂ O Calcium hydroxide
3CaO•Al ₂ O ₃ Tricalcium aluminate	+ 3(CaO•SO ₃ •2H ₂ O) Gypsum	+ 26H ₂ O Water	= 6CaO•Al ₂ O ₃ •3SO ₃ •32H ₂ O Ettringite
2(3CaO•Al ₂ O ₃) Tricalcium aluminate	+ 6CaO•Al ₂ O ₃ •3SO ₃ •32H ₂ O Ettringite	+ 4H ₂ O Water	= 3(4CaO•Al ₂ O ₃ •SO ₃ •12H ₂ O) Calcium monosulfoaluminate
3CaO•Al ₂ O ₃ Tricalcium aluminate	+ CaO•H ₂ O Calcium hydroxide	+ 12H ₂ O Water	= 4CaO•Al ₂ O ₃ •13H ₂ O Tetracalcium aluminate hydrate
4CaO•Al ₂ O ₃ •Fe ₂ O ₃ Tetracalcium aluminoferrite	+ 10H ₂ O Water	+ 2(CaO•H ₂ O) Calcium hydroxide	= 6CaO•Al ₂ O ₃ •Fe ₂ O ₃ •12H ₂ O Calcium aluminoferrite hydrate

Fuente: Kosmatka et al. (2011)

2.2 Sistemas compuestos

Los sistemas compuestos o “cementos compuestos”, están constituidos por cemento y algún otro material con propiedades puzolánicas, pudiendo mejorar o mantener las mismas características del concreto; y estos sistemas compuestos pueden estar formados por dos o tres componentes alternativos.

2.2.1 Sistemas binarios

Los sistemas binarios son mezclas de cemento Portland y un material cementante suplementario o puzolánico. El objetivo es mezclar eficazmente el cemento y las puzolanas para la elaboración de concretos con las propiedades requeridas. Según la norma UNE 80 301:1996 “las mezclas de cemento Portland pueden combinarse con ceniza volante, escoria de alto horno, humo sílice, puzolana natural, esquistos calcinados y caliza; en estas mezclas de cemento Portland con puzolanas se han obtenido mejores propiedades mecánicas a largo plazo, comparadas con las obtenidas únicamente con cemento Portland”.

2.2.2 Sistemas ternarios

Los cementos ternarios son la mezcla de dos materiales puzolánicos diferentes, más cemento Portland siendo este último el que actúa como principal material de unión cuando se adiciona agua y agregados (Saifuddin et al., 2015). El objetivo de mezclar estos materiales es compensar las deficiencias presentadas entre ellos; debido al efecto conjunto, la mejora de algunas propiedades en concretos ternarios es superior que la contribución individual. El efecto sinérgico se debe al efecto físico y químico de los aditivos minerales (Mullick, 2007).

2.3 Materiales puzolánicos

Las puzolanas o materiales puzolánicos se consideran como materiales alternos al cemento Portland puesto que se pueden utilizar como materias primas en la fabricación este o como reemplazo total o parcial en mezclas de concreto debido a sus altos contenidos de SiO_2 .

2.3.1 Definición de puzolana (ASTM C-125)

De acuerdo con la norma ASTM C-125, las puzolanas se definen como: “Material silíceo o material silicio y aluminoso, el cual por sí mismo posee poco o ningún valor cementante; sin embargo, en forma finamente dividida y en presencia de humedad reacciona químicamente con el hidróxido de calcio a temperatura ambiente formando compuestos con propiedades cementantes”.

2.3.2 Clasificación de las puzolanas

De acuerdo con Sánchez de Rojas et al., (2013) “las puzolanas se pueden clasificar puzolanas naturales (materiales de origen volcánico, materias sedimentarias de origen animal o vegetal) y artificiales (materiales con tratamientos, subproductos industriales, arcillas, entre otras)”.

2.3.3 Índice de actividad puzolánica

El índice de actividad puzolánica evalúa el desarrollo de la resistividad del mortero que contiene 20% del MCS en estudio. El valor que representa el desempeño de la puzolana evalúa la formación de silicato hidratado de calcio, es decir, la cantidad de puzolanas que reaccionaron, lo que contribuye a un incremento de la resistencia mecánica que se denomina Índice de Actividad de Resistencia (IAR), y el método para su determinación se especifica en la norma ASTM-311.

2.3.4 Reacción puzolánica

La reactividad puzolánica “se asocia a la estructura física de las partículas y al potencial para reaccionar y formar compuestos cementicios, donde destacan dos parámetros, la cantidad máxima de cal que una puzolana puede combinar y la velocidad con que tal combinación se produce” (Kirk & Zuleta, 2000), es decir, “dependerá de las fases activas que reaccionen con el Ca(OH)_2 liberado durante la hidratación del cemento produciendo mayor contenido de C-S-H, que son fases estables, hidráulicas e insolubles” (Rosell-Lam et al., 2011).

Es bien sabido que el contenido total de cal ligada depende de las fases activas, el contenido de: puzolanas, dióxido de silicio, hidróxido de calcio y tiempo de curado; y la velocidad de reacción depende del área superficial específica de la puzolana, de la relación agua/cemento del diseño de mezcla y temperatura (Lea y Desch, 2004).

La reacción puzolánica ocurre entre algunos minerales (silicio, aluminio y hierro) de las puzolanas con el Ca(OH)_2 al entrar en contacto con el agua. Para explicar las reacciones puzolánicas, algunos autores han propuesto una disolución por difusión, en el cual representan las reacciones que ocurren entre el C_3S y C_3A con la puzolana (Takemoto & Uchikawa, 1980); de

acuerdo con ellos, en el sistema C_3S -puzolana, los iones de calcio son disueltos del C_3S y absorbidos por las partículas de la puzolana formando el C-S-H.

Estos hidratos en la superficie de la puzolana forman una capa amorfa rica en Si y Al a partir de la disolución de Na^+ y K^+ con agua. La disolución de iones K^+ y Na^+ incrementa la concentración de iones hidroxilos y acelera la separación de SiO_4^{4-} y AlO_2^- los cuales se ligan con el Ca^{2+} aumentando el espesor de la capa amorfa que crece gradualmente dejando un vacío entre esta capa y la partícula de la puzolana, “cuando la presión en el vacío rompe la capa, los iones SiO_4^{4-} y AlO_2^- se difunden en la solución rica en Ca^{2+} ”; finalmente se forman nuevos productos como C-S-H y aluminatos de calcio (Ca-Al) (Malhotra & Ramezaniapur, 1994).

De acuerdo con Takemoto y Uchikawa (1980) para el sistema C_3A -puzolana, las puzolanas aceleran la hidratación del C_3A debido a la absorción del Ca^{2+} generando sitios de precipitación para la etringita y otros productos de hidratación. “La reacción de este sistema ocurre de forma similar a la del sistema puzolánico C_3S , explicada anteriormente”. En este sistema C_3A se forman la etringita, el monosulfato hidratado, el hidrato de aluminio de calcio y los silicatos hidratados de calcio sobre la capa exterior a las partículas de la puzolana o sobre la capa hidratada del C_3A , dependiendo de las concentraciones de Ca^{2+} y SiO_4^{4-} en la solución. En la Figura 4 se muestran los esquemas de los mecanismos de hidratación de los sistemas C_3S y C_3A .

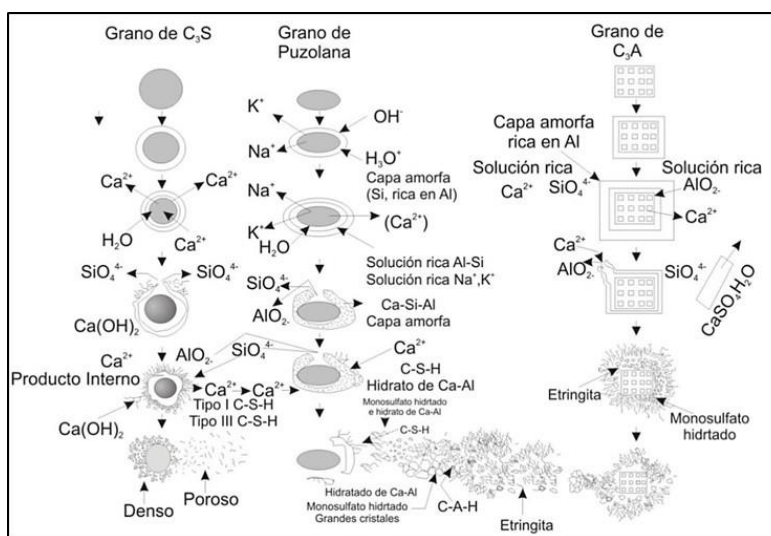


Figura 4. Mecanismos de hidratación en los sistemas puzolánicos C_3S y C_3A

Fuente: Malhotra & Ramezaniapur, 1994

2.3.5 Ceniza volante (CV)

La clasificación de la ceniza volante está basada en el tipo de carbón del cual se origina, de acuerdo con la ASTM C-618 “las cenizas volantes clase F y clase C se emplean comúnmente como adiciones puzolánicas en el concreto”. La CV Clase F regularmente es una CV con un contenido de calcio (CaO) menor que 10% y menor que 5% contenido de carbón; no obstante, algunas pueden incluir hasta 10% de carbón. La Clase C suele contener entre 10 - 30% de dióxido de calcio (CaO) y un contenido de carbón $\leq 2\%$ (Kosmatka et al., 2011).

La CV está compuesta de pequeñas partículas esféricas de aluminosilicato (Figura 5), en ocasiones se presentan como cenósferas huecas o en forma de plenósferas que son esferas que contienen esferas de menor tamaño en su interior (ACI committe 232). La CV básicamente es un vidrio de sílice, aluminio, hierro y calcio; y en menor proporción magnesio, azufre, sodio, potasio y carbono, con una masa específica entre 1.9-2.8, de color gris o marrón, abrasivo y alcalino, con un área superficial entre 300-500 m²/kg y un tamaño promedio menor a 75µm oscilando entre los 20 µm y solo del 10-30% es menor a 45µm (Ahmaruzzaman, 2010 y Kosmatka et al., 2011).

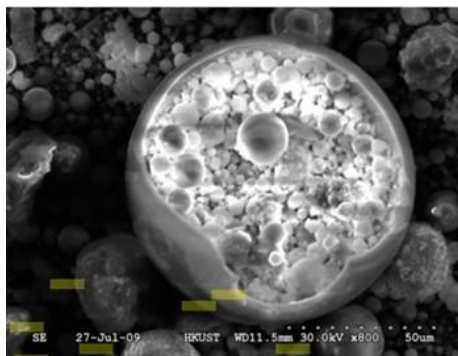


Figura 5. Micrografía de CV
Fuente: Li 2011

Cuando no se tiene una combustión controlada en las centrales térmicas las CV's reducen su calidad elevando el contenido de carbón, el cual es nocivo para los concretos; los límites varían de 2.5-6% según la norma y se expresa como “pérdidas por ignición” debido a la necesidad de incrementar la demanda de agua y el uso de agentes superplastificantes. (Kurdowski, 2014).

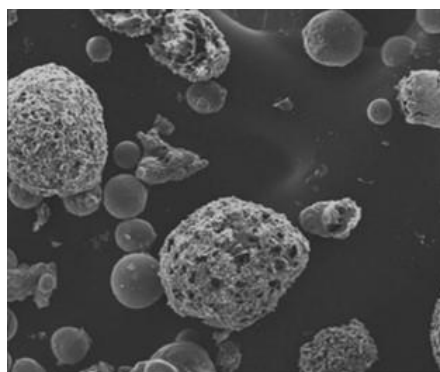


Figura 6. Micrografía de CV con mala combustión y alto contenido de carbón
Fuente: Kurdowski, 2014

Al emplear la CV como adición en concretos, cambian las condiciones de la matriz conglomerante y por consecuencia el desarrollo de productos cementantes, por tanto, también cambia la microestructura. A edades tempranas (entre 0 y 28 días) existen reacciones puzolánicas incipientes, por lo que la CV actúa como un material inerte, mientras que a edades tardías (a partir de 56 días aproximadamente) debido a la evolución la actividad puzolánica se produce un refinamiento de la estructura porosa y aumento de la densidad de la matriz cementante, por ende se tiene incremento de la resistencia mecánica y mayor resistencia ante el ingreso de agentes agresivos como los iones cloruro (Malhotra & Carino, 2003 y Chindaprasirt et al., 2007). Al refinarse la estructura porosa se incrementa la resistencia mecánica, lo cual infiere mejoras de la microestructura que podrían también incrementar la durabilidad (García, 2001).

La dosificación de la CV dependerá de la reactividad de esta y de las características estimadas en el concreto. En la Tabla 7 se puede observar la composición típica de la CV según el tipo de clase, esto de acuerdo con la clasificación del ASTM C-618.

Tabla 7. Composición química típica de la ceniza volante (%)

Compuesto	Clase F	Clase C
SiO ₂	49.1	53.79
Al ₂ O ₃	16.25	15.42
Fe ₂ O ₃	22.31	5
TiO ₂	1.09	1.68
CaO	4.48	18
MgO	1	3.4
K ₂ O	1.42	0.05
Na ₂ O	0.05	0.05
C	n/a	n/a
SO ₃	0.73	1.44
Cl	n/a	n/a
S	n/a	n/a
P	n/a	n/a
LOI	1.18	0.8
Humedad	n/a	n/a

*LOI: Pérdidas por ignición (Loss on ignition)

Fuente: Li (2011)

2.3.4 Ceniza de Bagazo de caña (CBC)

El bagazo de la caña de azúcar es un residuo industrial que se usa como combustible en la misma industria de la caña de azúcar. La combustión produce ceniza de bagazo de caña (CBC) que contiene óxidos de silicio y aluminio y carbón como componentes principales. Esta CBC se han caracterizado química, física y mineralógicamente para evaluar la posibilidad de su uso como material de reemplazo de cemento en la industria del concreto. Ganesan et al. (2007) declararon que una tonelada de caña de azúcar genera aproximadamente 280 kg de bagazo, y basado en cuestiones económicas y ambientales, también genera enormes problemas de gestión del bagazo, es decir, utilización, almacenamiento y/o eliminación.

En México la producción de caña se localiza especialmente en Chiapas, Jalisco, Oaxaca, San Luis Potosí y Veracruz quienes producen el 70% de azúcar a nivel nacional (SAGARPA, 2010). En 2019 se produjeron 6,812,100 toneladas de caña de azúcar (KNOEMA, 2020). Por cada tonelada de caña procesada se obtienen entre 250-300 kg de bagazo, y de estos se obtienen aproximadamente 6 kg de CBC (Teixeira et al., 2011). En este contexto, en 2019 se produjeron aproximadamente 37 mil toneladas de CBC, demostrando la gran disponibilidad de este residuo.

Los estudios sobre la CBC reportan que se compone principalmente por sílice, y óxidos de calcio, aluminio y hierro. Además, se ha encontrado que la CBC tiene partículas heterogéneas y con gran variedad de formas (partículas prismáticas, tubulares e irregulares) y tamaños, superficies rugosas, con altas porosidades y grandes áreas superficiales (Figura 7) (Cordeiro et al., 2008).

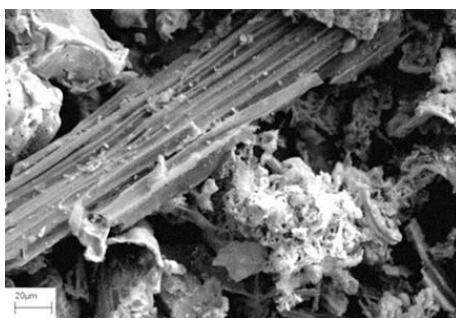


Figura 7. Micrografía de CBC sin tratar

Fuente: Nuntachai et al. (2009)

2.3.5. Caracterización de las puzolanas

2.3.5.1. Técnica de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

La técnica MEB “emplea electrones en lugar de luz para formar una imagen mediante un filamento que genera un haz de electrones para iluminar la muestra y con diferentes detectores recoge los electrones generados de la interacción con la superficie de la misma para crear una imagen que refleja las características superficiales de la misma (SCAI-UMA, 2020), pudiendo proporcionar información de forma, texturas y composición de sus constituyentes, “permitiendo un análisis cualitativo y semicuantitativo de la constitución básica de áreas superficiales” (Callister, 2009).

2.3.5.2. Técnica de difracción de rayos X (DRX)

La técnica de DRX se basa en las intersecciones ópticas que se producen cuando una radiación monocromática (de un solo color) atraviesa una rendija con un tamaño similar a la longitud de la onda irradiada; “los Rayos X tienen longitudes de onda del mismo orden que las de los componentes de las redes cristalinas, que, al ser irradiados sobre la muestra a analizar, los Rayos X se difractan con ángulos que dependen de las distancias interatómicas”. El método analítico de Debye-Scherrer consiste en “irradiar con Rayos X sobre una muestra formada por multitud de cristales colocados al azar en todas las direcciones posibles”, con base en la Ley de Bragg que determina con la distancia interatómica la difracción resultante (Alicante, 2021).

Mediante la técnica de DRX se puede obtener información “del tipo de estructuras cristalinas, el análisis químico cualitativo y cuantitativo y la determinación de esfuerzos residuales y del tamaño del cristal” Callister, 2009.

2.4 Generalidades del concreto

2.4.1 Definición

El concreto “es un material cerámico compuesto por partículas o fragmentos de agregados como arena y grava, y un aglutinante formado por cemento hidráulico y agua” ASTM- C-125.

2.4.2 Concreto hidráulico

El concreto hidráulico es “una roca fabricada por el hombre, diseñada y producida de acuerdo a normas establecidas para fines de aplicaciones que se requieren en un proyecto determinado y con las características de economía, facilidad de colocación, velocidad de fraguado y apariencia adecuada según su aplicación” (IMCC, 2004). Actualmente, es el material más utilizado en la industria de la construcción por su duración, resistencia, impermeabilidad y economía.

2.4.3 Diseño de mezclas de concreto

Permite determinar las especificaciones requeridas en el concreto como son propiedades en estado fresco, propiedades mecánicas y durabilidad. El método de volúmenes absolutos del ACI-211 indica que “el volumen absoluto del material (cemento y agregados) es el volumen de la materia sólida sin incluir el volumen de los vacíos de aire atrapado” y “su volumen en estado fresco es igual a la suma del volumen de todos sus ingredientes y contenido aire” (Kosmatka et al., 2011).

2.5 Propiedades de concretos en estado fresco

Las principales pruebas en estado fresco que se evalúan en la elaboración de concretos son la prueba de revenimiento que es “la capacidad del concreto para deformarse bajo su propio peso y contra la fricción de la superficie sin la presencia de alguna restricción externa” ASTM C-143; la temperatura cuyo factor “influye en la calidad de los concretos, el tiempo de fraguado y la resistencia del concreto” (ASTM C-1064) y el peso volumétrico y el rendimiento se determinan de acuerdo con la ASTM C-138, que asimismo presenta una indicación del contenido de aire y de la masa volumétrica de los ingredientes (ASTM C-231).

2.6 Principales propiedades del concreto en estado endurecido

2.6.1 Resistencia a la compresión ASTM C-109

La prueba de la resistencia a la compresión es la más frecuente de todas las pruebas en el concreto, es útil porque se relaciona con varias características de manera cuantitativa, relacionadas con la estructura de la matriz cementante, “por ello, la RC es esencial del diseño estructural y se especifica con fines de cumplimiento” Neville (2000). La RC se considera como la respuesta al esfuerzo último aplicado a un material hasta llegar a su falla o colapso Figura 8, que tiene su fundamento en la ley de Hooke para materiales homogéneos e isótropos, la cual establece una relación directamente proporcional entre la fuerza aplicada y la deformación unitaria (Askeland, 1998). Con base en lo anterior la RC en ingeniería queda definida según la norma ASTM C-109 por la Ec 1.

$$f'c = \frac{P}{A} \quad \text{Ec. (1).}$$

Donde:

$f'c$ = Resistencia a la compresión (kg/cm² ó MPa)

P = Fuerza total aplicada (kg, N)

A = Área de la sección transversal (cm², mm²)



Figura 8. Representación de la prueba de la resistencia a la compresión

Fuente: Giatec Scientific, 2019

En el concreto, la resistencia está relacionada con el esfuerzo que se requiere para causar la falla y se define como el esfuerzo máximo que el espécimen de concreto puede soportar; cuando el espécimen falla puede no ser visible ninguna señal, sin embargo, el agrietamiento interno se encuentra avanzado en el espécimen y es incapaz de soportar una carga mayor (Mehta et al., 2006).

Los factores que afectan la RC del concreto incluyen propiedades y proporción de los materiales de la mezcla del concreto, la compactación y condiciones de curado. Además de la relación agua/material cementante y la porosidad, la resistencia es indudablemente el factor más importante porque se relaciona con todas las características del espécimen (dimensiones, geometría y contenido de humedad) y de los parámetros de prueba (tipos de esfuerzo y velocidad de la aplicación de la carga) (Mehta, 2006 y Kosmatka, 2011).

2.6.2 Prueba de velocidad de pulso ultrasónico ASTM C-597

La prueba de VPU “es útil en el concreto para determinar la presencia de vacíos, grietas y otras imperfecciones, así como de cambios que ocurren a través del tiempo como la hidratación del cemento” (ASTM C-597). La VPU puede verse afectada por factores, tales como la humedad del concreto, la temperatura y las microgrietas (CNS Electronics). También es aplicable para indicar cambios en las propiedades del concreto y en el levantamiento de estructuras, para estimar la severidad del deterioro o agrietamiento. Si se usa para monitorear los cambios en la condición a lo largo del tiempo, las ubicaciones de prueba deben marcarse en la estructura para asegurar que las pruebas se repitan en las mismas posiciones.

Existen tres formas para determinar la VPU en concretos, las cuales son: transmisión directa, semidirecta e indirecta. La más utilizada es la directa para disminuir el ruido de la señal. La prueba de VPU referida en este trabajo, corresponde al método de contacto por transmisión-recepción, cuya representación esquemática se presenta en la Figura 9. El empleo de pulsos ultrasónicos por transmisión-recepción, pueden presentarse importantes pérdidas de energía causadas por el acoplamiento imperfecto de los transductores y la superficie de prueba. Por lo tanto, es recomendable la aplicación de un agente acoplante como vaselina o parafina en la superficie de los especímenes, para asegurar una superficie de contacto suave que disminuya las pérdidas o, en dado caso, provea una misma constante de pérdidas (Tharmaratnam y Tan, 1990).

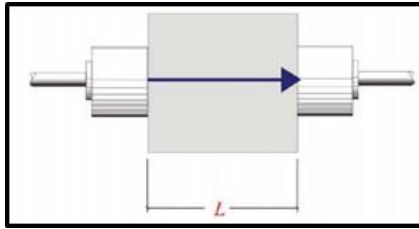


Figura 9. Esquema de la prueba de pulso ultrasónico

Fuente: Martínez-Martínez, 2008

2.6.3 Prueba de Resistividad eléctrica RILEM TC-154

La RE del concreto es una propiedad física definida como “la resistencia al flujo de corriente eléctrica a través de éste”. Por otra parte, el concreto se considera un material semiconductor cuya resistividad varía según distintas variables, “normalmente, la corriente eléctrica es llevada por la red de poros mediante los iones de Na^+ , K^+ , Ca^+ , OH^- , SO_4^- , Cl^- , los cuales se encuentran disueltos en la solución de poro”.

Por lo tanto, “los factores tales como la relación agua cemento (a/c), tipo de cemento, adiciones puzolánicas y el grado de hidratación afectarán directamente la resistividad del concreto; los factores medioambientales tales como la temperatura y humedad tienen también un fuerte impacto sobre la resistividad del concreto” (Saleem et al., 1996).

Para medir la RE se aplica un campo eléctrico constante entre dos electrodos colocados sobre la superficie del espécimen o sobre el acero de refuerzo y se calcula la corriente resultante mediante una caída de voltaje de corriente directa (CD) de valor conocido de. Las mediciones se realizan por medio del método de cuatro electrodos (Figura 10), (Saleem et al., 1996).

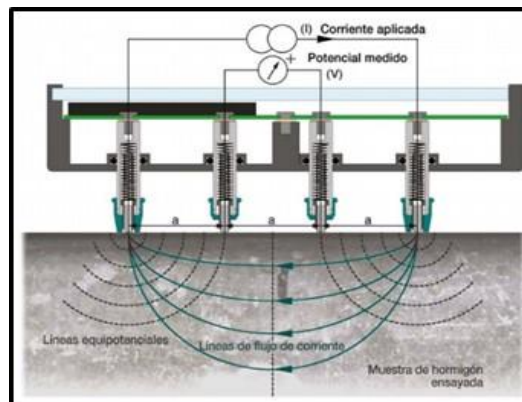


Figura 10. Representación de la prueba de la resistividad por método de cuatro electrodos

Fuente: Saleem et al, 1996

Esta prueba de RE es útil porque “puede valorar el endurecimiento en estado fresco, el grado de curado, la resistencia a la penetración de los cloruros, la carbonatación y la velocidad de corrosión del acero de refuerzo en concreto. La influencia de otros parámetros tales como la naturaleza de los agregados, su grado de humedad y su geometría es también algo para tener en cuenta. Sin embargo, es la capacidad de circulación de los iones en el electrolito en la matriz lo que condiciona más el valor de la RE” (Andrade et al., 2011).

Además, puede predecirse la RC por medio de la resistividad, debido a la correlación entre estas dos variables, ya que ambas dependen directamente del proceso de hidratación del cemento y de los cambios microestructurales. Cuando la microestructura se hace más densa, la resistencia a la compresión y la resistividad eléctrica del concreto se incrementa (Andrade et al., 2011).

Algunos medidores de resistividad comerciales funcionan según el principio de la sonda Wenner; es decir, “se aplica una corriente a dos sondas exteriores y se mide la diferencia de potencial entre las dos sondas interiores (Figura 11). La corriente es transportada por iones en el líquido de los poros. La RE dependerá de la distancia entre las sondas” (Andrade et al., 2011).

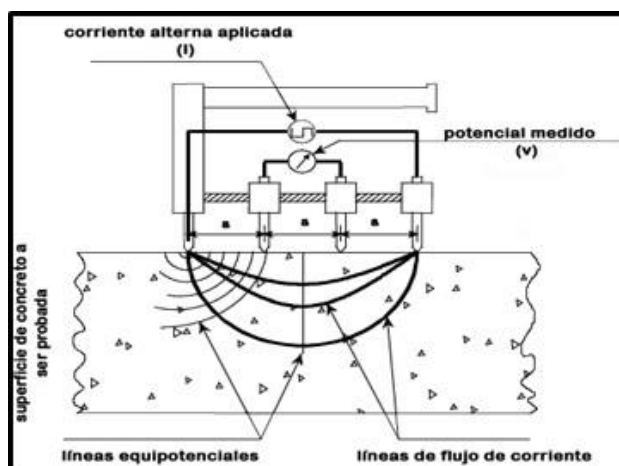


Figura 11. Principio del método de los cuatro electrodos.

Fuente: AASHTO T 358-151.

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

En este capítulo se presenta la descripción general del proyecto, el diseño experimental, la descripción de los materiales utilizados, así como los métodos empleados durante el desarrollo de la presente investigación.

3.1 Descripción del experimento

Las hipótesis planteadas en la sección correspondiente de este manuscrito dieron origen al presente proyecto de investigación. Con el objeto de darle unidad y coherencia al proyecto todas las actividades y etapas se agruparon en cuatro fases. En la Fase 1 se caracterizaron los materiales que sirvieron como ingredientes para la preparación de las mezclas de morteros y concretos. En la Fase 2 se diseñó el experimento, se elaboraron las mezclas y se fabricaron los especímenes para las diferentes pruebas. En la Fase 3 se caracterizaron las propiedades en estado fresco y estado endurecido de las mezclas de concreto. Finalmente, en la Fase 4 se analizaron los resultados de las pruebas en estado endurecido del concreto con el propósito de evaluar el efecto de las adiciones minerales en las propiedades de los concretos, lo cual es el objetivo principal de este proyecto. Además, se analizaron las correlaciones entre estas propiedades. Las diferentes fases y etapas del proyecto se resumen en la Figura 12, y se describen con mayor detalle en secciones posteriores.

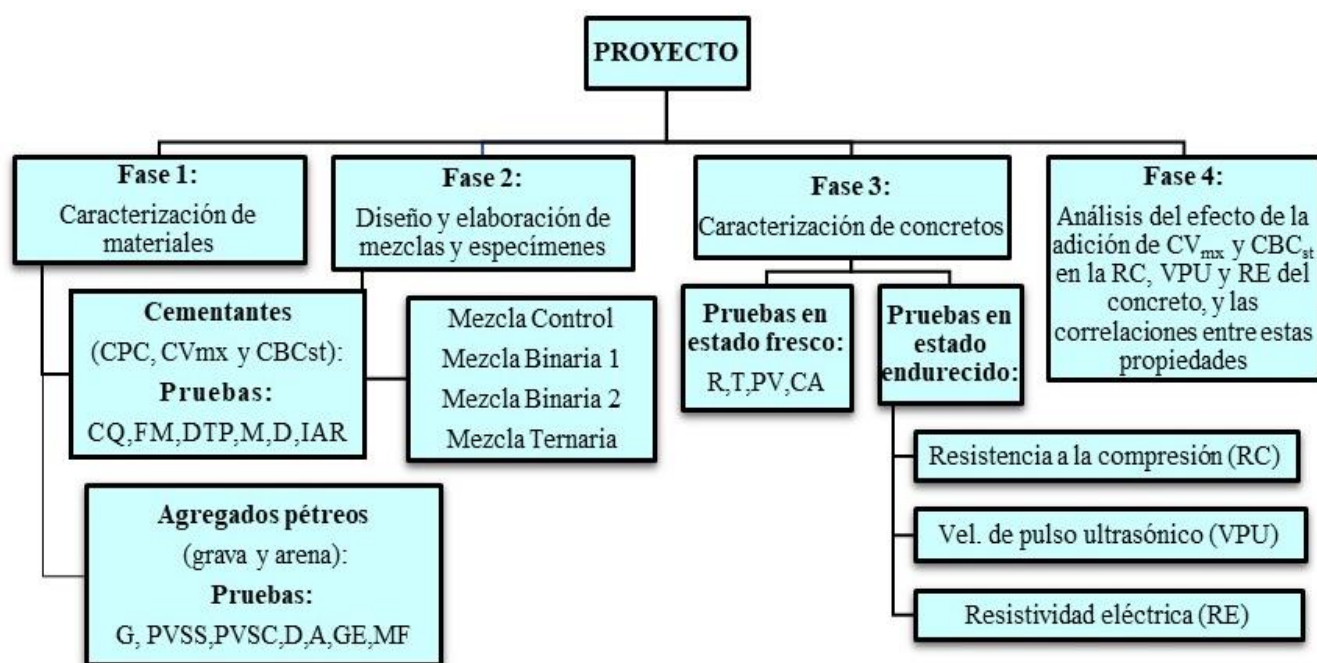


Figura 12. Representación esquemática de metodología desarrollada

3.2 Diseño experimental

El diseño del experimento consistió en un diseño bifactorial no balanceado. Los factores fueron el Tipo de Mezcla (TM) y la Edad (E) en cuatro y siete niveles, respectivamente. Los cuatro niveles del primer factor fueron una mezcla con 100% CPC, a la que se denominó mezcla control (MC); una mezcla donde se sustituyó 15% de CPC por CV_{mx} , a la que se denominó mezcla binaria 1 (MB1); una mezcla donde se sustituyó 15% de CPC por CBC_{st} , a la que se denominó mezcla binaria 2 (MB2); y una mezcla en donde se sustituyó 30% de CPC por 15% de CV_{mx} y 15% de CBC_{st} , a la que se denominó mezcla ternaria (MT). Por cada tipo de mezcla se elaboraron 5 especímenes cilindros para cada edad de prueba, obteniendo un total de 140 especímenes.

Los siete niveles del segundo factor fueron 7, 14, 28, 56, 90, 180 y 365 días, las cuales corresponden a edades importantes en las cuales se puede evidenciar la ocurrencia de las reacciones de hidratación y la puzolánica entre el CP y las adiciones CV_{mx} y CBC_{st} . Además, se consideran edades relevantes desde el punto de vista práctico en la industria de la construcción, por ejemplo, 28 días es la edad que actualmente se utiliza para el diseño de mezclas de concreto, y 14 días se utiliza para el retiro de la cimbra en una estructura de concreto.

Las variables respuesta fueron la Resistencia a la Compresión (RC), la Velocidad de Pulso Ultrasónico (VPU) y la Resistividad Eléctrica (RE) las cuales fueron medidas en especímenes preparados con las cuatro mezclas de concreto descritas anteriormente. En la Tabla 8 se muestra un resumen de los factores y respuestas considerados en la presente investigación.

Tabla 8. Diseño experimental

Factores	Niveles	Variabes respuesta
Tipo de mezcla (TM)	MC = 100% CPC,	Resistencia a compresión (RE)
	MB1 = 85% CPC + 15% CV _{mx} ,	
	MB2 = 85% CPC + 15% CBC _{st} ,	Velocidad de pulso ultrasónico (VPU)
	MT = 70% CPC + 15% CV _{mx} + 15% CBC _{st}	
Edad de prueba (E)	7, 14, 28, 56, 90, 180 y 365 días	Resistividad eléctrica (RE)

3.3 Materiales

3.3.1 Descripción de los materiales

Se utilizó Cemento Portland compuesto (CPC) 30R de la empresa Holcim-Apasco- NMX-C-414-ONNCCE para todas las mezclas de concreto. Se empleó este tipo de cemento porque en previas investigaciones no se han observado interacciones negativas entre los compuestos del cemento y las puzolanas adicionadas (Arenas-Piedrahita et al., 2016, Ríos-Parada et al., 2017, Maldonado-García et al., 2018, y Franco-Luján et al., 2019), además de su alta disponibilidad en la mayoría de los estados de la república mexicana.

La CV_{mx} se obtuvo de una planta carboeléctrica ubicada en Nava Coahuila, México, mientras que la CBC_{st} es un subproducto de residuo agrícola producida en el Ingenio azucarero Constanza de Tezonapa, Veracruz, México; ambas cenizas fueron cribadas por la malla No. 200 ASTM (75 µm) a fin de reducir variaciones importantes en los resultados.

Para la elaboración de las mezclas de concreto se utilizó arena de río como agregado fino puesto que es la opción más común y menos costosa en la región de Oaxaca, México, y piedra caliza triturada como agregado grueso, el cual es también comúnmente utilizado en la región. El tamaño máximo del agregado grueso fue de 19 mm. Los agregados utilizados cumplieron con los requerimientos establecidos en la norma ASTM C-33.

Se utilizó un aditivo reductor de agua de alto rango hiperfluidificante, de la marca PLASTOL PRECAST PLUS, “formulado a base policarboxilatos y diseñado para dar alta fluidez y reducción de agua de alto rango” estandarizado bajo la norma ASTM C 494. Además, se empleó agua bidestilada para elaborar todas las mezclas de concretos a fin de evitar la presencia de sustancias ajenas que pudieran afectar sus propiedades.

3.3.2 Características y propiedades de los materiales

3.3.2.1 Composición química

Previo al análisis químico de los materiales cementantes y puzolánicos, se determinó las (Perdidas por ignición) PPI de acuerdo con la norma ASTM C-114. Posteriormente, se obtuvieron las composiciones químicas de la CV_{mx}, CBC_{st} y CPC, a través de la técnica de fluorescencia de rayos X con un espectrómetro Panalytical Epsilon-XL. La norma ASTM C-618 establece que, para las puzolanas de Clase N y F, el valor mínimo de la suma de SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ (óxidos mayores)

debe ser $\geq 70\%$; y para la clase C de las puzolanas superior al 50%. La composición química de los materiales en polvo empleados en esta investigación se presenta en la Tabla 9.

Tabla 9. Composición química del cemento y puzolanas utilizadas

Compuesto	ASTM C-618			CV _{mx}	CV comercial	CBC _{st}	CPC
	10	6	6				
	N						
<u>SiO₂</u>				77.425	64.45	66.12	20.67
<u>Al₂O₃</u>				13.149	24.83	15.00	4.87
<u>Fe₂O₃</u>				2.580	4.67	7.16	3.57
CaO				0.920	1.68	2.57	60.03
MgO				0.299	0.60	1.19	1.50
Na ₂ O				1.561	0.43	0.54	0.52
K ₂ O				0.757	1.04	3.52	0.85
TiO ₂				0.611	1.08	1.13	0.58
P ₂ O ₅				0	0.15	1.14	0.19
MnO				0.007	0.02	0.22	0.08
SO ₃				0.156	0.39	0.26	4.95
Perdida por ignición	10	6	6	2.38	2.98	9.00	8.40

Fuente: Elaboración propia

Con los valores anteriores, se cubren los requerimientos químicos que establece la norma ASTM C-618 para que la CV_{mx} pueda ser considerada con potencial puzolánico.

La suma de óxidos mayores para la CBC_{st} es de 88.28%, por lo cual se considera que tiene potencial puzolánico. Tiene un contenido de CaO de 2.57% y un porcentaje de PPI de 9, el cual es mayor que el recomendado en la norma ASTM C-618, probablemente por una inadecuada combustión ocasionada por un suministro insuficiente de oxígeno (Cordeiro et. al. 2009). Sin embargo, de acuerdo con la misma norma, el material puede contener hasta 12.0% de PPI y ser aceptado por el usuario si se dispone de algún registro o resultados de pruebas de laboratorio que demuestren un comportamiento aceptable.

Para tal efecto, Hernández-Toledo (2010), de acuerdo con la ASTM C-311, determinó el índice de actividad resistente (IAR) para la misma CBC_{st}, reportó valores de 84 y 92% a las edades de 7 y 28 días, respectivamente; superando el 75% que indica la ASTM C-618. Por lo tanto, se confirma el potencial puzolánico de la CBC_{st} y puede utilizarse en mezclas de concreto hidráulico. Con estos resultados se podría clasificar a esta ceniza como una puzolana clase N.

Es importante mencionar que la composición química de la CBC_{st} “es muy variable debido a que depende del suelo donde crece la caña de azúcar. La mayor parte de la ceniza viene de minerales singenéticos, es decir, minerales que se encuentran dentro del tejido de la planta antes de la quema, reflejando la composición mineralógica del suelo en el cual creció la planta. La composición química de la ceniza no se altera por el proceso de combustión, y la fase mayoritaria es sílice cristalina” (Teixeira S. R. et al., 2010).

Si bien, el valor de PPI de la CBC_{st} fue alto, según los límites permisibles de la norma y podría afectar algunas propiedades de los concretos, se decidió utilizar esta ceniza debido a que en trabajos previos no se han reportado afectaciones importantes en dichas propiedades (Jiménez-

Quero, et al., 2013, Arenas-Piedrahita et al., 2016, Ríos-Parada et al., 2017, Maldonado-García et al., 2018 & Franco-Luján et al., 2019).

Con respecto a la composición química del cemento, la suma de óxidos mayores $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{FeO}_3 + \text{CaO}$ es de 89.14% está en el rango de 50 - 90% establecido en la NMX-C-414-ONNCCE-2004, no obstante, las PPI (8.40%) rebasan los valores máximos permisibles (5%).

3.3.2.2 Fases minerales

La identificación de las fases minerales del CPC, CV_{mx} y CBC_{st} se obtuvo a través de la técnica de DRX. El equipo empleado fue un difractómetro Empyrean®, operado a un voltaje de 45kV y corriente de 40 mA, de 5 a 70° (2-Theta), una velocidad de escaneo de 0.5 s en incrementos de 0.026°. La composición mineralógica de la ceniza volante, dependerá de factores geológicos relacionados con la formación y disposición de carbón, así como de la temperatura de calcinación, las cuales pueden ser determinadas mediante este análisis.

El patrón de la DRX de la CV_{mx} (Figura 13) se aprecia un halo amorfo entre los ángulos 15 a 30° (2θ); característica del silicoaluminato vítreo. El cuarzo y la mulita “son componentes relativamente inertes que se encuentran embebidos en una fase vítrea de reacción lenta, rica en hierro y sílice” (Santaella, 2001), por lo que se espera que la CV_{mx} tenga una reacción lenta y los efectos que tenga en las propiedades de los concretos sean evidentes a edades tardías.

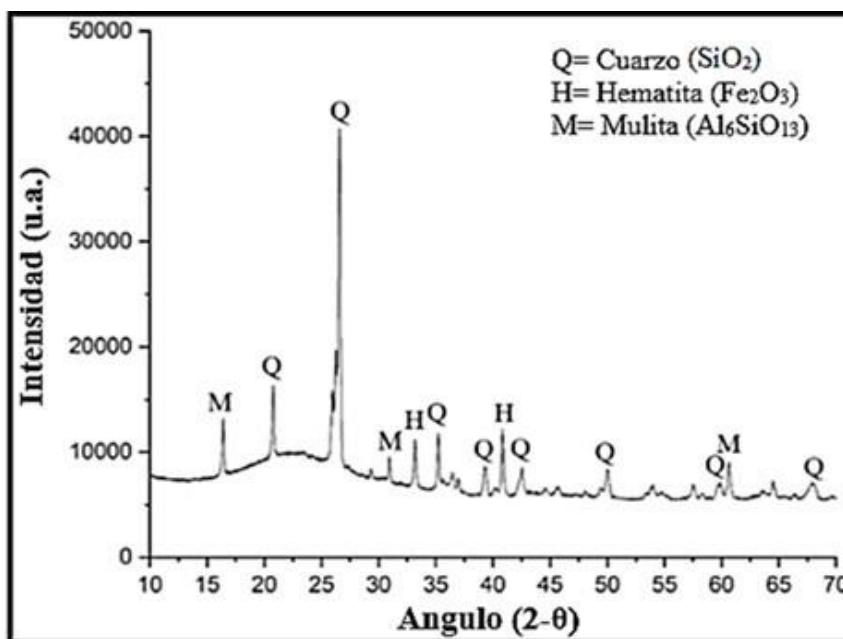


Figura 13. Difractograma de ceniza volante mexicana (CV_{mx})

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 14 se presenta el patrón de difracción de la CBC_{st} . “Es evidente una reflexión muy definida cerca del ángulo 30° (2θ) de la fase cristalina albita y reflexiones con menor intensidad correspondiente a las fases cristalinas de cuarzo y anortoclasa. Se observa además un halo localizado entre los ángulos 15° a 30° (2θ)”, cuyos valores ya han sido reportados por otros autores (Cordeiro et al., 2009; Jagadesh, et al., 2015; Ríos-Parada et al., 2017 & Maldonado-García et al., 2018) lo que indica la presencia de materiales amorfos o vítreos en las cenizas, es decir,

sílice amorfa, la cual puede reaccionar. En caso contrario se encontraría en forma vítrea o cristalina y no reaccionaría. Cuanto mayor sílice amorfa se presente en la CBC, mayor será la actividad puzolánica, contribuyendo significativamente a la matriz cementante, que cuando entra en contacto con el (Ca (OH)₂) forma nuevos compuestos de C-S-H y con ello logra un efecto positivo en las propiedades mecánicas de los concretos a edades tempranas.

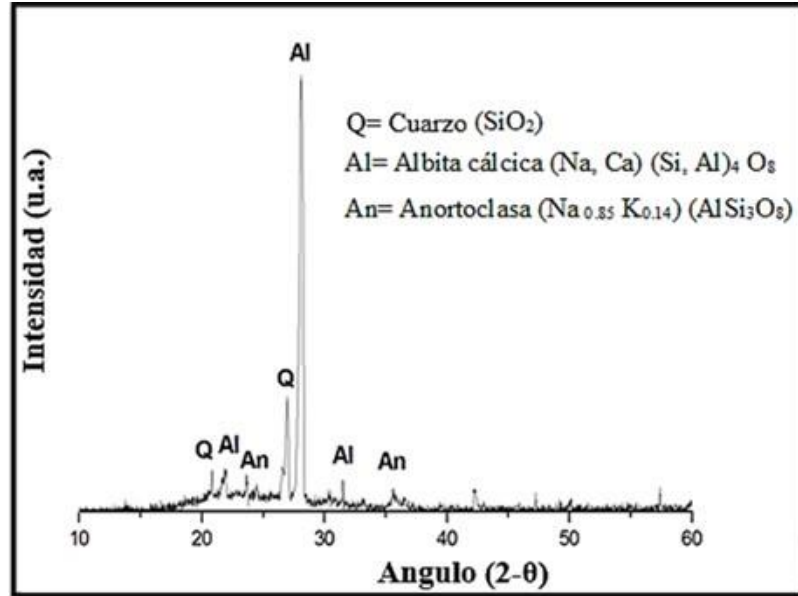


Figura 14. Difractograma de ceniza de bagazo de caña sin tratar (CBC_{st})

Fuente: Elaboración propia

En el patrón de DRX de la Figura 15 se muestran los resultados para el CPC. Se observan, como fases predominantes y con mayor intensidad el silicato tricálcico (C₃S), silicato dicálcico (C₂S) y con en menor intensidad, fases de aluminato tricálcico (C₃A), ferroaluminato de tetracálcico (C₄AF), óxido de calcio (C), carbonato de calcio (CaCO₃) y yeso (Y).

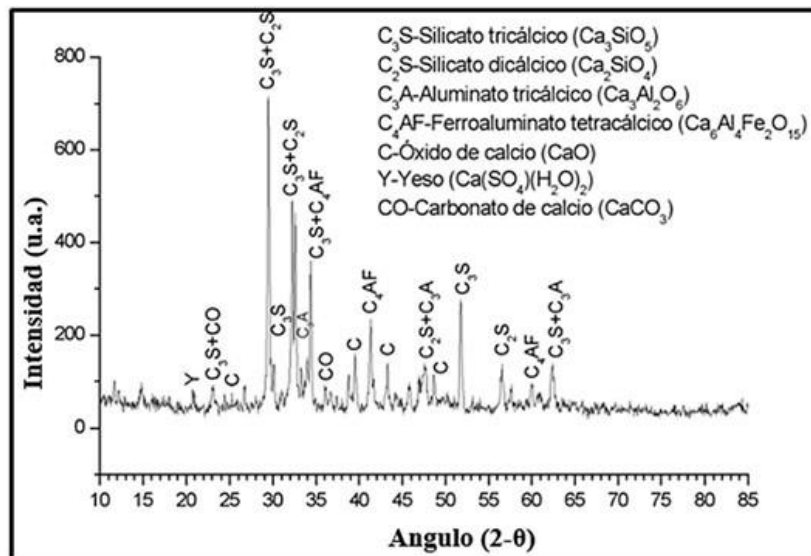


Figura 15. Difractograma del Cemento Portland compuesto

Fuente: Elaboración propia

Las fases predominantes conforman cerca del 70 al 80% de los componentes del cemento Portland (Ramachandran y Beaudoin, 2001) y favorecen la formación de productos cementantes tales como el silicato hidratado de calcio (C-S-H) e hidróxido de calcio (CH) durante el proceso de hidratación. El CP hidratado “contiene del 15 al 25% de hidróxido de calcio y aproximadamente 50% de silicato hidratado de calcio, al que se le debe la resistencia al concreto” (PCA, 2004). La presencia de yeso se encuentra de un 4 al 6% (PCA, 2004), controlando la hidratación del C_3A para controlar el fraguado del cemento y este no ocurra rápidamente y para mejorar la contracción (retracción) y desarrollo de la RC, corroborándose en el difractograma de la figura 14, cuya fase de yeso se encuentra con muy baja intensidad.

Las fases de aluminato tricálcico y ferroaluminato tetracálcico tienen señales más débiles, ya que los contenidos de éstas en el CPC se encuentran en los rangos de 4 a 11% y de 8 a 13%, respectivamente (Ramachandran y Beaudoin, 2001); estos “influyen en las reacciones tempranas de hidratación, el aluminato tricálcico contribuye a la liberación de calor durante los primeros días de hidratación y favorece (aunque en menor medida) al desarrollo de la resistencia temprana”. Los difractogramas obtenidos para el CPC son congruentes con lo reportado en otras investigaciones (Flores 2009, Jadhav et. al. 2011).

3.3.2.3 Distribución de tamaños de partículas

En la Figura 16 y 17 se pueden comparar los resultados de las distribuciones acumuladas y de la distribución normal de las densidades de los tres materiales CPC, CV_{mx} , y CBC_{st} .

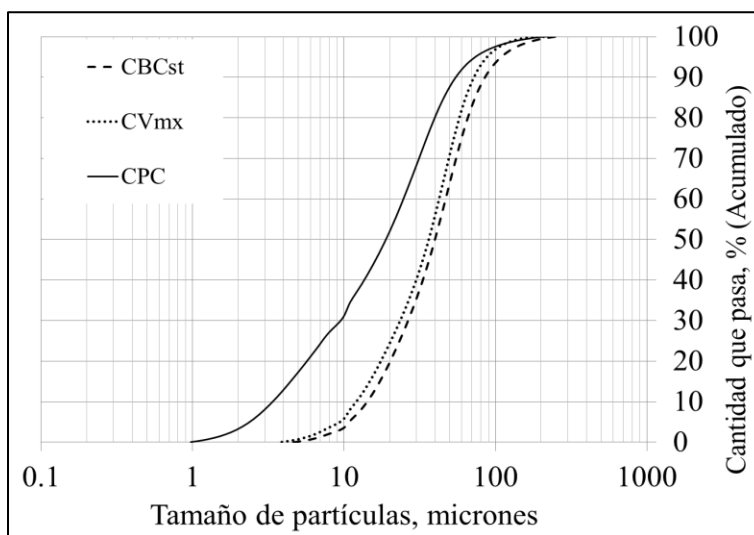


Figura 16. Cantidad acumulada de las partículas de CPC, CV_{mx} y CBC_{st}

Fuente: Maldonado-García et al., 2018

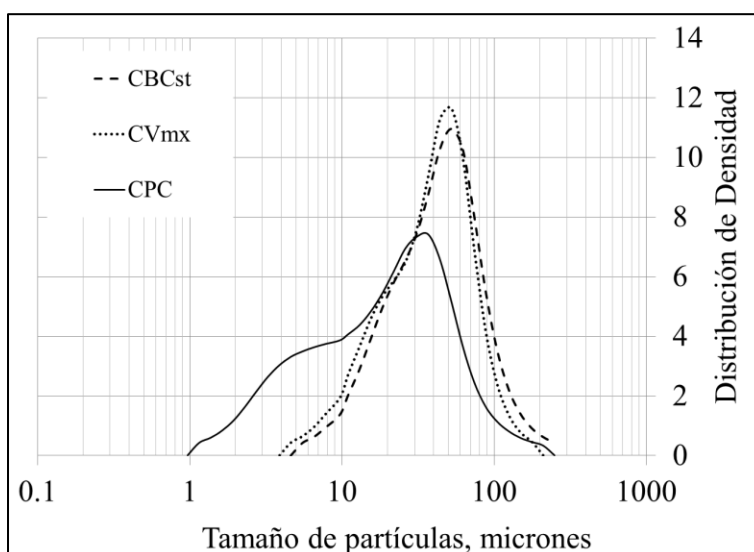


Figura 17. Distribución de la densidad de las partículas de CPC, CV_{mx} y CBC_{st}

Fuente: Maldonado-García et al., 2018

El promedio de los diámetros de las partículas fue 22 μm -CPC, 44.5 μm -CV_{mx} y 45 μm -CBC_{st}, distribuidas en un rango entre 1.156-209.0 μm para el CPC y de 4.62-176 μm para la CV_{mx} y CBC_{st}. Es bien sabido que el tamaño de las partículas tiene un efecto significativo en la actividad puzolánica de las cenizas; es decir, a menores tamaños de partículas, mayor área superficial y mayor reactividad puzolánica, densificando la matriz cementante del concreto (Kosmatka, 2011).

Las curvas granulométricas representan los porcentajes acumulados de material que pasa por las diferentes mallas y expresado en forma logarítmica. Se observa que la CV_{mx} y CBC_{st} presentan una distribución de tamaños de partículas entre 4.62-176 μm , y el CPC en el rango de 1.38-88 μm . De tal manera que el rango de tamaños de las partículas de las cenizas es mayor que el del CPC.

Las partículas de cemento se encuentran estandarizadas entre 2 y 150 μm cuyas partículas más activas son aquellas comprendidas entre 3 y 30 μm “las cuales reaccionan a mayor velocidad, mientras que las partículas superiores a 60 μm son prácticamente inertes, con una velocidad de reacción extremadamente lenta” (Carona, 2014). Sin embargo, una de las implicaciones de las partículas de cemento es que son demasiadas finas y reaccionan rápidamente ocasionando excesivo calor de hidratación durante la evolución y se pueda generar expansión en el concreto, ocasionando agrietamiento y otros problemas.

En general, las partículas con tamaños mayores que 45 μm son difíciles de hidratar y mayores que 75 μm no pueden hidratarse completamente. Las cenizas en estudio muestran una distribución uniforme, ambas la CV_{mx}, y la CBC_{st} tiene una distribución relativa (densidades) entre 3.89 y 31.1 μm para el CPC, y dos similares de CV_{mx}, y CBC_{st}

German en 1994, reportó que este tipo de distribuciones habitualmente se obtienen cuando el material ha sido tamizado; y en esta investigación ambas cenizas fueron cribadas por la malla No. 200 (75 μm); por ello al comparar entre 4.62-176 μm .

3.3.2.4 Morfología por Microscopia Electrónica de Barrido (MEB)

Se empleó esta técnica con el fin de determinar la forma, el tamaño y las características de la superficie de las partículas de la CV_{mx} , CBC_{st} y CP. En la micrografía de la CV_{mx} (Figura 18), se observa mayormente partículas esféricas sólidas, seguidas de partículas de formas irregulares, aglomeradas o esponjosas. También se observa la presencia de plerosferas (esferas rellenas de otras esferas de menor tamaño) y se infiere que existen cenosferas (esferas completamente vacías) esto con base en otras investigaciones. La literatura reporta que esta morfología es típica para la CV y que la presencia de cenosferas y plerosferas es común (Ramachandran y Beaudoin, 2000).

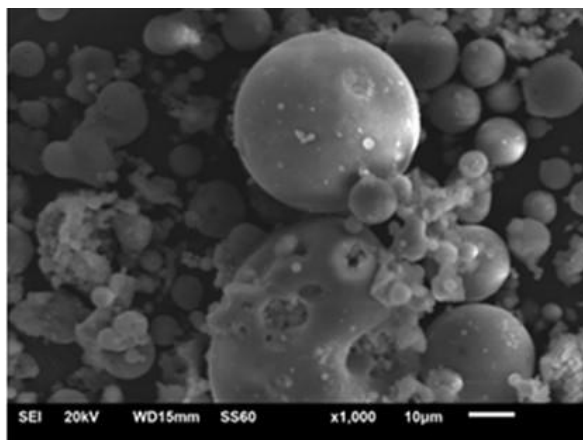


Figura 18. Micrografía de la CV_{mx} .

Fuente. Elaboración propia.

La CBC_{st} presenta una mezcla de partículas heterogéneas de diferentes formas y tamaños principalmente predominan tres tipos de partículas: sólidas prismáticas, celulares porosas y largas placas cilíndricas porosas (Figura 19). En general, la morfología de la CBC está asociada con el proceso y la temperatura de quemado de bagazo, según lo reportado por varios investigadores (Cordeiro et al., 2008; Chusilp et al., 2009 y Faria et al., 2012). Morfologías muy similares para la CBC_{st} han sido reportadas en diferentes investigaciones por otros autores (Jiménez-Quero, et al., 2013; Ríos-Parada et al., 2017; Maldonado-García et al., 2018 & Franco-Luján et al., 2019).

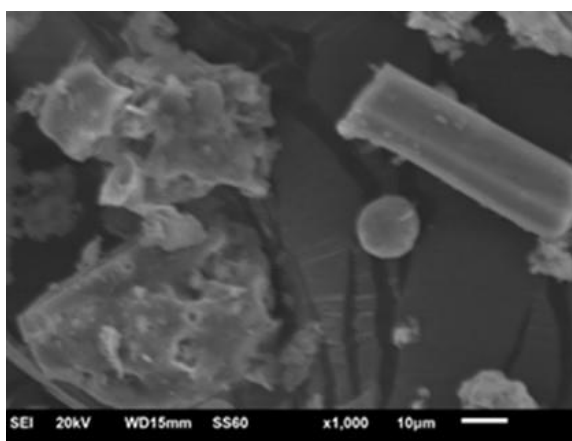


Figura 19. Micrografía de la CBC_{st}

Fuente: Elaboración propia

Se ha reportado que el carbón sin quemar rara vez aparece aislado, sino que se encuentra en forma de partículas esféricas, angulosas, porosas y estratificadas pegadas o soldadas a las cenizas, o como núcleo de estas. Al mismo tiempo, resulta perjudicial para la actividad puzolánica, y por lo tanto para la resistencia de los concretos con este tipo de adiciones por varias razones. Una de ellas es que el carbón se adhiere a las partículas de las CV y CBC y cubre su superficie, reduciéndola y disminuyendo su reactividad, otra razón se relaciona a que la eficacia de las cenizas como puzolana se reduce debido a la consecuente disminución de óxidos principales, tales como dióxido de sílice, aluminio y de hierro debido a la presencia de carbón (Santaella, 2001).

En el CPC se observan placas (u hojuelas) angulares de diversos tamaños (Figura 20) resultantes de la pulverización del clínquer durante la molienda (Kosmatka et al., 2004). Los resultados indican la presencia de mayores concentraciones de CaO, SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃; compuestos que conforman las principales fases minerales de un CP (Mehta y Monteiro, 2006).

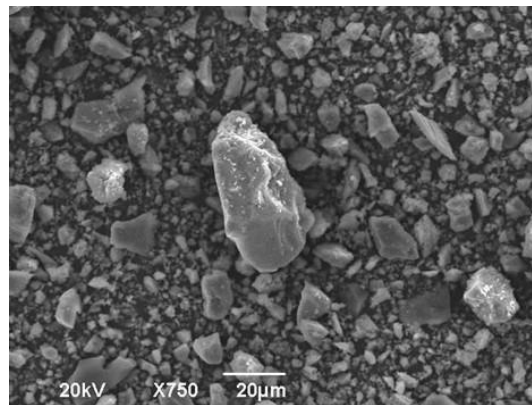


Figura 20. Micrografía de CPC

Fuente: Elaboración propia

3.3.2.5 Granulometría de los agregados pétreos

En las figuras 19 y 20 se muestran las curvas granulométricas obtenidas para la arena y grava, respectivamente. Los tamaños de los agregados cumplen con las recomendaciones estipuladas en la norma ASTM C-33 para la elaboración de concretos.

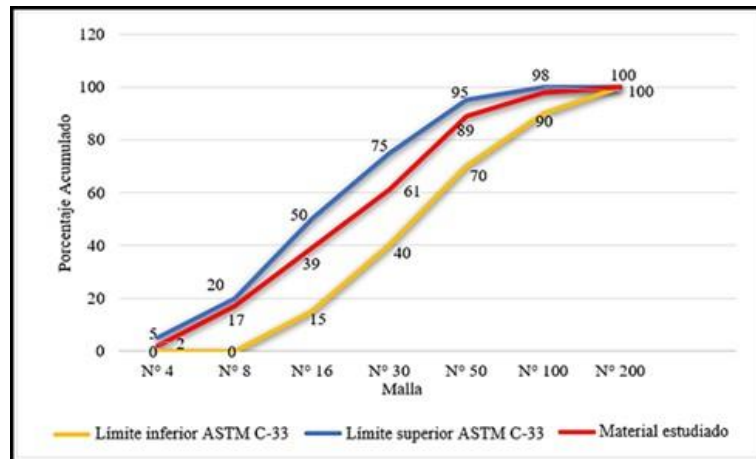


Figura 21. Curva granulométrica de la arena

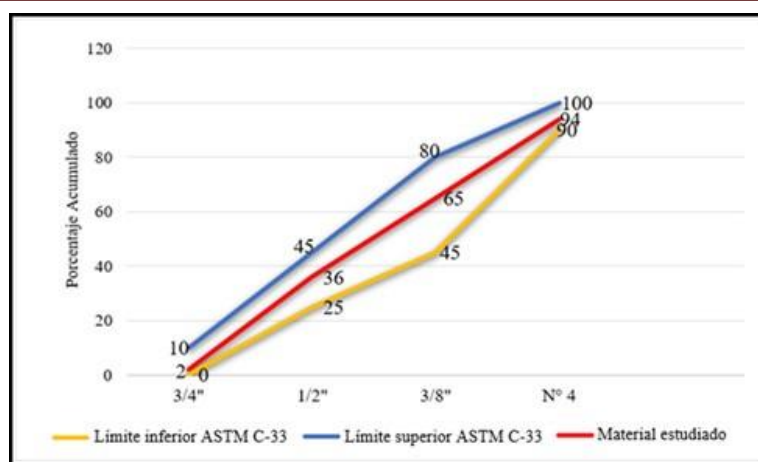


Figura 22. Curva granulométrica de la grava

3.3.3 Otras propiedades físicas de los materiales

La obtención de las densidades del CPC, la CV_{mx} y CBC_{st} se llevó a cabo bajo el procedimiento descrito por la norma ASTM C-188. Para este ensayo se usó un frasco de Le Chatelier y keroseno (libre de agua) con una densidad de 0.73 g/ml, la prueba se realizó a $23 \pm 2^\circ\text{C}$. Posteriormente, se calcularon las gravedades específicas (GE) de todos los materiales y se obtuvieron el PVSC, PVSS, GE, % de absorción, MF y TMA de los materiales pétreos (Tabla 10).

Tabla 10. Resumen de las propiedades de los agregados pétreos

MATERIAL	PVSC (kg/ m ³)	PVSS (kg/ m ³)	G.E.	ABS %	M.F	TMA
CPC			2.9			
CV_{mx}			2.09			
CBC_{st}			2.20			
Arena	1705	1603	2.76	1.04	3.4	
Grava	1666	1521	2.54	0.70		3/4"
Rango establecido / ASTM-	1200- 1750 C-29	1200- 1750 C-29	2.4 -2.9 C-127	0.2-2 A/0.2-4 G C-128	2.3-3.1 C-33	

PVSC= Peso volumétrico seco compacto, PVSS= Peso volumétrico seco suelto,
GE= Gravedad específica, ABS= Absorción, MF= Modulo de finura, TA= Tamaño máximo

3.3.4 Índice de actividad resistente

Se determinó el IAR de la CV_{mx} y CBC_{st} , cumpliendo con los estándares de la ASTM C-109 y ASTM C-31. En la Tabla 11 se presentan los resultados de los IAR para la CV_{mx} y para la CBC_{st} Con la finalidad de conocer la evolución de los índices.

Tabla 11. Resultado de las pruebas del IAR para la CV_{mx} y CBC_{st}

Mezcla	Índice de Actividad Resistente (%)		
	7 días	14 días	28 días
CV_{mx}	66.9	101.6	119.2
CBC_{st}	86.1	103.6	112.8

En los resultados de los IAR de las cenizas evaluadas se observa una tendencia de incremento con la edad. El valor del IAR para la CV_{mx} es menor que para CBC_{st} a 7 días; no obstante, a 14 y 28 días los valores son similares. Dichos resultados son congruentes con el análisis químico para la CV_{mx} donde se asume que este material tiene potencial puzolánico con base en la suma de los óxidos mayores ($SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$) la cual fue mayor al 70%. Los resultados del IAR también confirman que la CBC_{st} es altamente puzolánica, a pesar del alto contenido de PPI. El cribado mecánico al que se sometieron las cenizas mejoró sus propiedades puzolánicas sin la necesidad de emplear un postratamiento adicional de alta demanda energética, como la calcinación o molienda.

3.4 Métodos

3.4.1 Diseño y elaboración de las mezclas de concreto

Se diseñaron cuatro mezclas de concreto de acuerdo con el método de volúmenes absolutos del ACI 211; una mezcla control (MC) con 100% de CPC, una mezcla binaria con 85% CPC más 15% de CV_{mx} (MB1), una mezcla binaria con 85% CPC más 15 % de CBC_{st} (MB2), y una mezcla ternaria (MT) con 70% CPC más 15% CV_{mx} y 15% CBC_{st} . Las mezclas se diseñaron para una RC de 25 MPa a 28 días, revenimiento de 75 ± 20 mm y una relación agua/material cementante de 0.50.

Se realizaron pruebas preliminares y todas las mezclas experimentaron problemas de trabajabilidad, puesto que no cumplieron con el revenimiento de diseño; por lo tanto, fue necesario incorporar un aditivo superplastificante, el cual se adicionó en diferentes cantidades para cada una de las mezclas hasta alcanzar el revenimiento de diseño sin afectar la relación agua/material cementante. En la Tabla 12 se muestran las proporciones finales de cada mezcla.

Tabla 12. Proporciones de las mezclas de concreto por m^3

Mezcla	Nomenclatura	CPC (kg)	CV_{mx} (kg)	CBC_{st} (kg)	Arena (kg)	Grava (kg)	Agua (L)	Aditivo SP (L)
Control	MC	404	0	0	728.8	993.7	212.9	0.89
Binaria 1	MB1	343.4	60.6	0	730.9	993.7	212.9	1.05
Binaria 2	MB2	343.4	0	60.6	730.9	993.7	212.9	2.23
Ternaria	MT	282.8	60.6	60.6	730.9	993.7	212.9	2.82

CPC= Cemento Portland compuesto, CV_{mx} = Ceniza volante mexicana,
 CBC_{st} = Ceniza de bagazo de caña sin tratar y SP= Aditivo superplastificante

Las mezclas se prepararon en el Laboratorio de Materiales para la Construcción del CIIDIR Oaxaca, en las condiciones requeridas para el cumplimiento de los estándares de las pruebas seleccionadas. Se utilizó una revolvedora eléctrica con capacidad de medio saco de cemento para el mezclado mediante el procedimiento descrito por la norma ASTM-C-192.

3.4.2 Caracterización de los concretos en estado fresco

Se llevaron a cabo las pruebas de revenimiento (ASTM C-143), peso volumétrico (ASTM C-138), contenido de aire (ASTM C-231) y temperatura (ASTM C- 1064) en estado fresco de acuerdo con la normatividad indicada para todas las mezclas. Figura 23.



Figura 23. Secuencia de caracterización de las mezclas de concreto en estado fresco

En la Tabla 13 se presentan los resultados de las pruebas en estado fresco para las cuatro mezclas. Estos valores se obtuvieron después del mezclado para analizar el efecto de las cenizas.

Tabla 13. Resultados de las pruebas en estado fresco de los concretos estudiados

Mezcla	Revenimiento (mm)	Temperatura (°C)	Peso volumétrico (kg/m ³)	Contenido de aire (%)
MC	58	20.4	2265	2.1
MB1	78	20.6	2246	1.9
MB2	35	20.0	2230	2.1
MT	66	20.8	2218	2.0

Los valores de revenimiento obtenidos estuvieron dentro de los límites establecidos en el diseño de mezclas para garantizar una mezcla trabajable. No obstante, a medida que se incrementó la cantidad de sustitución de CPC por cenizas y con ello la cantidad de superplastificante (SP) para mantener constante la relación a/c de 0.50. Bajo esta condición las cantidades de aditivo SP en MB1, MB2 y MT se incrementaron en 18%, 150% y 216%, respectivamente con respecto al control. Se esperaba que la CV_{mx} , mejorara la trabajabilidad de la mezcla, por la forma esférica de algunas de sus partículas, puesto que actuaría como lubricante entre las partículas de cemento (Ramachandran y Beaudoin, 2001); sin embargo, la adición de CV_{mx} afectó negativamente el revenimiento probablemente por el mayor tamaño de sus partículas.

La CBC_{st} afectó negativamente la trabajabilidad de las mezclas, lo cual fue previsto en el análisis químico que indicó un alto contenido de PPI de esta ceniza, demandando una mayor cantidad de aditivo SP. Es sabido que las partículas de CBC_{st} muestran una gran variedad de formas (partículas prismáticas, tubulares, aglomeradas e irregulares) y tamaños, con superficies rugosas, altas porosidades observadas en la micrografía y por el rango promedio de la distribución de tamaño de partícula que oscila en los 75 μm lo cual también afecta negativamente las propiedades de las mezclas en estado fresco, tal como se ha reportado en distintas investigaciones (Arenas-Piedrahita 2013, Maldonado-García et al., 2018).

Se aprecia que las temperaturas y contenidos de aire atrapado en la matriz cementante de las mezclas fueron similares con valores que oscilaron entre 20°C y 2% (± 1), respectivamente. Los porcentajes obtenidos están dentro del rango establecido en la norma ASTM C-1077; valores válidos para mezclas de concreto fresco sin aire incluido (Kosmatka et al., 2011).

Los pesos volumétricos de los concretos fueron diferentes para cada mezcla. Esto se relaciona directamente con las densidades de los materiales en polvo; debido a que la densidad del CPC es mayor a la de la CV_{mx} y CBC_{st} , era de esperarse que presentarían una reducción en su PV.

3.4.3 Elaboración de especímenes

Se colaron 128 especímenes cilíndricos, 32 por cada una de las cuatro mezclas de concreto, según los requerimientos de la norma ASTM C-192. Durante el procedimiento los cilindros se llenaron en dos capas, cada capa se vibró en una mesa vibratoria, y después se enrasaron para obtener superficies lisas. Inmediatamente se cubrieron los cilindros con una membrana plástica por 24 horas para evitar la evaporación del agua. Posteriormente, los especímenes se desmoldaron, y se registraron las dimensiones y peso de cada uno. Finalmente se rotularon y se sumergieron a una solución saturada de hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) hasta las fechas de los ensayos tal como se observa en la Figura 24 (Con base en los estándares de la ASTM C-31 respectivamente).



Figura 24. Elaboración y curado de especímenes

3.4.4 Caracterización de los concretos en estado endurecido

3.4.4.1 Resistencia a la compresión (RC) ASTM C-39

Se ensayaron 5 cilindros de cada mezcla a compresión a 7, 14, 28, 56, 90, 180 y 365 días, respectivamente, de acuerdo con el procedimiento descrito en la norma ASTM C-39. Los especímenes se ensayaron en condición saturada superficialmente seca, y previamente fueron lijadas sus bases para lograr una superficie de contacto uniforme con las platinas de la prensa. Puesto que la prueba de resistencia a la compresión es una prueba destructiva (Figura 24) solo se obtuvo una lectura por cada cilindro ensayado.



Figura 25. Arreglo para la realización de la prueba de RC

3.4.4.2 Velocidad de pulso ultrasónico (VPU)ASTM C-597

Se ensayaron 5 cilindros de cada mezcla para obtener la VPU a 7, 14, 28, 56, 90,180 y 365 días de edad, respectivamente, utilizando un equipo PUNDIT® (Figura 26) de acuerdo con la norma ASTM C-597. Se tomaron tres lecturas por cada cilindro en puntos específicos de medición al extremo de cada área superficial, y antes de cada prueba se colocó en ambos lados del cilindro una ligera capa de vaselina a fin de obtener resultados más significativos de cada cilindro y de acuerdo con otros trabajos que ya han sido reportados en la literatura.



Figura 26. Arreglo para la medición de la VPU utilizando el equipo PUNDIT

3.4.4.3 Resistividad eléctrica (RE) AASHTO T 358

Se ensayaron 5, 5, 5, 4, 5, y 3 cilindros de cada mezcla para obtener su resistividad eléctrica a 7, 14, 28, 56, 90,180 y 365 días de edad, respectivamente, con un resistímetro superficial de la marca Resipod proceq®, modelo 38 mm (1.5”) en conformidad con la especificación del método de prueba de resistividad superficial AASHTO T 358. Este equipo cuenta con una sonda Wenner de cuatro puntos, la cual se calibra al obtener 12 y 90 k Ω -cm con la cinta de prueba, de acuerdo con las instrucciones del manual de operación del equipo. Se tomaron ocho lecturas alrededor de cada cilindro cuando los cilindros se encontraban en condición saturada superficialmente seca, y se mantuvo una temperatura ambiente constante en todas las edades de prueba (Figura 27).



Figura 27. Prueba de Resistividad Eléctrica en concretos y equipo Resipod

3.4.5 Metodología para el análisis de los resultados

Los datos experimentales de RC, VPU y RE se evaluaron de forma descriptiva, estadística y fenomenológica. El análisis descriptivo identifica de manera general las principales tendencias de los datos. Mientras que el análisis estadístico se realizó mediante el análisis de varianza (ANOVA) y comparaciones múltiples (Post Hoc) mediante pruebas de subconjuntos homogéneos de

diferencia significativa honesta (HSD) de Tukey, para identificar diferencias significativas. El análisis estadístico se llevó a cabo utilizando el software SPSS con un intervalo de confianza de 95%. Finalmente, el análisis fenomenológico explica el efecto de las adiciones minerales en las propiedades de los concretos en estudio, y los contrasta con resultados de la literatura.

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

A continuación, se analizan y discuten los resultados obtenidos de las pruebas de RC, VPU y RE de las mezclas en estudio, además, se establecen las correlaciones existentes entre los resultados de estas pruebas.

4.1 Resistencia a la compresión

En la Figura 28 se muestran el resumen de los resultados de las RC's de las mezclas en estudio a las edades de 7, 14, 28, 56, 90, 180 y 365 días. En general, los resultados corroboran que la RC de los concretos incrementa gradualmente con la edad (Metha et al., 1998; Kosmatka et al., 2004 & Hemalatha y Ramaswamy, 2017). A 28 días la MC alcanzó la resistencia de diseño lo cual indica que los ingredientes de las mezclas fueron dosificados adecuadamente y los especímenes preparados cuidadosamente.

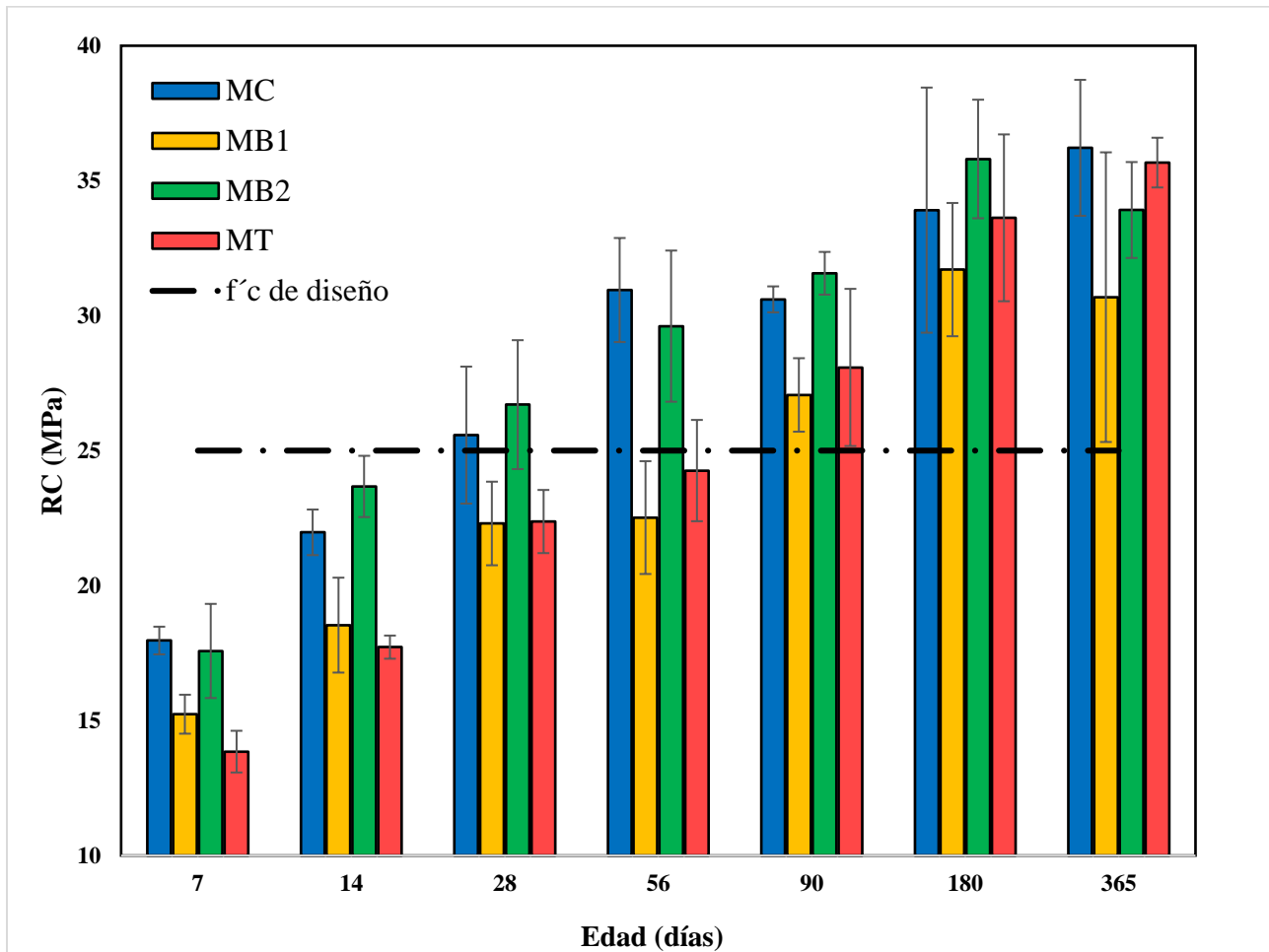


Figura 28. Resumen de los resultados de RC de los concretos en estudio

En la Tabla 14 se muestran los resultados del ANOVA efectuado a los datos de RC para las mezclas estudiadas. De acuerdo con los resultados, los efectos de los factores Edad (E) y Tipo de Mezcla (TM) son estadísticamente significativos ($p < 0.05$). Esto indica que la resistencia incrementa significativamente con la edad de prueba y que el reemplazo parcial de CPC por cenizas afecta la RC de las mezclas de concreto. Los resultados del ANOVA también muestran que el efecto interactivo entre E y TM es estadísticamente significativo ($p = 0.019$); es decir, la tendencia de incremento o decremento del valor de la RC causado por la adición de cenizas es diferente con la edad para cada mezcla.

Tabla 14. Resumen de los resultados del ANOVA efectuado a los datos de RC

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	5446.824 ^a	27	201.734	44.200	.000
Intersección	86385.904	1	86385.904	18926.967	.000
TM	452.649	3	150.883	33.058	.000
E	4793.868	6	798.978	175.054	.000
TM * E	160.960	18	8.942	1.959	.019
Error	456.417	100	4.564		
Total	91397.467	128			
Total corregido	5903.241	127			

a. R al cuadrado = .923 (R al cuadrado ajustada = .902)

Los resultados de las pruebas Post hoc de subconjuntos homogéneos de los concretos según la E y el TM (Anexos 2 y 3), demuestran que la resistencia incrementa significativamente hasta los 56 días; no obstante, a las edades de 180 y 365 días permanecen sin cambios significativos. Además, se corrobora que la adición de 15% CV_{mx} afecta negativamente la RC del concreto ($p < 0.05$), mientras que la adición de 15% CBC_{st} no afecta negativamente la RC con valores similares a la MC en todas las edades ($p = 0.898$). Finalmente, los resultados indican que la adición de la combinación de 15% $CV_{mx} + 15\% CBC_{st}$ afecta negativamente la RC ($p < 0.05$), no obstante, al término del periodo de prueba su RC no difiere estadísticamente de la MC y de las MB1 y MB2.

De acuerdo con los resultados de DRX, la CV_{mx} está conformada principalmente por cuarzo (SiO_2) y mulita ($Al_2Si_7O_{4.85}$), componentes relativamente inertes que “se encuentran embebidos en una fase vítrea de reacción lenta, rica en hierro y sílice, retardando la formación de silicato hidratado de calcio (C-S-H) en el concreto, y desarrollando una mayor RC a edades tardías como fue el caso de la MB1” (Santaella-Valencia, 2001). Algunos investigadores reportan que la CV requiere periodos de 90 días o más para incrementar la RC (Toutanji 2004 & Ashraf et al., 2009).

Según Cabrera y Plowman (1980), “el aumento de resistencia a edades tardías en concretos con CV se debe a la influencia ejercida por la ceniza sobre el C_3A y C_4AF ”, puesto que un retardo en la hidratación de estos compuestos reduce el calor liberado y estimula la formación de mayor contenido de C-S-H, congruente con los resultados de Huang et al., (2008), quienes indican que “al sustituir 20% de cemento Portland por CV en mezclas de concreto con relaciones a/c de 0.50, 0.35 y 0.31 la RC de 0 a 28 días es menor con respecto a la MC”. Esto explica el comportamiento de la MB1 a edades tempranas y como el incremento de su RC requirió de un tiempo prolongado.

Por una parte, la CV_{mx} mostró un IAR de 119.2%, mayor a lo establecido por la norma ASTM- C-618 (\geq a 75%), por otra parte, el porcentaje de PPI de la CV_{mx} fue menor a lo reportado para la CV, por lo que se esperaba que la MB1 alcanzara una resistencia similar a la MC a 90 días. Sin embargo, el incremento se aprecia a partir de 180 días, alcanzando valores similares a la MC, lo que indica que probablemente se densificó la matriz cementante, mediante la reacción de la sílice de la CV con la solución de poro. Esto demuestra el potencial puzolánico de esta ceniza con un cribado previo a través de la malla #200 por cuatro minutos, reduciendo significativamente las impurezas y mejorando su desempeño.

La MB2 (adicionada con 15% CBC_{st}) presentó una tendencia similar a la MC en todas las edades de acuerdo con los resultados de las pruebas Post hoc. Hay dos razones principales: (a) el alto contenido de sílice amorfa en la CBC_{st} (identificada en el análisis por DRX) promovió la reactividad puzolánica contribuyendo significativamente a la matriz cementante, formando nuevos productos de C-S-H logrando un efecto positivo en las propiedades mecánicas a edades tempranas, y (b) la estructura, el tamaño y la forma de las partículas, principalmente prismáticas, esféricas y fibrosas (tal como se observó en su micrografía), mejoró significativamente la microestructura lo que llevó a una temprana y mayor RC que la MC (Ganesan 2007; Chusilp 2009; Srinivasan 2010 & Hussein 2014). Estos resultados demuestran que, a pesar del alto contenido de carbón identificado en la composición química, este no afectó, al menos, en términos de resistencia de los concretos, contrario a lo que se ha afirmado en otras investigaciones (Santaella, 2001). Cabe recordar que esta ceniza también fue sometida a un pretratamiento de baja demanda energética, no obstante, el efecto en la RC fue positivo en la mayoría de las edades.

Finalmente, las RCs de todas las mezclas de concreto fueron similares cuando se concluyó el periodo de prueba; la MT (adicionada con 15% CV_{mx} y 15% CBC_{st}) fue menor que la MC hasta 90 días, sin embargo, se aprecia un incremento significativo a partir de 180 días donde los valores fueron similares a los de la MC. La disminución de resistencia se atribuye principalmente a la adición de 15% de CV_{mx} , puesto que la adición de 15% de CBC_{st} no afectó la resistencia en la MB2. De hecho, el comportamiento de la mezcla MT fue similar a la MB1 hasta 90 días, pero a 180 y 365 es notable la influencia de la CBC_{st} , incrementando la resistencia.

4.2. Velocidad de pulso ultrasónico (VPU)

En la Figura 29 se presenta el resumen de los resultados de las VPU's de las mezclas en estudio. En general se observa en la mayoría de las mezclas la tendencia de incremento continuo de los valores conforme incrementa la edad. Las barras de desviaciones estándar se traslapan en algunos casos, y a 7 días de edad se observa la mayor variabilidad de los datos ocasionado por la desaceleración del crecimiento de los productos cementantes y desarrollo de la microestructura. Se observa también, que desde 14 días los valores de VPU de la MC son aparentemente mayores a los de las mezclas con adiciones.

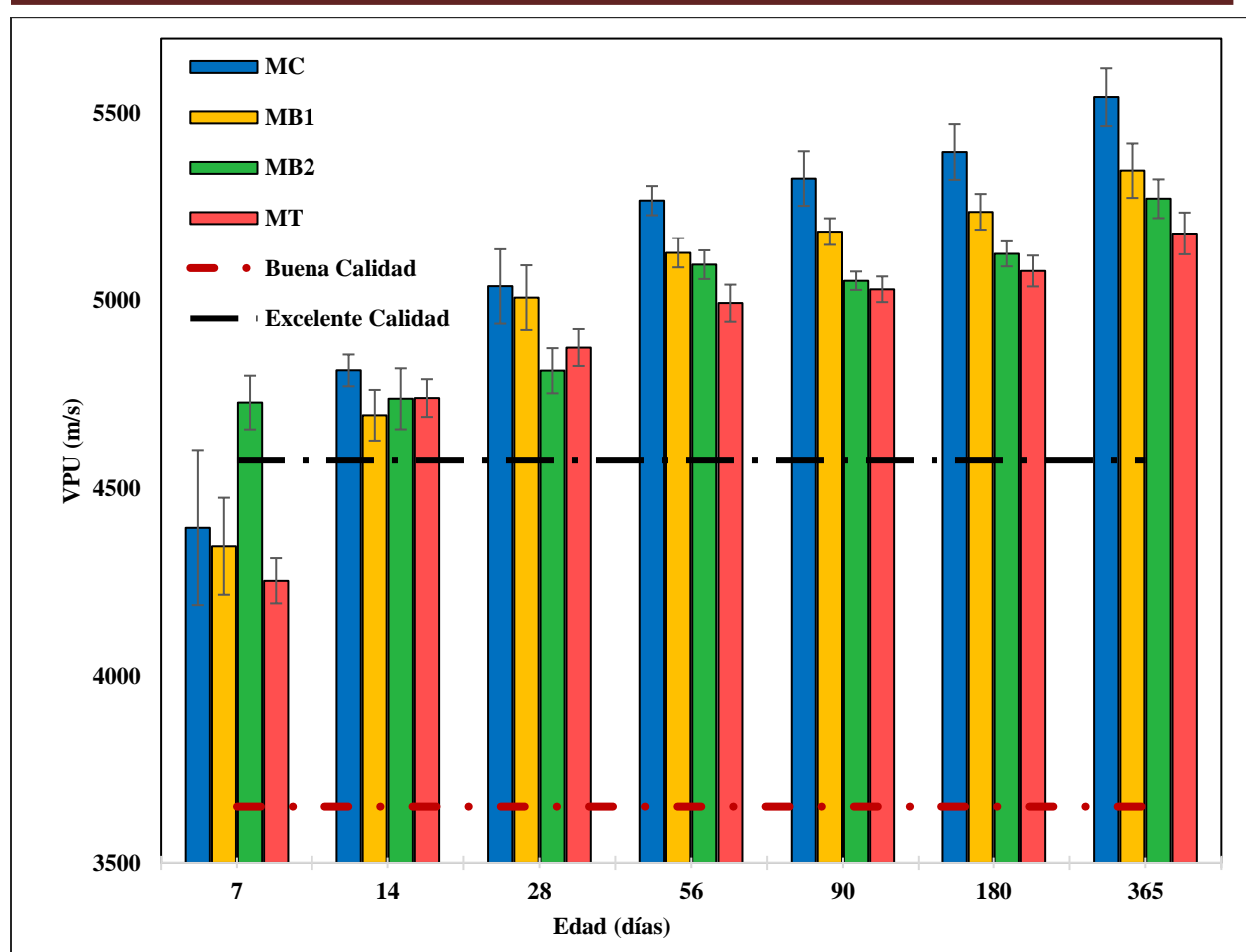


Figura 29. Resumen de los resultados de VPU de las mezclas en estudio

Por un lado, la MB1 registró valores inferiores a la MC en la mayoría de las edades; solo a 7 y 28 días parecen similares. Por otro lado, el efecto del reemplazo de la CBC_{st} en la MB2 provocó una disminución de VPU a partir de 28 días. Consecuentemente, los valores de VPU de la MT fueron menores al control desde los 28 días de edad; además, se observa que los valores disminuyen al incrementar el porcentaje de sustitución de cemento por la combinación de $15\%CV_{mx}+15\%CBC_{st}$.

A pesar de las diferencias entre la MC y las mezclas con adiciones, la calidad de todos los concretos en función del nivel de VPU fue buena desde los 14 días (≥ 3650 m/s) y excelente a edades tardías (≥ 4575 m/s) de acuerdo con el “Consejo nacional de investigación de Canadá” (National Research Council Canada, 1977).

En la Tabla 15 se muestran los resultados del ANOVA efectuado a los datos de VPU para las mezclas en estudio. De acuerdo con los resultados, los factores E y TM son estadísticamente significativos, así como la interacción entre ellos ($p < 0.005$). Es decir, el valor de VPU es diferente con la edad y para los diferentes tipos de mezclas, así como la tendencia de incremento o decremento del valor de VPU causado por la adición de cenizas difiere con la edad. Los resultados de las pruebas Post hoc de subconjuntos homogéneos para las VPU's según la E y el TM se muestran en los Anexos 4 y 5.

Tabla 15. Resumen de los resultados del ANOVA efectuado a los datos de VPU

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	53443611.114 ^a	27	1979393.004	229.789	.000
Intersección	7867025208.499	1	7867025208.499	913289.930	.000
TM	2081202.400	3	693734.133	80.536	.000
E	45583276.807	6	7597212.801	881.967	.000
TM * E	5405568.198	18	300309.344	34.863	.000
Error	4470635.171	519	8613.941		
Total	12841639997.00	547			
Total corregido	57914246.285	546			

a. R al cuadrado = .923 (R al cuadrado ajustada = .919)

En general se observa un incremento en el valor de VPU con la edad hasta 28 días para todas las mezclas, no obstante, de los 56 a 180 días ($p=0.710$ y $p=0.935$) los valores no son significativamente diferentes. A 365 días se observa un incremento significativo de VPU con respecto a 180 días ($p<<0.05$). En lo referente a la adición de cenizas, se corrobora que la adición de 15% CV_{mx} , 15% de CBC_{st} y la combinación de 15% CV_{mx} +15% CBC_{st} disminuyen significativamente los valores de VPU ($p<<0.05$, $p<<0.05$, $p<<0.05$).

También, se observa que la adición de CV_{mx} disminuyó el valor de VPU en mayor medida que la CBC_{st} ($p<<0.05$), y que la adición de la combinación de 15% CV_{mx} +15% CBC_{st} redujo significativamente el valor de VPU con respecto a la adición de CBC_{st} ($p<<0.05$). Es decir, la mezcla MT fue la que obtuvo menor valor de VPU. A la conclusión del experimento, los valores de VPU fueron significativamente diferentes para algunas mezclas ($p<<0.05$); sin embargo, no se observó diferencia significativa entre la MB1 y MB2 ($p=0.498$), y entre MB2 y MT ($p=0.227$).

Los resultados de VPU corroboran que las adiciones de 15% CV_{mx} y 15% CBC_{st} provocaron reducciones importantes en las densidades de los concretos. Puesto que las densidades de estos materiales son 2.09 y 2.20 g/cm^3 , respectivamente, que son menores comparadas con la del cemento (2.9 g/cm^3). Sin embargo, la técnica de VPU sugiere que los valores para el concreto que contiene CV_{mx} son mayores a los de la mezcla con CBC_{st} .

Esto pareciera ser contradictorio, puesto que la densidad de CV_{mx} es menor a la de CBC_{st} . Este hecho nos ayuda a concluir que la técnica de VPU, la cual es unidireccional, es confiable para identificar cambios entre materiales únicamente cuando existen diferencias importantes entre las densidades de sus ingredientes.

La onda que viaja a través de un material sólido “depende de la densidad, propiedades elásticas y de las diferentes fases presentes dentro del material, así la calidad puede ser relacionada con esta medida” (Neville, 1995).

La disminución de la VPU en la MB2 con la adición de CBC_{st} en comparación con la MC es congruente con los resultados de la RC, ya que las ondas ultrasónicas viajan más rápido en concretos más resistentes.

Los resultados indican que conforme se incrementa el nivel de adición de cenizas la VPU disminuye, tal es el caso de la MT con 30% de sustitución de CPC. Esto es similar con algunos trabajos en donde se menciona que: “El incremento en la tasa de desarrollo de la VPU en especímenes de concreto es significativamente disminuido por adiciones minerales (Ashraf, 2009), especialmente a edades tardías (Owaid et al., 2017)”. Esto es similar a lo que se reportado en la literatura donde “el valor de la VPU continúa incrementándose hasta los 90 días de edad” (Gutiérrez, 2008 y Hernández, 2009). No obstante, los resultados de esta prueba tienen limitaciones por ser una prueba unidimensional, en contraste con la de RC que es tridimensional.

4.3 Resistividad eléctrica (RE)

En la figura 30 se muestra un resumen de los resultados de RE para las mezclas en estudio. De manera similar que, en las dos pruebas anteriores, se observa que los valores de RE incrementan considerablemente con la edad para todas las mezclas. La variabilidad entre lecturas para cada mezcla es pequeña, por lo cual, a partir de 56 días de edad se nota que las adiciones de 15% de CV_{mx} (MB1) y 15% de CBC_{st} (MB2), así como la adición de la combinación de 15% de CV_{mx} + 15% de CBC_{st} , contribuyen a incrementar la RE de las mezclas que las contienen cuando se comparan contra la MC.

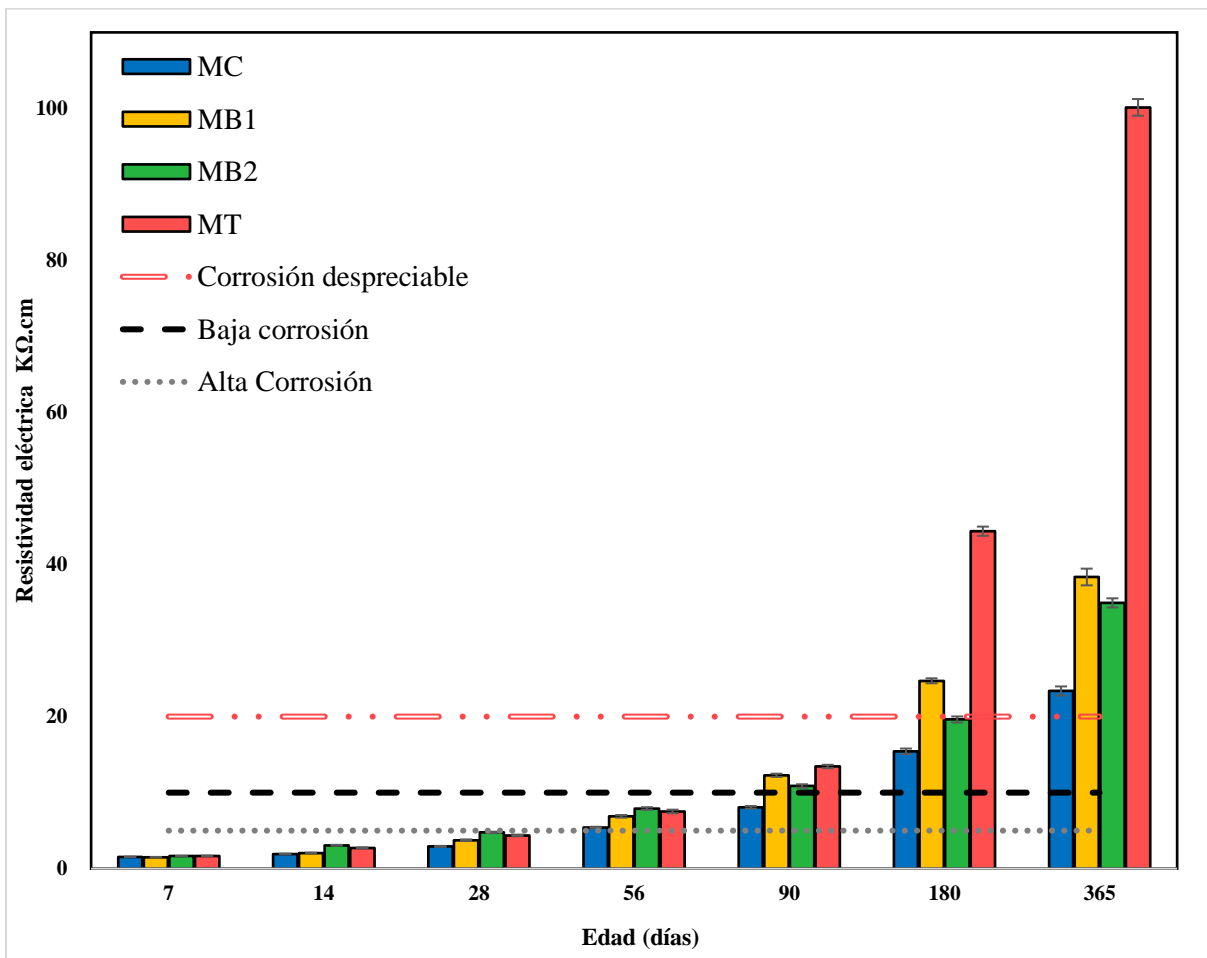


Figura 30. Resumen de los resultados de RE de las mezclas en estudio.

Los resultados también sugieren que la RE de la mezcla MB1 es mayor que la RE de la mezcla MB2 a partir de 90 días, y que la RE de la mezcla MT es evidentemente la mayor de todas las mezclas a partir de también 90 días. El incremento de RE de la mezcla MT es prácticamente el doble con respecto al control a 180 días y prácticamente el triple con respecto a 365 días, lo cual sugiere que la adición de CV_{mx} y CBC_{st} tiene un efecto sinérgico positivo en concretos ternarios en términos de durabilidad, siendo el factor tiempo lo que incrementa el valor de esta variable.

Si existe una alta probabilidad de penetración de agentes agresivos al interior del concreto, habrá también una alta probabilidad de corrosión del acero de refuerzo. Al clasificar los valores de RE de las mezclas en estudio con los criterios establecidos por la CEB-192 (1989) (Anexo 6), a partir de 56 días todas las mezclas de concreto alcanzan una velocidad de corrosión baja y después de 365 días una velocidad de corrosión despreciable. Estos concretos fueron diseñados con base en una resistencia esperada (25 MPa, $a/c=0.5$) y no con base en criterios de durabilidad, por lo tanto, no se recomienda su exposición en zonas con ambientes agresivos a edades tempranas.

El análisis de varianza (ANOVA) se muestra en la Tabla 16. De acuerdo con los resultados obtenidos, los factores con una contribución significativa son la E ($p < 0.05$), TM ($p < 0.05$), así como la interacción entre ellos ($p < 0.05$). Esta última indica que la tendencia de incremento del valor de RE causado por la adición de cenizas es diferente con la edad.

Tabla 16. Resumen de los resultados de RE de las mezclas en estudio.

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	123707.943 ^a	27	4581.776	53932.497	.000
Intersección	106562.572	1	106562.572	1254357.702	.000
TM	19760.355	3	6586.785	77533.644	.000
EDAD	86751.680	6	14458.613	170193.649	.000
TM * EDAD	31321.492	18	1740.083	20482.673	.000
Error	51.992	612	.085		
Total	173538.428	640			
Total corregido	123759.935	639			

a. R al cuadrado = 1.000 (R al cuadrado ajustada = 1.000)

Los resultados de la prueba de Tukey de subconjuntos homogéneos para los valores RE según la variable y según el TM (Anexos 7 y 8) indican que todas las medias son estadísticamente significantes. Además, se observa que entre 7 y 56 días la RE de MB2 es mayor que la de la mezcla MB1 ($p < 0.05$); sin embargo, a partir de 56 días esta tendencia se invierte hasta el final del experimento ($p < 0.05$). También se observa que a partir de 90 días la mezcla MT tiene el valor más alto de RE hasta la conclusión del experimento ($p = 0.05$). A 365 días las diferencias entre mezclas son más evidentes, siendo la MT la cual alcanzó el valor más alto de RE (< 0.05), en seguida la mezcla MB1, después la mezcla MB2 y finalmente la MC.

En la Figura 30 es apreciable el efecto positivo de las adiciones minerales en concretos, superando las MBs y MT el umbral de 10 $k\Omega \cdot cm$ a 90 días, indicando baja probabilidad de penetración de agentes agresivos, y a 365 días la probabilidad de corrosión de estas mezclas es despreciable con base en la CEB-192 (esto solo en ambientes no agresivos).

Algunas investigaciones indican que el incremento de RE se atribuye a cambios microestructurales de la matriz cementante, lo cual se refleja en el refinamiento de la estructura porosa, en la disminución en el volumen de poros y en la conectividad de estos (Vennesland et al., 2007; Schiessel & Raupach, 2007 y Polder, 2011). Otras investigaciones añaden que se debe a cambios en la concentración iónica de la solución de poro que causa una disminución en la conductividad de esta (Medeiros-Junior et al., 2014). Además, otras investigaciones más recientes infieren que “a edades tardías la reacción de la CV es más sensible al contenido de humedad existente en la matriz del concreto, por lo tanto, el transporte de agentes agresivos es mucho menor que en la mezcla sin adición de CV_{mx} ” (Belmonte et al., 2019).

Por un lado, las propiedades conductivas del concreto son regidas principalmente por la composición química de la solución de poro. En la hidratación del cemento Portland la concentración iónica disminuye con la creación de productos de hidratación tales como el silicato hidratado de calcio (C-S-H) y el hidróxido de calcio ($Ca(OH)_2$); “los iones OH^- que se producen en la hidratación del cemento se depositan en los poros del concreto y al entrar en contacto con la sílice amorfa de las puzolanas, se forma un gel extra de silicato de calcio hidratado y se reduce el hidróxido de calcio” (Ramezani pour et al., 2011).

En esta investigación la reacción puzolánica de la CV_{mx} y/o la CBC_{st} contribuyeron al refinamiento de los poros, restringiendo la conectividad y a su vez aumentando la resistencia contra el flujo de corriente eléctrica, concordando con lo reportado por Andrade et al., (2011), quienes indican que cuanto mayor es la RE, menor es la porosidad del concreto, y al tener un aumento en la fase sólida por volumen se tendrá un menor riesgo a la penetración de iones cloruro, dióxido de carbono y sulfatos que podrían dañar al concreto.

Finalmente, las adiciones de la CV_{mx} , CBC_{st} y la combinación de $CV_{mx} + CBC_{st}$ en concretos tiene un efecto positivo, dado que incrementan la RE. Este comportamiento se atribuye principalmente a la reducción de iones en la solución de poro debido a la reacción puzolánica y al bloqueo de los poros que disminuyen significativamente la conexión entre poros.

Lo anterior se logra gracias a la adición de puzolanas que consumen hidróxido de calcio presente en la solución, formando nuevos productos de hidratación similares a los que se generan en la hidratación del CP, entre los que se encuentran el silicato hidratado de calcio ($C_3S_2H_3$) producto sólido y denso que le da resistencia y permeabilidad a la matriz cementante y a los aluminatos hidratados de calcio (C_3AH_6). Estos compuestos ocupan los espacios vacíos y densifican la microestructura cementante disminuyendo la porosidad.

Por consiguiente, disminuye la permeabilidad de la matriz cementante endurecida, promoviendo una modificación en la microestructura porosa y hace que los concretos sean menos conductivos y con ello aumenten su resistividad eléctrica. Es por lo que el uso de puzolanas afecta considerablemente los valores de RE reduciendo la cantidad de iones de hidróxido de calcio disponibles en la solución. Conjuntamente, el concreto adicionado con $CV_{mx} + CBC_{st}$ en la mezcla MT tiene una RE muy alta favoreciendo la durabilidad de estructuras de concreto en comparación a mezclas binarias. Esta afirmación se corrobora con los resultados obtenidos en otros estudios

donde se indica que la actividad puzolánica promueve un aumento de la resistividad eléctrica dentro del concreto (Hunkeler et al., 1996, Ghosh y Tran^b, 2015 & Medeiros-Junior et al., 2016).

Los resultados de la prueba de RE indican diferencias muy marcadas al final del experimento. Con base en lo anterior los resultados de RE son intrigantes; es decir, las diferencias tan grandes entre la MC y los concretos con una adición y entre los concretos con una adición y el concreto con dos adiciones parecieran tener origen en algo que comparten las cenizas, y se magnifica al combinarlas. Por ejemplo, el carbón que pudiera atrapar iones y disminuir la conductividad de la solución de poro en el concreto aparece en mayor cantidad en la MT.

Con base en lo anterior y en contraste con los resultados publicados por Arenas-Piedrahita et al., (2016), en la Figura 31 se comparan las REs de ambos trabajos. Arenas-Piedrahita y col. evaluaron especímenes cilíndricos de mortero, adicionados con 10 y 20% de CV y CBC_{st} respectivamente como sustitutos parciales de CP, además de una mezcla control con 100% CPO hasta 180 días de edad; dicha investigación permite comparar los resultados de las REs con las de este proyecto ya que en ambas investigaciones se empleó un postratamiento de baja demanda energética. Se puede decir que las resistividades obtenidas en esta investigación son comparables, consistentes y con una tendencia similar de incremento significativo después de 14 días, principalmente para las mezclas adicionadas con CBC_{st}, mientras que en las mezclas con CV el incremento se observa a edades tardías, después de 90 días para las mezclas con 10 y 15% de CV. En ambas investigaciones se observa que al final de experimento las REs para las mezclas con CV y CBC_{st} incrementan más del doble o triple que los valores obtenidos de las mezclas control, principalmente para las mezclas con 15 y 20% de CBC_{st}. El incremento en la RE debido a la adición de CBC, tal como se ha reportado en esta y en otras investigaciones se debe a la reacción puzolánica que forma silicato hidratado de calcio adicional, densificando la microestructura de la matriz cementante y disminuyendo con ello la porosidad y la interconexión de los poros, previniendo la difusión iónica en la solución de poros y reduciendo la concentración iónica de la solución como resultado de la continua hidratación del cemento (Andrade et al., 2009; Lubeck et al, 2012 y Arenas-Piedrahita et al., 2016). Estos hechos explican parcialmente el efecto benéfico de la combinación de ambas cenizas (MT) a edades mayores a 90 días., especialmente a 365 días. Cabe destacar el origen específico de este efecto se desconoce a ciencia cierta y que se requiere profundizar más en este estudio realizando pruebas de porosidad y pruebas microestructurales a esas edades tardías.

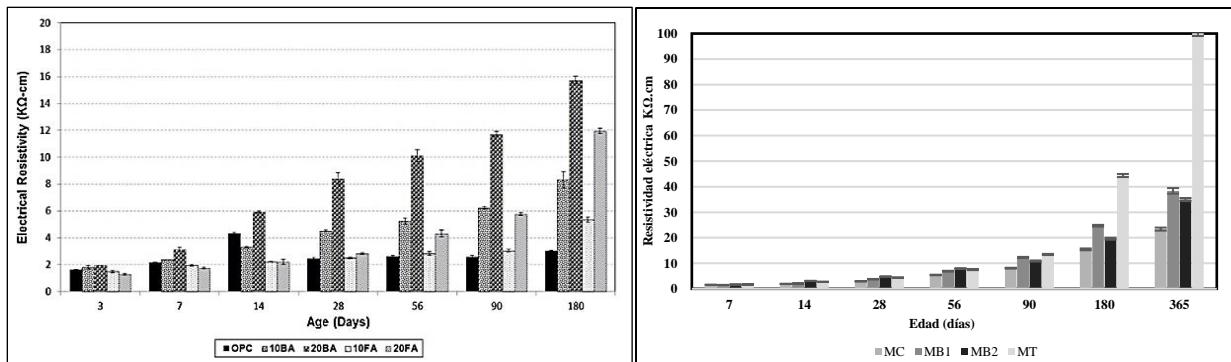


Figura 31. Resumen de los resultados de RE de las mezclas de mortero vs. concreto

4.4. Correlaciones entre propiedades

En este apartado se analizaron las correlaciones entre los resultados de las pruebas de VPU y RE con las de RC. Las correlaciones se establecen con el objeto de predecir los resultados de RC, la cual es una prueba destructiva, con base en los resultados de pruebas no destructivas. También se analiza la estimación de la RC con base en ambos dos, las lecturas de VPU y RE. Las correlaciones se analizaron de dos maneras, una correlación general utilizando todos los datos y posteriormente correlaciones individuales por TM.

4.4.1 VPU vs. RC

En la Figura 32 se grafican los resultados de la correlación entre VPU vs. RC, de los promedios de todos los datos de las cuatro mezclas, y para todas las edades. En general se observa una tendencia de incremento continuo de los valores, es decir, al incrementar los valores de VPU incrementa la RC. El diagrama de dispersión indica una e relación lineal positiva entre ambas variables. El coeficiente de correlación, también denominado R el cual se analiza en este caso por tratarse de una relación lineal entre VPU y RC, es de 0.7807. Este valor es similar al reportado en la literatura para este tipo de correlación (Neville, 1995) e indica que la correlación obtenida es relativamente alta según Amat, (2016); por lo tanto, la VPU se puede considerar como un buen predictor de la RC.

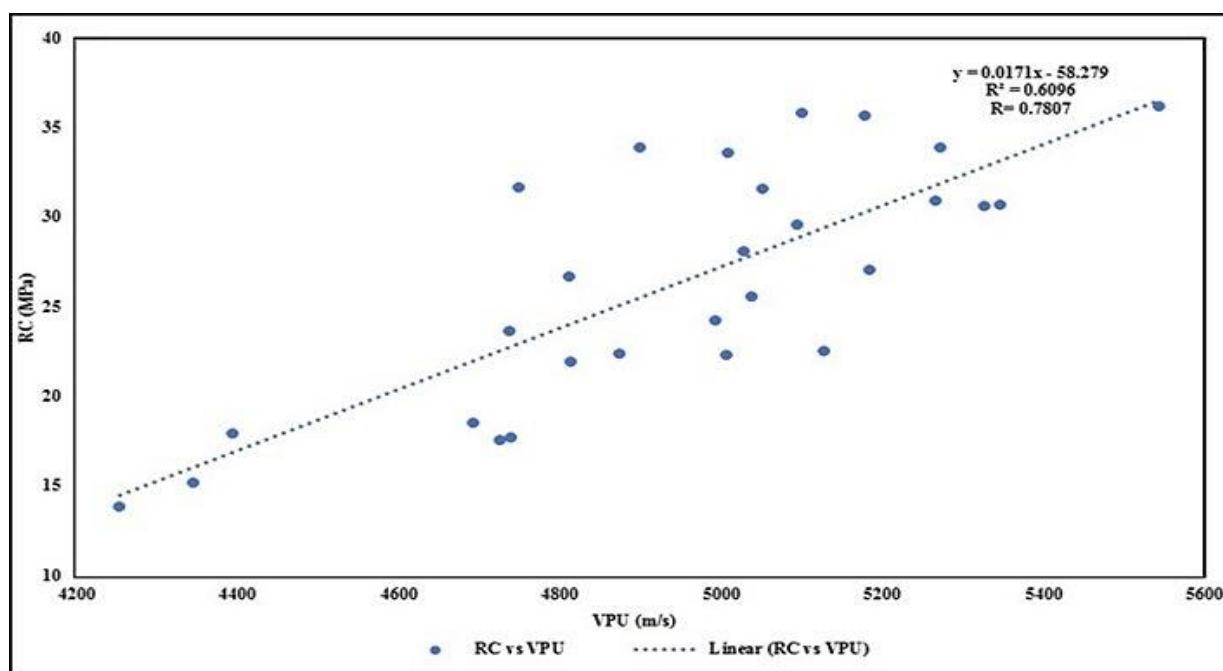


Figura 32. Correlación lineal entre VPU y RC considerando todas las mezclas

Al establecer correlaciones por TM (Figura 33) se observa que la pendiente de la línea recta correspondiente a la mezcla MB1 es similar al control (0.0159 vs. 0.0163) y la ordenada al origen también es similar (55.413 vs. 55.122). Por el contrario, la pendiente de la mezcla MB2 es mayor

que la del control (0.0262 vs. 0.0163) y la ordenada al origen es también mayor (-101.78 vs. 55.122).

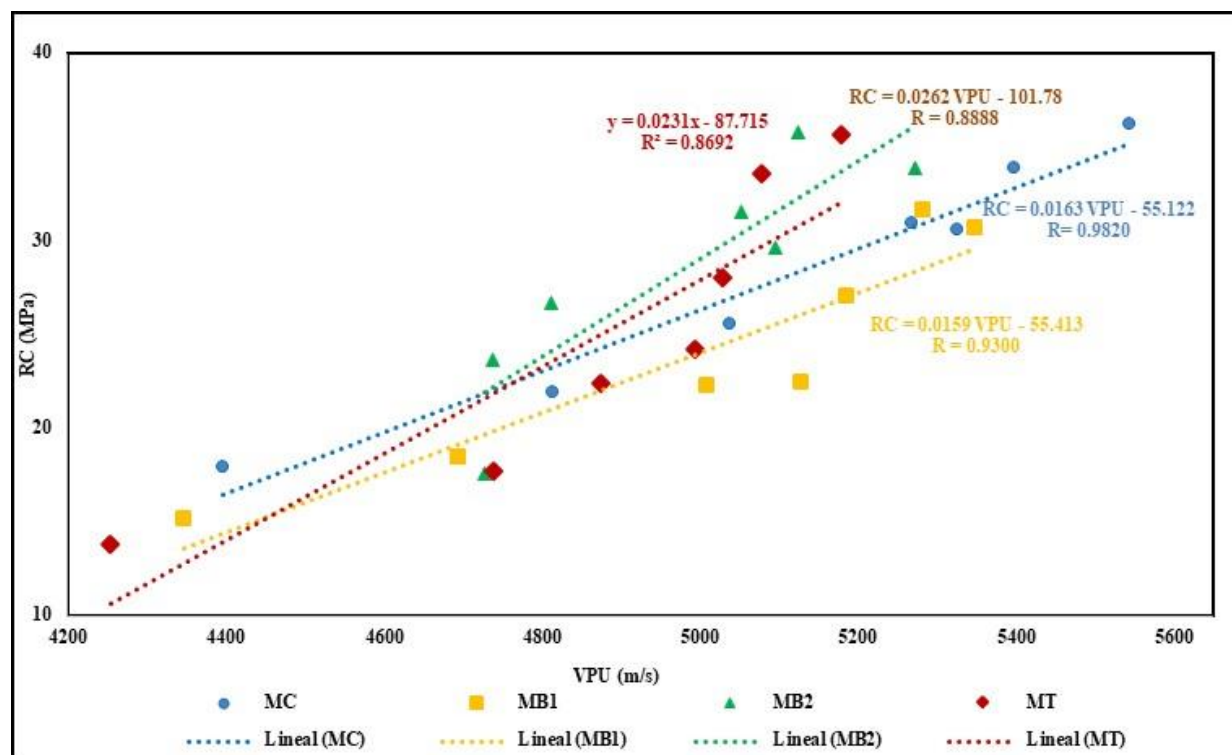


Figura 33. Correlaciones lineales entre VPU y RC por TM

La pendiente de la MT es mayor que la del control (0.231 vs. 0.0163) y la ordenada al origen también es mayor (-87.715 vs. 55.122). En las ecuaciones obtenidas, cuando se correlacionan los resultados experimentales por TM, los datos se ajustan de mejor manera que cuando se correlacionan todos en una sola ecuación. En la Tabla 17 se presenta un resumen de las ecuaciones de ajuste y los coeficientes de correlación respectivos para cada mezcla donde se observa que la correlación cambia de alta a muy alta (Amat, 2016).

Tabla 17. Ecuaciones lineales entre VPU y RC por TM

Mezcla	Función	Ecuación	Coef. de correlación
MC	Lineal	$RC = 0.0163 VPU - 55.122$	$R = 0.9820$
MB1	Lineal	$RC = 0.0159 VPU - 55.413$	$R = 0.9300$
MB2	Lineal	$RC = 0.0262 VPU - 101.78$	$R = 0.8888$
MT	Lineal	$RC = 0.0231 VPU - 87.715$	$R = 0.8962$

Las ecuaciones indican que para valores similares de VPU los valores de resistencia pueden ser menores o mayores entre mezclas diferentes, lo cual depende de la edad. Es decir, para valores menores que 4750 m/s las RCs de los concretos con adiciones son menores que la del control; para valores de 4750 y 5150 m/s las RCs de los materiales con adiciones son mayores que el control; sin embargo, para valores mayores que 5150 m/s no se observa diferencia significativa entre las RCs de todas las mezclas.

Las mezclas estudiadas tienen diferentes adiciones minerales (CV_{mx} y CBC_{st}) y en diferentes porcentajes de reemplazo de CPC (0, 15 y 30%), por lo cual esta importante aportación se debe tomar en cuenta al intentar predecir la RC del concreto con base en lecturas de VPU. Un comportamiento similar se ha encontrado en morteros a base de cemento Portland (Arenas-Piedrahita et al., 2016).

El análisis estadístico de significancia de las ecuaciones de correlación en la Tabla 18 se presentan en el Anexo 9. Los resultados indican que las correlaciones lineales entre VPU y RC son significantes. Por ejemplo, para la MC la VPU representa el 95.7% (valor de R^2 ajustado en Anexo 10 porque la cantidad de datos es pequeña) del comportamiento de la RC. La correlación es significativa (p -valor $\ll 0.005$), y la pendiente y ordenada al origen de la ecuación son también significativos (p -valor $\ll 0.05$ y p -valor = 0.001) (Anexo 11).

Las ecuaciones de correlación lineales para las mezclas MB1, MB2 y MT, y sus respectivos parámetros también son significativos y los valores de VPU representan en 81.8, 75 y 76.4 los valores de sus respectivas RCs (Anexos 12-20); es decir, las ecuaciones propuestas son válidas, significativas y representan proporcionalmente ($\geq 75\%$) los valores de RC mediante la prueba no destructiva de VPU.

La VPU a través del concreto “es influenciada por algunos factores ya mencionados que afectan de diferente manera la RC. Consecuentemente, no existe ninguna relación única entre la VPU y la RC” (Neville, 1995). Se ha reportado que la VPU y la RC se ven afectadas con el desarrollo del proceso de hidratación del cemento en el tiempo, el cual induce cambios microestructurales en la matriz cementante (Demirboga et al., 2004; Hernandez, 2010 y Lawson et al., 2011). Así mismo, se encuentran ligadas a la densidad y a las propiedades elásticas del medio, permitiendo el uso de la VPU como base para elaborar modelos predictivos de la RC (Krautkrämer, 2013).

También, presentan una tendencia similar en su desarrollo (Demirboğa & Karakoc, 2004) con un incremento en el tiempo hasta un punto en el que los valores permanecen constantes, o el incremento es poco significativo, pudiendo aproximarse a una función lineal (ACI committee 209, 1997) o exponencial (Wang et al., 2017).

De acuerdo con Breyse (2012) la sensibilidad en las lecturas de VPU disminuye con el incremento en la edad y con la resistencia del concreto, generalmente después de los 28 días, cuando el volumen de los poros capilares es bajo en comparación con edades tempranas. A edades tardías, una mayor variación en los valores de VPU no necesariamente indica un cambio considerable en la RC. En las últimas décadas se ha demostrado que un concreto con mayor VPU se asocia con una mayor RC y viceversa, pero no necesariamente en la misma proporción (Malhotra & Carino, 2003 y Le & Lam, 2018). Diversos investigadores han reportado correlaciones significativas entre VPU y RC y han propuesto diferentes modelos de regresión, principalmente de tipo lineal; dichos análisis de correlación se han realizado en un extenso rango de mezclas de concreto y se han encontrado altos valores en los coeficientes de determinación (Riad et al., 2011 y Djamila & Mohamed, 2018).

Con base en los resultados experimentales de esta investigación, se estableció un modelo numérico para evaluar la RC de los concretos por tipo de mezcla mediante la determinación de VPU. La correlación de tipo lineal entre VPU y RC más alta fue para la MC (98.2%) seguida de la correlación de la MB1 (93%) con 15% de CV_{mx} ,

El resultado obtenido podría explicarse por la baja densidad de la CV_{mx} en comparación a la del CPC, una menor densidad implica más porosidades en estado fresco lo que además explica el problema de trabajabilidad durante el colado de los especímenes, y la necesidad de mayor cantidad de aditivo superplastificante. Experimentos anteriores sobre la incorporación de CV's han reportado resultados similares describiendo modelos de correlación tipo lineal entre VPU y RC (Malhotra & Carino, 2003, & Popovics, 2005). La comparación de la correlación para la MB2 y MT proporcionó coeficientes de correlación inferiores a la MC en 10% y 7% respectivamente, no obstante, los modelos analíticos empleados tuvieron una buena precisión de pronóstico para cada una de las mezclas ($R \geq 88\%$).

La correlación de la mezcla hecha a partir de 15% de CBC_{st} en sustitución de CPC fue similar a la MC y la correlación gráfica entre VPU y RC muestra que el modelo lineal propuesto predice con un 88% de confiabilidad la relación entre estas dos variables para esta mezcla (Abo- Qudais, 2005, Hamid et al., 2010). Se infiere que las partículas de carbón contenidas en la CBC_{st} influyeron en la correlación de la VPU-RE. Finalmente, la MT se vio influenciada por ambas cenizas lo cual mejoró la RE, pero disminuyó significativamente la RC a edades tempranas.

4.4.2 RE contra RC

En la Figura 34 se presentan los promedios de todos los datos de las cuatro mezclas y para todas las edades, en este caso para la relación RE vs. RC. A diferencia de la relación lineal observada en la sección anterior para la correlación de VPU vs. RC, en este caso se aprecia una relación no lineal. Por lo que se propone una correlación logarítmica positiva entre ambas variables, la cual también se muestra en la Figura 33. El coeficiente de determinación es 0.78; el cual, según Amata, (2016) es alto, por lo que la RE parece ser un buen predictor de la RC.

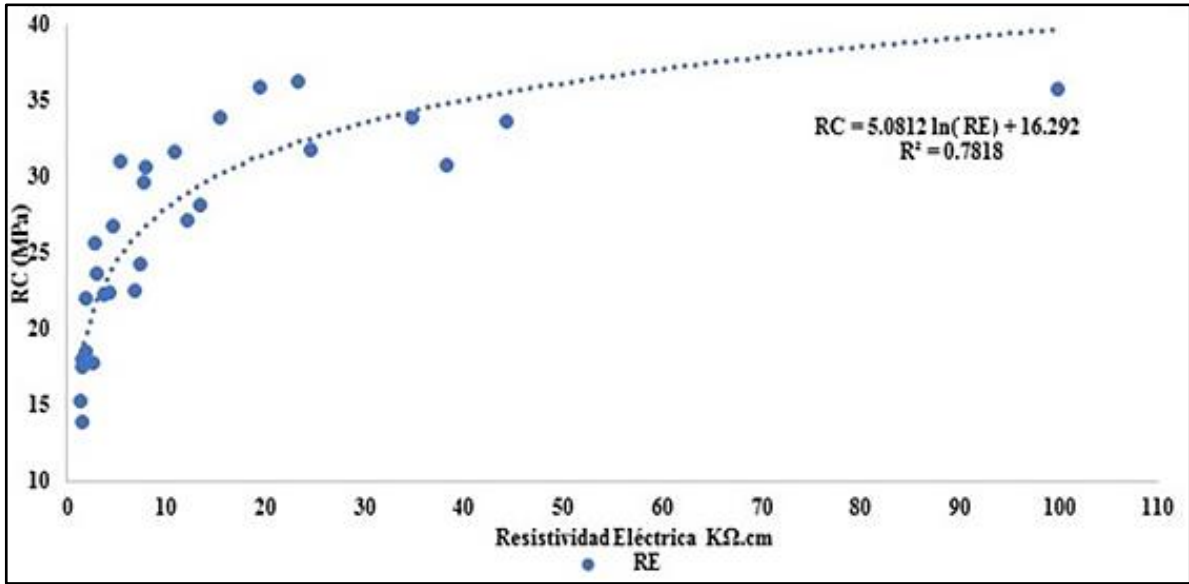


Figura 34. Correlación logarítmica entre RC y RE considerando todas las mezclas

En la Figura 35 se presentan las correlaciones por tipo de mezcla en donde se observa que la evolución de la RE es similar a la de la RC, es decir, a mayores valores de RE, mayores son los valores de RC. Esto se corrobora con los coeficientes de determinación que presentaron valores de $R^2 \geq 0.90$, lo que sugiere que los cuatro modelos propuestos describen de manera adecuada la correlación existente entre RC y RE (Tabla 18).

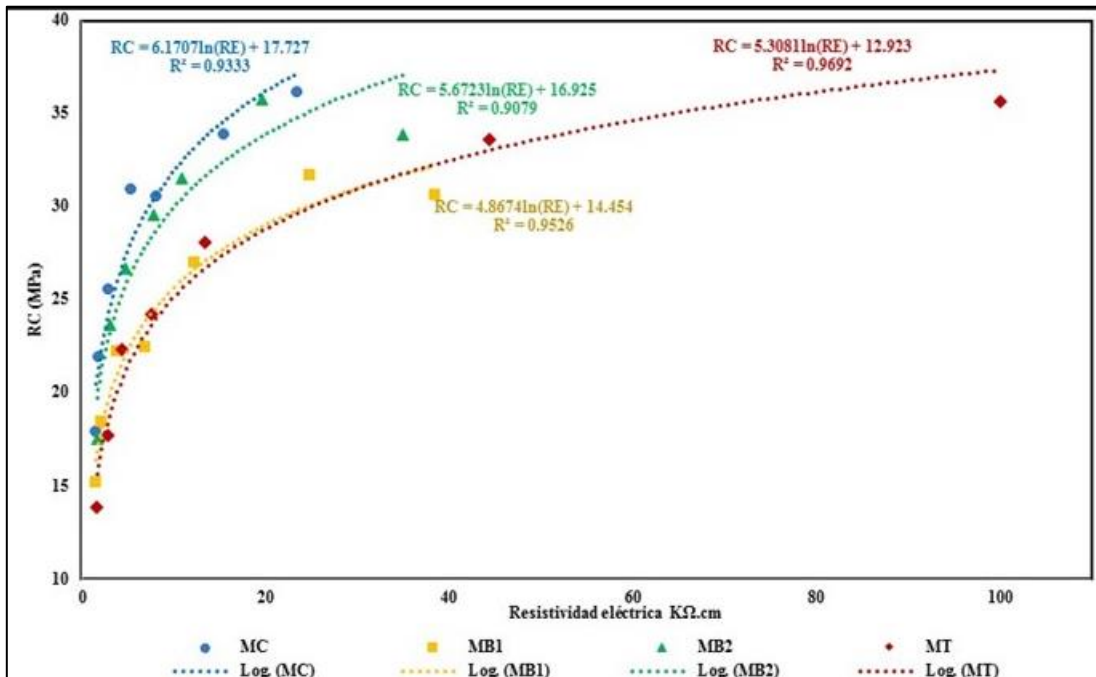


Figura 35. Correlaciones logarítmicas entre RE y RC por TM

Tabla 18. Ecuaciones entre RC y RE por TM

Mezcla	Función	Ecuación	Coef. de determinación
MC	Logarítmica	$RC = 6.1707 \ln(RE) + 17.727$	$R^2 = 0.9333$

MB1	Logarítmica	$RC = 5.6723 \ln (RE) + 16.925$	$R^2 = 0.9526$
MB2	Logarítmica	$RC = 4.8674 \ln (RE) + 14.454$	$R^2 = 0.9079$
MT	Logarítmica	$RC = 5.3081 \ln (RE) + 12.923$	$R^2 = 0.9692$

En la Figura 35 se aprecian tres patrones. Primeramente, la trayectoria de la MC está acotada aproximadamente hasta 20 kΩ·cm respecto al eje de la RE con un rango de valores orientado al eje de la RC mayor a 35 MPa. La MB1 sigue una trayectoria similar a la MT cuyos valores de R^2 de estas mezclas son de 0.95 y 0.96 respectivamente, siendo los valores más altos de los coeficientes de determinación. No obstante, es evidente la diferencia del rango de valores en el eje de la RE donde la MB1 alcanza valores hasta los 40 kΩ·cm y la MT alcanza valores hasta los 100 kΩ·cm y con referencia al eje de la RC la MB1 se aproxima a los 30 MPa y la MT mayor a 35 MPa. Finalmente para la MB2 con el coeficiente de determinación más bajo de 0.90, es claro un rango de valores cercanos a los 40 kΩ·cm en el eje de la RE y mayor a 35 MPa en el eje de la RC.

El análisis estadístico de significancia de las ecuaciones de correlación en la Tabla 18 también se presentan en el Anexo 21-32. Los resultados indican que las correlaciones del tipo logarítmico entre RE y RC también son significantes. Nuevamente, a manera de ejemplo se analiza esta correlación para la MC, donde la variable RE representa el 92.1% del comportamiento de la RC. La correlación es significativa con un p-valor $\ll 0.05$ (Anexo 22). Los parámetros de la ecuación no lineal también son significativos (p-valor $\ll 0.05$ y p-valor $\ll 0.05$ en Anexos 23). Las ecuaciones de correlación logarítmica para las mezclas MB1, MB2 y MT, y sus respectivos parámetros también son significativos y los valores de RE representan 94.3, 89 y 96.3% los valores de sus respectivas RCs (Anexos 26, 29 y 32).

En la RC, uno de los factores clave es la resistencia interfacial que no tiene un impacto visible en la RE del concreto, conjuntamente, diversas investigaciones han reportado que cuando se usan diferentes materiales cementantes en mezclas de concreto, no hay una relación significativa entre la RE del concreto y la RC (Ramezani pour et al., 2011 & Liu et al., 2014). Esto se relaciona principalmente con el hecho de que el compuesto químico de la solución de poro no tiene un gran impacto en la RC, mientras que afecta significativamente la resistividad de los concretos (Azarsa et al., 2017).

Una investigación sobre este tipo de correlación encontró una tendencia aproximadamente lineal entre estas dos propiedades, ya que ambas dependen directamente de la porosidad de la matriz a una edad temprana, pero a medida que se incrementa la edad, esta relación se ve afectada por otras propiedades, tales como la conductividad de la solución de poro y el grado de saturación del concreto (Dinakar et al., 2007 & Lübeck et al., 2012). Además del efecto que ejerce la densidad de los materiales puzolánicos en el caso de concretos binarios y ternarios. Tal como se reportó en el apartado de análisis de resultados, la densidad del CPC es mayor que la de la CV_{mx} y la de la CBC_{st} , lo que modificó el peso volumétrico de las mezclas y disminuyó la permeabilidad de los concretos. Por ello, los coeficientes de correlación por TM propuestos en esta investigación fueron altos, mayores a 90% principalmente para la MT y MB1 con un R^2 de 97% y 95% respectivamente.

Este tipo de correlación se ha reportado que está influenciada por la microestructura de la matriz cementante, lo cual comprende el tipo, la cantidad, el tamaño y la distribución de las fases presentes en el mismo (Mehta y Monteiro, 2017); y por factores químicos, tales como la concentración y movimiento de los iones presentes en la solución de poro (Koleva et. al. 2008) (Abo El-enein et al., 1995 & McCarter et al., 2000). A su vez, estas propiedades tienen un efecto en los resultados de las pruebas de RC y RE de las mezclas de concreto. Por estos motivos, la correlación de estas dos variables ha sido alta cuando se evalúan por tipo de mezcla, ligado directamente al proceso de hidratación del cemento y a los cambios microestructurales, al igual que lo reportado en la literatura (Andrade et., al. 2009).

En la MB1 y MT se observa que la contribución de las cenizas volantes en la densificación de la microestructura del concreto es significativa y en consecuencia, mejora la matriz cementante de los concretos resultantes de los efectos puzolánicos y del efecto “filler” por el tamaño de sus partículas ($<75 \mu\text{m}$); Además en la MT que contiene 30% de sustitución se produjo un mayor consumo de hidróxido de calcio con el tiempo, produciendo mayor cantidad de gel C-S-H en el concreto, esta reacción puzolánica disminuyó la cantidad de OH^- disponible en la solución de poro, reduciendo la conductividad del concreto (Medeiros-Junior et al., 2016) es decir, se evitó la formación de enlaces iónicos tales como SiO_4^{4-} y AlO_2^- y consecuentemente de iones disueltos en la solución de poro tales como Si^+ , Al^+ y Ca^+ ; por lo tanto, la correlación de esta mezcla fue la más alta, seguida de la MB1 (97% y 95%).

Para la MB2 y MT adicionadas con CBC_{st} la estructura de poros se ve afectada por la presencia de estas adiciones, debido a la reacción puzolánica que da lugar a mayor cantidad de productos de hidratación, lo cual aumenta la tortuosidad y reduce la conectividad de los poros.

Finalmente, tras una revisión de la literatura, se infiere en esta investigación que la presencia de un alto contenido de carbón en la CBC_{st} (9%) mayor al 6% que sugiere la norma ASTM-618 para las PPI la CBC_{st} disminuyó la permeabilidad del concreto en la MB2 y MT y redujo la cantidad de iones libres en la solución de poro; esto debido a la textura porosa del carbón vegetal cuya carga eléctrica es negativa, atrayendo moléculas cargadas positivamente, tales como los aniones K^+ , Na^+ , Ca^{2+} y S^{2-} presentes en el cemento, ejerciendo un efecto de adsorción mediante el cual los iones se adhieren a la superficie del carbón.

4.4.3 VPU-RE contra RC

Las ecuaciones de correlación múltiple proponiendo como predictores a la VPU y RE para estimar la RC de los concretos en estudio se presentan en la Tabla 19. El análisis estadístico de significancia de dichas ecuaciones de correlación también se presenta en los Anexos 33-37. Los resultados indican que las correlaciones de tipo lineal entre VPU-RE vs. RC son significativas. Nuevamente, a manera de ejemplo se analiza esta correlación para la MC, donde las variables VPU y RE representan el 99.2% del comportamiento de la RC. La correlación es significativa con un p-valor $\ll 0.05$ (Anexo 33) y los parámetros de la ecuación lineal también son significativos (p-valor $\ll 0.05$ y p-valor $\ll 0.05$ en Tabla 19)

Tabla 19. Ecuaciones de correlación múltiple entre VPU-RE vs. RC

Mezcla	Función	Ecuación	Coef. de correlación
MC	Lineal	$RC=0.013(VPU) + 0.181(RE) - 41.815$	R = 0.992
MB1	Lineal	$RC=0.011(VPU) + 0.187(RE) - 31.040$	R = 0.963
MB2	Lineal	$RC=0.028(VPU) - 0.29(RE) - 108.592$	R = 0.89
MT	Lineal	$RC=0.096(VPU) + 0.16(RE) - 57.053$	R = 0.962

Las ecuaciones de correlación lineal para las mezclas MB1, MB2 y MT, y sus respectivos parámetros también son significativos y los valores de VPU representan 96.3%, 89% y 96.3% los valores de sus respectivas RCs (Anexos 29, 32 y 35).

El análisis estadístico de regresión lineal por TM (Anexo 26) indica que el modelo corregido para la MC representa el 95.7% el comportamiento de la RC con información de la VPU y la RE (Anexo 27), se corroboró que la regresión lineal es significativa con un valor de $p < 0.005$ (Anexo 28), además de que la ecuación propuesta $RC=0.013(VPU) + 0.181(RE) - 41.815$ es significativa.

El mismo procedimiento se realizó para las mezclas con adiciones minerales, indicando que los modelos ajustados para cada mezcla son: 81.8%, 75% y 76.4% para MB1, MB2 y MT, respectivamente. Es decir, las ecuaciones propuestas son válidas, significativas y representan proporcionalmente ($\geq 75\%$) los valores de RC mediante las pruebas no destructivas de VPU y RE (Anexos 31, 34 y 37).

Al comparar las ecuaciones de correlación obtenidas donde se estimó la RC con base en la VPU se observa que la predicción utilizando la ecuación que contiene los resultados de ambas técnicas mejora con respecto a la que incluye solo VPU. No obstante, cuando se compara contra las ecuaciones que incluyen solamente RE la mejora se observa únicamente para la MC pues los coeficientes para las mezclas que contienen cenizas son similares. Recordar también que en la correlación VPU vs. RC se utilizó el coeficiente de correlación (R), mientras que en la correlación RE vs. RC se utilizó el coeficiente de determinación (R^2), en consecuencia, al comparar los correspondientes valores de R se concluye que la RE es un mejor predictor que la VPU.

Conclusiones

Con base en el análisis de los resultados obtenidos se puede concluir:

- El reemplazo parcial de 15% de CPC por CV_{mx} disminuye la RC del concreto a edades tempranas; no obstante, a 180 y 365 días es similar a la del concreto control. Este nivel de reemplazo disminuye la VPU, no obstante, mejora significativamente la RE del concreto a partir de 56 días.

- El reemplazo parcial de 15% de CPC por CBC_{st} no disminuye la RC del concreto, pero si disminuye la VPU; no obstante, a 365 días ésta es similar al control. Además, este nivel de reemplazo incrementa la RE a partir de los 56 días.
- El reemplazo parcial de 30% CPC por la combinación de 15% CV_{mx} y 15% CBC_{st} disminuye la RC del concreto a edades tempranas; no obstante, a 180 y 365 días es similar a la del concreto control. Este reemplazo disminuye la VPU, pero incrementa la RE del concreto a partir de 28 días.
- La RE del concreto con la combinación de 15% CV_{mx} y 15% CBC_{st} es similar a las| de los concretos que contienen 15% de CV_{mx} o 15% de CBC_{st} hasta 56 días de edad, a partir de la cual se incrementa considerablemente hasta duplicar esos valores a 180 días y triplicarlos a 365 días.
- La VPU y el logaritmo de base 10 de RE están correlacionados de forma lineal positiva con respecto a la RC, y las correlaciones son más altas cuando se estiman por tipo de mezcla. Ambas variables son predictores confiable de la RC, siendo la RE mejor predictor que la VPU. Finalmente, se concluye que la estimación de la RC con base en una ecuación que contenga ambas VPU y RE no mejora la predicción utilizando únicamente la RE.

Bibliografía

1. Abo-Qudais, S. A. (2005). Effect of concrete mixing parameters on propagation of ultrasonic waves. *Construction and building materials*, 19(4), 257-263.
2. ACI Committe 209, (1997). *Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structure*, s.l.: American Concrete Institute.
3. ACI Committee 212 (2003). *Chemical admixtures for concrete*. Education bulletin E4-03.
4. ACI Committee 232 (1996). *Use of fly ash in concrete*. ACI committee report 232. 2R-96.
5. Aïtcin, P. C. (2011). *High performance concrete*. CRC press. 26.
6. Amat Rodrigo Joaquín, 2016. *Correlación lineal y Regresión lineal simple*. consultado el 10 de septiembre de 2020.
7. Alicante, S., 2021. *DIFRACCIÓN DE RAYOS X*. Servicios Técnicos De Investigación. [online] Sstti.ua.es. Available at: <<https://sstti.ua.es/es/instrumentacion-cientifica/unidad-de-rayos-x/difraccion-de-rayos-x.html>> [Accessed 18 January 2021].
8. Andrade, C., d'Andréa, R., Castillo, A., & Castellote, M. (2009). *The Use of Electrical Resistivity as NDT Method for the Specification of the durability of Reinforced Concrete*. Centro de Seguridad y Durabilidad Estructural y de Materiales, Toulouse.
9. Andrade, C., & D'Andrea, R. (2011). *La resistividad eléctrica como parámetro de control del hormigón y de su durabilidad*. *Revista ALCONPAT*, 1(2), 90-98.
10. Andrade, C. (2018). *Design and evaluation of service life through concrete electrical resistivity*. *Revista ALCONPAT*, 8(3), 264-279.
11. Antiohos, S.K., Papadakis V.G.E. (2007). *Improving the performance of ternary blended cements by mixing different types of fly ashes*. *Cement and Concrete Research*, pp. 37, 877–885.
12. Arenas-Piedrahita, J. C., Montes-García, P., Mendoza-Rangel, J. M., Calvo, H. L., Valdez-Tamez, P. L., & Martínez-Reyes, J. (2016). *Mechanical and durability properties of mortars prepared with untreated sugarcane bagasse ash and untreated fly ash*. *Construction and Building Materials*, 105, 69-81.
13. Ashraf, M., Khan, A. N., Ali, Q., Mirza, J., Goyal, A., & Anwar, A. M. (2009). *Physico-chemical, morphological and thermal analysis for the combined pozzolanic activities of minerals additives*. *Construction and Building Materials*, 23(6), 2207-2213.
14. Ashrafian, A., Amiri, M. J. T., Rezaie-Balf, M., Ozbakkaloglu, T., & Lotfi-Omran, O. (2018). *Prediction of compressive strength and ultrasonic pulse velocity of fiber reinforced concrete incorporating nano silica using heuristic regression methods*. *Construction and Building Materials*, 190, 479-494.
15. Askarinejad, A., Pourkhorshidi, A. R., & Parhizkar, T. (2012). *Evaluation the pozzolanic reactivity of sonochemically fabricated nano natural pozzolan*. *Ultrasonics sonochemistry*, 19(1), 119-124.

16. Askeland, D. R. (1998). *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. International Thomson, 3° ed., cap. 6, Control de la microestructura y propiedades mecánicas de los materiales pp. 130-136.
17. ASTM C-125 (2004). *Standard terminology relating to concrete and concrete aggregates*. ASTM International.
18. ASTM C-150 (2018). *Standard Specification for Portland Cement*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
19. ASTM C-595 / C-595M – 18 (2018). *Standard Specification for Blended Hydraulic Cement*. ASTM International
20. ASTM C618-08a (2008). *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
21. Azarsa, P., & Gupta, R. (2017). *Electrical resistivity of concrete for durability evaluation: a review*. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2017.
22. Bagheri, A.R., Zanganeh, H., Moalemi, M.M. (2012). *Mechanical and durability properties of ternary concretes containing silica fume and low reactivity blast furnace slag*. *Cement & Concrete Composites*, pp. 34, 663–670.
23. Bajad M. N., Modhera C. D. & A. K. Desai (2011). *Effect of Glass on Strength of Concrete Subjected to Sulphate Attack*. *International Journal of Civil Engineering Research and Development (IJCERD)*, vol. 1, pp. 1-13,
24. Barbhuiya, S. A., Gbagbo, J. K., Russell, M. I., & Basheer, P. A. M. (2009). *Properties of fly ash concrete modified with hydrated lime and silica fume*. *Construction and Building Materials*, pp. 23(10), 3233-3239.
25. Barger, G. S., Hill, R. L., Ramme, B. W., Bilodeau, A., Hooton, R. D., Ravina, D., ... & Jensen, J. S. (2003). *Use of Fly Ash in Concrete*. American Concrete Institute: Farmington Hills, MI, USA.
26. Beall, C., Jaffe, R. (2003). *Concrete and Masonry Databook*. (pp: 2.8). McGraw-Hill.
27. Beer, P., & Johnston, R. (2007). *Mecánica de materiales*. Cuarta edición. Pp 189-191.
28. Berkeley University. *Understanding Science, how science really works*.
https://undsci.berkeley.edu/article/0_0_0/dna_04 Consultado el 15/11/2018
29. Breyse, D. (2012). *Nondestructive evaluation of concrete strength: An historical review and a new perspective by combining NDT methods*. *Construction and Building Materials*, 33, 139-163.
30. Brindhalakshmi, M. L., Kayalvizhi, T., & Gunasekar, S. (2019). *Potential Utilization of Sugarcane Bagasse Ash (Scba) In Concrete—An Experimental Review*. *International Research Journal of Multidisciplinary Technovation*, 1(6), 475-479.
31. Cabrera, J. G., & Plowman, C. (1980). *The influence of pulverized fuel ash on the early and long term strength of concrete*. In *Proceedings of 7th International Congress on the Chemistry of Cement*, Paris (Vol. 3, No. S IV, pp. 84-92).
32. Callister, W. D. Jr. (2009). *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales* (Vol. 1). Reverté.
33. CANACEM, 2020. *Cemento y productos a base de cemento*.
<https://canacem.org.mx/reporte-de-fabricacion/> Consultado el 07/04/2020.

34. National Research Council Canada. (1977). Non-Destructive Testing of Concrete. Canadian Building Digest Division of Building Research. (p. 3).
35. Castillo, R., Fernández, R., Antoni, M., Alujas, A., Scrivener, K. & Martirena, J. F. (2010). Activación de arcillas de bajo grado a altas temperaturas. *Revista Ingeniería de Construcción*.
36. Castaldelli, V. N., Akasaki, J. L., Melges, J. L., Tashima, M. M., Soriano, L., Borrachero, M. V., ... & Payá, J. (2013). Use of slag/sugar cane bagasse ash (SCBA) blends in the production of alkali-activated materials. *Materials*, 6(8), 3108-3127.
37. Celik, K., Jackson, M. D., Mancio, M., Meral, C., Emwas, A.-H., Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). High-volume natural volcanic pozzolan and limestone powder as partial replacements for portland cement in self-compacting and sustainable concrete. *Cement and Concrete Composites*, 45, 136–147.
38. CemNet, 2017, International Cement Review, <https://www.cemnet.com/> revisado 27/11/2020.
39. Chang, T. P., Lin, H. C., Chang, W. T., & Hsiao, J. F. (2006). Engineering properties of lightweight aggregate concrete assessed by stress wave propagation methods. *Cement and Concrete Composites*, 28(1), 57-68.
40. Chen, C., Habert, G., Bouzidi, Y., & Jullien, A. (2010). Environmental impact of cement production : detail of the different processes and cement plant variability evaluation. *Journal of Cleaner Production*, 18(5), 478-485.
41. Chikhalikar S. & Tande S. (2012). An Experimental Investigation on Characteristic Properties of Fibre Reinforced Concrete Containing Waste Glass Powder as Pozzolan. In 37th Conference on “Our world in concrete & structures”, Singapore.
42. Chindaprasirt, P., Homwuttiwong, S., & Jaturapitakkul, C. (2007). Strength and water permeability of concrete containing palm oil fuel ash and rice husk–bark ash. *Construction and Building Materials*, 21(7), 1492-1499.
43. Chusilp, N., Jaturapitakkul, C., & Kiattikomol, K. (2009). Utilization of bagasse ash as a pozzolanic material in concrete. *Construction and Building Materials*, 23(11), 3352-3358.
44. Chusilp^a, N., Jaturapitakkul, C., & Kiattikomol, K. (2009). Effects of LOI of ground bagasse ash on the compressive strength and sulfate resistance of mortars. *Construction and Building Materials*, 23(12), 3523-3531.
45. CNIAA, 2020. Cámara Nacional de las Industrias Azucarera y Alcoholera. <http://www.cniaa.mx/Ingenios> Visitado el 06/07/2020.
46. CNS Electronics, a Division of Fulton Group Limited, Operating Manual of Portable Ultrasonic Non–Destructive Digital Indicating Tester, PUNDIT 6, HUMBOLDT Mod. H– 2853^a.
47. Comões A. (2002). High performance concrete incorporating fly ash. PhD Thesis, University of Minho.
48. CONADESUCA, 2020. Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar, 6to. Informe estadístico del sector agroindustrial de la caña de azúcar en México, zafra 2009-2010 / 2018-2019. Consultado el 15 de abril de 2020. https://siiba.conadesuca.gob.mx/Archivos_Externos/6to_informe_estad%C3%ADstico.pdf

49. Cordeiro, G.C., Toledo-Filho, R.D., Tavares, L.M. & Fairbairn, E.M.R. (2008). Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars. *Cement & Concrete Composites*, pp. 30, 410–418.
50. Cordeiro, G.C., Toledo, R. F and Fairbairn E. (2009). "Effect of Calcination Temperature on the Pozzolanic Activity of Sugar Cane Bagasse Ash". *International Construction and Building Materials*, Vol. 23, No. 10, pp. 3301-3303.
51. Cordeiro, G. C., Toledo Filho, R. D., Tavares, L. M., Fairbairn, E. D. M. R., & Hempel, S. (2011). Influence of particle size and specific surface area on the pozzolanic activity of residual rice husk ash. *Cement and Concrete Composites*, 33(5), 529-534.
52. Dang, L.C., Hasan, H., Fatahi, B., Jones, R. and Khabbaz, H. (2016). "Enhancing the Engineering Properties of Expansive Soil using Bagasse Ash and Hydrated Lime". *International Journal of GEOMATE*, Vol. 11, No. 25, pp. 2447-2454.
53. De Guzmán, D. S. (2001). Tecnología del concreto y del mortero. Pontificia Universidad Javeriana, pp. 96-101.
54. De Larrard F. (1999). Concrete Mixture Proportioning: a Scientific Approach. Editado por Taylor & Francis, Primera Edición.
55. Demirboğa, R., Türkmen, İ., & Karakoc, M. B. (2004). Relationship between ultrasonic velocity and compressive strength for high-volume mineral-admixed concrete. *Cement and concrete research*, 34(12), 2329-2336.
56. Detwiler, R.I y Metha, PK. 1989. Efectos químicos y físicos de la extracción de sílice en el comportamiento mecánico del concreto.
57. Detwiler, R. J., Fapohunda, C. A., & Natale, J. (1994). Utilización de materiales complementarios de cementación para aumentar la resistencia a la penetración del ion cloruro de concretos curados a temperaturas elevadas.
58. Dinakar, P., Babu, K. G., & Santhanam, M. (2007). Corrosion behaviour of blended cements in low and medium strength concretes. *Cement and Concrete Composites*, 29(2), 136-145.
59. Djamila, B., & Mohamed, G. (2018). The use of non-destructive tests to estimate Self-compacting concrete compressive strength. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 149, p. 01036). EDP Sciences.
60. Dotto, J. M. R., De Abreu, A. G., Dal Molin, D. C. C., & Müller, I. L. (2004). Influence of silica fume addition on concretes physical properties and on corrosion behaviour of reinforcement bars. *Cement and concrete composites*, 26(1), 31-39.
61. Du, H., & Tan, K. H. (2017). Properties of high-volume glass powder concrete. *Cement and concrete composites*, pp. 75, 22-29.
62. Duran Herrera, N. P., & Velasquez Amado, N. O. R. E. X. Y. (2016). Evaluación de la aptitud de concretos, reemplazando parcialmente el cemento portland por cenizas volantes y cenizas de bagazo de caña de azúcar (Doctoral dissertation).
63. El-Enein, S. A., Kotkata, M. F., Hanna, G. B., Saad, M., & Abd El Razeq, M. M. (1995). Electrical conductivity of concrete containing silica fume. *Cement and concrete research*, 25(8), 1615-1620.

64. Erdem, T. K., & Kirca, Ö. (2008). Use of binary and ternary blends in high strength concrete. *Construction and Building Materials*, 22(7), 1477-1483.
65. Estrada M., Alonso E., Chávez L. E., Chávez H. L., Martínez W., Rubio J. C. & Velasco F. Ávalos M. (2005). Hidratación del cemento Portland, fase Etringita; Monosulfatos y Trisulfatos. Primer foro académico de la DES de ingenierías y arquitectura de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo., 30 de noviembre al 2 de diciembre. Morelia, Michoacán, México.
66. Fajun, W., Grutzeck, M. W., & Roy, D. M. (1985). The retarding effects of fly ash upon the hydration of cement pastes: The first 24 hours. *Cement and Concrete Research*, 15(1), 174-184.
67. Febelcem v.z.w. (2006). Environmental report of the Belgian cement industry 2006 (in French). Brussels: Febelcem v.z.w.
68. FHWA, Federal Highway Administration (2006). Petrographic methods of examining hardened concrete: A petrographic manual. Publication number FHWA-HRT-04-150.
69. Flores Vivián, I. (2009). Obtención de nanopartículas de SiO₂ y su efecto en las propiedades microestructurales, mecánicas y reológicas en materiales cementantes (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León).
70. Franco-Luján, V. A., Maldonado-García, M. A., Mendoza-Rangel, J. M., & Montes-García, P. (2019). Chloride-induced reinforcing steel corrosion in ternary concretes containing fly ash and untreated sugarcane bagasse ash. *Construction and Building Materials*, 198, 608-618.
71. Ganesan, K., Rajagopal, K., & Thangavel, K. (2007). Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material. *Cement and concrete composites*, 29(6), 515-524.
72. García, M. P. L. (2001). Influencia de dos tipos de cenizas volantes españolas en la microestructura y durabilidad de la pasta de cemento Portland hidratado. Universidad Complutense de Madrid, Servicio de Publicaciones.
73. Gartner, E. M., Young, J. F., Damidot, D. A., & Jawed, I. (2002). Hydration of Portland cement. *Structure and performance of cements*, 2, 57-113.
74. Giraldo M., M., & Tobón, J. (2006). Evolución mineralógica del cemento Portland durante el proceso de hidratación. *DYNA*, 73(148), 69-82. Recuperado de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/794/1245>
75. Güçlüer, K. (2020). Investigation of the effects of aggregate textural properties on compressive strength (CS) and ultrasonic pulse velocity (UPV) of concrete. *Journal of Building Engineering*, 27, 100949.
76. Guilbeault, S. (2011). Du béton de verre dans la maison du développement durable. *La maison du 21e siècle*, pp.1.
77. Hamid, R., Yusof, K. M., & Zain, M. F. M. (2010). A combined ultrasound method applied to high performance concrete with silica fume. *Construction and Building Materials*, 24(1), 94-98.
78. Heidrich, C., Feuerborn, H. J., & Weir, A. (2013, April). Coal combustion products: a global perspective. In *World of coal ash conference* (pp. 22-25).

79. Hemalatha, T., & Ramaswamy, A. (2017). A review on fly ash characteristics—Towards promoting high volume utilization in developing sustainable concrete. *Journal of cleaner production*, pp. 147, 546-559.
80. Hendriks, C. A., Worrell, E., De Jager, D., Blok, K., & Riemer, P. (1998, August). Emission reduction of greenhouse gases from the cement industry. In *Proceedings of the fourth international conference on greenhouse gas control technologies* (pp. 939-944). Interlaken, Austria, IEA GHG R&D Programme.
81. Hernández Toledo, U. I. (2010). Efecto de una puzolana de desperdicio agrícola y el tiempo de curado en la corrosión del ferrocemento.
82. Hewlett, P.C. (2001), “Lea’s Chemistry of Cement and Concrete (fourth edition)”, Ed. Butterworth-Heinemann, Oxford-England pp.
83. Hewlett, P., & Dhir, R. (2014). A critical review of service life modelling of concretes exposed to chlorides. In *Concrete in the Service of Mankind* (pp. 724-735). CRC Press.
84. Humphreys, K., & Mahasenan, M. (2002). Substudy 8: climate change. Battelle. *Toward a sustainable cement industry. 8: Climate change*. Geneva: WBCSD.
85. Idir, R., Cyr, M. & Tagnit-Hamou, A. (2010). Use of fine glass as ASR inhibitor in glass aggregate mortars. *Construction and Building Materials*, pp. 24(7), 1309–1312.
86. INECC (2017). “Rutas de instrumentación de las contribuciones nacionalmente determinadas en materia de mitigación de emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero (GYCEI) del sector Industria en México”. Consultado el 07/04/2020 http://www.data.sedema.cdmx.gob.mx/cambioclimaticocdmx/images/biblioteca_cc/Proyecto_Rene_Mors.pdf
87. Inkson, B. J. (2016). Scanning electron microscopy (SEM) and transmission electron microscopy (TEM) for materials characterization. In *Materials characterization using nondestructive evaluation (NDE) methods* (pp. 17-43).
88. *International cement Review* (2017). *The Global Cement Report* (Twelfth Edition ed.). (T. Armstrong, M. Bal, P. Bell, D. Bowers, H. Choksy-Evans, J. Fernandez, Starbuck, Eds.) Dorking Unites Kingdom: Tradeship Publications Ltd.
89. Jadhav, R., & Debnath, N. C. (2011). Computation of X-ray powder diffractograms of cement components and its application to phase analysis and hydration performance of OPC cement. *Bulletin of Materials Science*, 34(5), 1137-1150.
90. Jagadesh, P., Ramachandramurthy, A., & Murugesan, R. (2018). Evaluation of mechanical properties of Sugar Cane Bagasse Ash concrete. *Construction and Building Materials*, 176, 608-617.
- Jenkins, R., & Snyder, R. L. (1996). *Introduction to X-ray Powder Diffractometry* (Volume 138). NY, John Wiley & Sons.
91. Jain, A. & Pawade, P. Y. (2015). Characteristics of Silica Fume Concrete. *International Journal of Computer Applications*
92. Jilavenkatesa, A., Dapkunas, S. J., & Lin-Sien, H. L. (2001). NIST recommended practice guide special publication 960-1 particle size characterization.
93. Jiménez-Quero, V. G., Ortiz-Guzmán, M., & Montes-García, P. (2019, June). Durability of mortars containing sugarcane bagasse ash. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1221, No. 1, p. 012004). IOP Publishing.

94. Jin, W., Meyer, C., & Baxter, S. (2000). " Glascrete"-Concrete with Glass Aggregate. *ACI Materials Journal*, 97(2), 208-213.
95. Josa, A., Aguado, A., Heino, A., Byars, E., & Cardim, A. (2004). Comparative analysis of available life cycle inventories of cement in the EU. *Cement and Concrete Research*, 34(8), 1313-1320.
96. Joshi R.C., Lohtia R.P. (1997). Fly ash in concrete: production properties and uses. *Advances and Concrete Technology* (V.M. Malhot ed.) Vol. 2, Gordon and Breach Science Publishers, pp. 269, Ottawa Ontario, Canada.
97. Kadri E.-H., R. Duval, S. Anggoun & S. Kenai. (2009). Silica Fume Effect on Hydration Heat and Compressive Strength on High-Performance Concrete. *ACI Materials Journal*, Vols. March-April 2009, no. 106-M13, pp. 107-113.
98. Kaplan, M. F. (1958). Compressive strength and ultrasonic pulse velocity relationships for concrete in columns. In *Journal Proceedings* (Vol. 54, No. 2, pp. 675-688).
99. Khan, A. G., & Khan, B. (2016). Effect of partial replacement of cement by mixture of glass powder and silica fume upon concrete strength. *International Journal of Engineering Works*, 4(7), 124-135.
100. Khayat, K. H. (1998). Use of viscosity-modifying admixture to reduce top-bar effect of anchored bars cast with fluid concrete. *Materials Journal*, 95(2), 158-167.
101. KNOEMA atlas, 2020. Consultado el 15 de abril de 2020.
<https://knoema.com/atlas/topics/Agriculture/Crops-Production-Quantity-tonnes/Sugar-cane-production>
102. Kirk, S., & Zuleta, R. (2000). A study of the volcanic ash originating from Mount Pinatubo, Philippines. *Public Works*.
103. Kosmatka S. H. & Wilson M. L. (2011). *Design and Control of Concrete Mixtures*. 15th edition, 15th ed., Portland Cement Assn.
104. Krautkrämer, J., & Krautkrämer, H. (2013). *Ultrasonic testing of materials*. Springer Science & Business Media. Koleva, D. A., Copuroglu, O., Van Breugel, K., Ye, G., & De Wit, J. H. W. (2008). Electrical resistivity and microstructural properties of concrete materials in conditions of current flow. *Cement and Concrete Composites*, 30(8), 731-744.
105. Kumar, S., Srivastava, V., & Agarwal, V. C. (2015). Utilization of fly ash and lime in PPC concrete. *International Journal of Engineering and Technical Research (IJETR)*, vol 3, no. Issue 10, pp. 121-124.
106. Kumar, R. , Dhaka, J. (2016). Review paper on partial replacement of cement with silica fume and its effects on concrete properties. *International Journal for Technological Research in Engineering*. 4,(1).
107. Kurdowski, W. (2014). *Cement and concrete chemistry*. Springer Science & Business, chap 4, pp 214
108. Lagerblad, B. (2005). *Carbon dioxide uptake during concrete life cycle: State of the art*. Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute.

109. Lawrence, P., Cyr, M., & Ringot, E. (2003). Mineral admixtures in mortars: effect of inert materials on short-term hydration. *Cement and concrete research*, 33(12), 1939-1947.
110. Lawson, I., Danso, K. A., Odoi, H. C., Adjei, C. A., Quashie, F. K., Mumuni, I. I., & Ibrahim, I. S. (2011). Non-destructive evaluation of concrete using ultrasonic pulse velocity. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 3(6), 499-504.
111. Le, D. H., Sheen, Y. N., & Lam, M. N. T. (2018). Fresh and hardened properties of self-compacting concrete with sugarcane bagasse ash–slag blended cement. *Construction and Building Materials*, 185, 138-147. Liu, Y., & Presuel-Moreno, F. (2014). Effect of Elevated Temperature Curing on Compressive Strength and Electrical Resistivity of Concrete with Fly Ash and Ground-Granulated Blast-Furnace Slag. *ACI Materials Journal*, 111(5).
112. Li, Z. (2011). *Advanced concrete technology*. John Wiley & Sons, pp. 210-230.
113. Lorenzo, P., Gñoni, S., Hernandez, S., & Guerrero, A. (1996). Effect of fly ashes with high total alkali content on the alkalinity of the pore solution of hydrated Portland cement paste. *Journal of the American Ceramic Society*, 79(2), 470-474.
114. Lübeck, A., Gastaldini, A. L. G., Barin, D. S., & Siqueira, H. C. (2012). Compressive strength and electrical properties of concrete with white Portland cement and blast-furnace slag. *Cement and Concrete Composites*, 34(3), 392-399.
115. McCarter, W. J., Stars, G., & Chrisp, T. M. (2000). Electrical conductivity, diffusion, and permeability of Portland cement-based mortars. *Cement and Concrete Research*, 30(9), 1395-1400.
116. Madhavi, T. C., & Annamalai, S. (2006). Electrical conductivity of concrete. *ARPN J. Eng. Appl. Sci*, 11(9), 5979.
117. Malhotra, V. M., & Carino, N. J. (2003). *Handbook on nondestructive testing of concrete*. CRC press.
118. Makul, N., & Sua-iam, G. (2016). Characteristics and utilization of sugarcane filter cake waste in the production of lightweight foamed concrete. *Journal of cleaner production*, 126, 118-133.
119. Maldonado-García, M. A., Hernández-Toledo, U. I., Montes-García, P., & Valdez-Tamez, P. L. (2018). The influence of untreated sugarcane bagasse ash on the microstructural and mechanical properties of mortars. *Materiales de Construcción*, 68(329), 148.
120. Marceau, M.L., Gajda, J. and VanGeem, M.G. (2002). Use of Fly Ash in Concrete: Normal and High-Volume Ranges. PCA R&D Serial No. 2604, Portland Cement Association, Skokie.
121. Martirena, J. F. (2003). Una alternativa ambientalmente compatible para disminuir el consumo de aglomerante de clínker de cemento Pórtland: el aglomerante cal-puzolana como adición mineral activa. Tesis de Doctorado, Universidad Central de Las Villas (UCLV).

122. MATEST <http://www.matest.com/en/product/c378n-chloride-ion-penetration-meter> Consultado el 20 de noviembre de 2019.
123. Medeiros-Junior, R. A., & Lima, M. G. (2016). Electrical resistivity of unsaturated concrete using different types of cement. *Construction and Building Materials*, 107, 11-16.
124. Mehta, P. K. (1983). Pozzolanic and cementitious byproducts as mineral admixtures for concrete-a critical review. *Special Publication*, 79, 1-46.
125. Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. (2006). *Microstructure and properties of hardened concrete*. Concrete: Microstructure, properties and materials.
126. Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. (2017). *Concrete microstructure, properties and materials*.
127. Melgarejo, J. C., Proenza, J. A., Galí, S., & Llovet, X. (2010). Técnicas de caracterización mineral y su aplicación en exploración y explotación minera. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 62(1), 1-23.
128. Menéndez, G., Bonavetti, V. L., & Irassar, E. F. (2007). Hormigones con cementos compuestos ternarios. Parte III: optimización por multicriterios. *Materiales de construcción*, 57(286), 19-28.
129. Meyer, C. (2008). *Recycled materials in concrete. Developments in the formulation and reinforcement of concrete*. Inglaterra, Woodhead Publishing Limited. pp. 208-230.
130. Mincomercio (2019). <https://www.colombiaproductiva.com/ptp-capacita/publicaciones/sectoriales/publicaciones-industrias-para-la-construccion/presentacion-construccion-plan-de-negocios-sector/plan-de-negocio-industria-construccion161219-v-f> Visitado 05/12/2020.
131. Mocaer, E. (2011). *Etude de materiaux alternatifs pour des betons ecologiques*. Rapport de stage, IFSTTAR département matériaux, Paris - Université de Sherbrooke, département génie civil, pp. 1-46.
132. Molina O. (2008). *La influencia de las cenizas volantes como sustituto parcial del cemento Pórtland en la durabilidad del hormigón*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Escuela técnica superior de Ingenieros de caminos, canales y puertos. pp.310.
133. Moragues T. Amparo., 2018. *Procesos de hidratación del cemento Portland y microestructura del hormigón*. E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid. Consultado 19 de noviembre 2018. <http://prt2.uprm.edu/Microestructura.pdf>
134. Mucteba, U., Kemalettin, Y. (2011). Effect of mineral admixtures on properties of selfcompacting concrete. *Cement & Concrete Composites*, 33, 771–776.
135. Mullick, A. K. (2007). Performance of concrete with binary and ternary cement blends. *Indian concrete journal*, 81(1), 15.
136. National Research Council of Canada. Division of Building Research, & Feldman, R. F. (1977). *Non-destructive testing of concrete*.
137. Nemerow, N. L. (1998). *Tratamiento de vertidos industriales y peligrosos (Vol. 3)*. Ediciones Díaz de Santos, pp. 718-731.

138. Neville, A., “Tecnología del Concreto” (1995), Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C., Cap. 2 Materiales cementantes de diferentes tipos. pags. 57-60, Cap. 5 Aditivos. pags. 176-181, Cap. 10 Durabilidad del concreto, pag. 337 y Cap. 13 Concretos con diferentes materiales cementantes pags. 455-473. Pag, 220, pag 418, Cap.12, pag 441-443.
139. Nilson, A. H., Winter, G., Urquhart, L. C., & Charles Edward, O. R. (2009). Diseño de estructuras de concreto. Distrito Federal, México: McGraw-Hill, pp. 66-72.
140. Nuntachai , C., Chai , J., & Kraiwood , K. (2009). Utilization of bagasse ash as a pozzolanic material in concrete. *Construction and Building Materials*, 23, 3352–3358.
141. Ortíz-Lozano, J.A. (2005). Estudio experimental sobre la influencia de la temperatura ambiental en la resistencia del hormigón preparado. Tesis de doctorado, Universidad Politécnica de Catalunya. Departamento de ingeniería de la construcción.
142. Oss, B. H. G. Van. (2010). 2007 Minerals Yearbook, Strontium, USGS, science for a changing world.
143. Owaid, H. M., Hamid, R. B., & Taha, M. R. (2017). Variation of Ultrasonic Pulse Velocity of multiple-blended binders concretes incorporating thermally Activated Alum Sludge Ash. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 21(4), 1235-1246.
144. Panzera, T. H., Christoforo, A. L., Cota, F. P., Borges, P. R., & Bowen, C. R. (2011). Ultrasonic pulse velocity evaluation of cementitious materials. *Adv. Compos. Mater. -Anal. Nat. man-made Mater*, 17, 411-436.
145. Pierre-Claude Aïtcin and Sidney Mindess (2011).: “Sustentability of concrete”. ed. Spoon press, Massachusetts, pp. 1-6.
146. Plantz Philip E. (2008). Particle size measurement of cement by laser diffraction using Microtrac S3500, application note SL-AN-26 Rev A. Microtrac Inc. <http://www.sun-way.com.tw/Files/DownloadFile/Cement-S3500.pdf> Consultado 03 de noviembre 2018.
147. Pike, R.G., Hubbard, D. & Newman E. S. (1960). Binary silicate glasses in the study of alkali aggregate reaction. *Highway Research Board Bulletin*, pp.275, 39–44.
148. Polder R.B. (1995). Chloride diffusion and resistivity testing of five concrete mixes for marine environment. *Proc. RILEM. International Workshop on Chloride Penetration into Concrete*. pp. 255-233.
149. Polder, R. B. (2001). Test methods for onsite measurement of resistivity of concrete—a RILEM TC-154 technical recommendation. *Construction and building materials*, 15(2-3), 125-131.
150. Popovics, S. (2005). Effects of uneven moisture distribution on the strength of and wave velocity in concrete. *Ultrasonics*, 43(6), 429-434.
151. Radlinski, M., & Olek, J. (2012). Investigation into the synergistic effects in ternary cementitious systems containing portland cement, fly ash and silica fume. *Cement and Concrete Composites*, 34(4), 451–459.

152. Ramachandran, V. S., & Beaudoin, J. J. (2000). Handbook of analytical techniques in concrete science and technology: principles, techniques and applications. Elsevier.
153. Ramezaniapour, A. A., Pilvar, A., Mahdikhani, M., & Moodi, F. (2011). Practical evaluation of relationship between concrete resistivity, water penetration, rapid chloride penetration and compressive strength. *Construction and Building Materials*, 25(5), 2472-2479.
154. Ramezaniapour, A. A. (2014), *Cement Replacement Materials: Properties, Durability, Sustainability*, chapter 2, ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp.73.
155. Rao, S. K., Sravana, P., & Rao, T. C. (2016). Experimental studies in ultrasonic pulse velocity of roller compacted concrete containing GGBS and M-sand. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11(3).
156. Rendon Belmonte, M., Martinez Perez, R. V., & Martinez Madrid, M. (2020). Concretos híbridos durables y sustentables con contenidos de ceniza volante activada y cemento portland tipo cpc 40 rs. *Publicacion tecnica*, (583). <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt583.pdf> Revisada el 28 de /11/2020.
157. Rerkpiboon, A., Tangchirapat, W., & Jaturapitakkul, C. (2015). Strength, chloride resistance, and expansion of concretes containing ground bagasse ash. *Construction and building materials*, 101, 983-989.
158. Riad, M. Y., Shoukry, S., Sosa, E., & William, G. (2011). Prediction of concrete initial setting time in field conditions through multivariate regression analysis. *Materials and structures*, 44(6), 1063-1077.
159. Ribeiro, D. V., & Morelli, M. R. (2014). Effect of calcination temperature on the pozzolanic activity of Brazilian sugar cane bagasse ash (SCBA). *Materials Research*, 17(4), 974-981.
160. Ríos-Parada, V., Jiménez-Quero, V. G., Valdez-Tamez, P. L., & Montes-García, P. (2017). Characterization and use of an untreated Mexican sugarcane bagasse ash as supplementary material for the preparation of ternary concretes. *Construction and Building Materials*, 157, 83-95.
161. Rodríguez, G. M., & Bonal, C. R. (2002). XXI Congreso Nacional de Ensayos no Destructivos. El contenido de agua en el concreto y su incidencia sobre el valor de la velocidad de pulso ultrasónico.
162. Rosell-Lam, M., Villar-Cociña, E., & Frías, M. (2011). Study on the pozzolanic properties of a natural Cuban zeolitic rock by conductometric method: Kinetic parameters. *Construction and Building Materials*, 25(2), 644-650.
163. Rukzon, S., & Chindaprasirt, P. (2012). Utilization of bagasse ash in high-strength concrete. *Materials & Design*, 34, 45-50.
164. Sabbağ, N., & Uyanık, O. (2017). Prediction of reinforced concrete strength by ultrasonic velocities. *Journal of Applied Geophysics*, 141, 13-23.

165. Saifuddin, M., & Majiduddin, M. (2015) Experimental study on behaviour of fiber reinforced ternary blended concrete using different tests. *International Journal of Engineering Sciences & Research Technology, IJESRT*.
166. Saint-Pierre, F., Philibert, A., Giroux, B., & Rivard, P. (2016). Concrete quality designation based on ultrasonic pulse velocity. *Construction and Building Materials*, 125, 1022-1027.
167. Saleem, M., Shemeem, M., Hussain, S. E. and Maslehuddin, M. (1996) —Effect of Moisture, Chloride and Sulfate Contamination on the Electrical Resistivity of Portland Cement Concrete. *Construction and Building Materials*, V. 10, No. 3, 1996, pp: 209-212.
168. Samaha, H. R., & Hover, K. C. (1996). Influence of microcracking on the mass transport properties of concrete. *Materials Journal*, 89(4), 416-424.
169. Sánchez de Rojas Gómez, M. I., & Frías Rojas, M. (2013). Natural pozzolans in eco-efficient concrete. *Eco-Efficient Concrete*, 83–104.
170. Sánchez de Rojas Gómez, M. I., & Frías Rojas, M. (2013a). Artificial pozzolans in eco-efficient concrete. *Eco-Efficient Concrete*, 83–104.
171. Santiago-Olivares, N., Padilla-Arriaga, R., & Martínez-Orozco, E. (2017). Estudio del nivel de concientización para la implementación de programa de separación de los
172. os sólidos urbanos en el municipio de Arandas, Jalisco. *Raximhai*, pp.13, 425-438.
173. Sarkar, S. L., Baalbaki, M., & Aitcin, P. C. (1991). Microstructural development in a high-strength concrete containing a ternary cementitious system. *Cement, concrete and aggregates*, 13(2), 81-87.
174. SEMARNAT (2013). Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Edición 2012. Semarnat. México. 2013.
175. Scai Uma (2021). Microscopía Electrónica De Barrido. [online] Available at: <<http://www.scai.uma.es/areas/micr/sem/sem.html>> [Accessed 19 January 2021].
176. Schneider, M., Romer, M., Tschudin, M. & Bolio, H. (2011). Sustainable cement production -present and future. *Cement and Concrete Research*, pp. 41.
177. Schwarz, N. & Neithalath, N., (2008). Influence of a fine glass powder on cement hydration: Comparison to fly ash and modeling the degree of hydration. *Cement and Concrete Research*, pp. 38, 429–436.
178. Scrivener, K. L. & Kirkpatrick, R. J. (2008). Innovation in use and research on cementitious material. *Cement and Concrete Research*. pp.38, 128–136.
179. Shao, Y., Lefort, T., Moras, S., Rodriguez, D. (2000). Studies on concrete containing ground waste glass. *Cement and Concrete Research*, pp. 30, 91–100.
180. Shehata, M. H., Thomas, M. D., & Bleszynski, R. F. (1999). The effects of fly ash composition on the chemistry of pore solution in hydrated cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 29(12), 1915-1920.
181. Shekhawat B. S. and Aggarwal D. V. (2014). Utilisation of Waste Glass Powder in Concrete - A Literature Review. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, vol. Vol. 3, no. Issue 7, pp. 14822-14826.
182. Shoukry, S. N., William, G. W., Downie, B., & Riad, M. Y. (2011). Effect of

- moisture and temperature on the mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 25(2), 688-696.
183. Smith, W. F., Hashemi, J., Nagore Cázares, G., & González Caver, P. A. (2006). *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales* (No. 691). McGraw-Hill, pp. 218.
184. Solis-Carcaño, R., & Moreno, E. I. (2008). Evaluation of concrete made with crushed limestone aggregate based on ultrasonic pulse velocity. *Construction and Building Materials*, 22(6), 1225-1231.
185. Stark, J. (2011). Recent advances in the field of cement hydration and microstructure analysis. *Cement and concrete research*, 41(7), 666-678. vol. 41, pp. 666-678
186. Tantawy, M. A., El-Roudi, A. M., & Salem, A. A. (2012). Immobilization of Cr (VI) in bagasse ash blended cement pastes. *Construction and Building Materials*, 30, 218-223.
187. Taylor, H. F. W. (1971) *La química de los cementos*. Ediciones Urmo, C/ Espartero, 10, Bilbao, España, vol. II., cap. 14, pp. 41-44.
188. IMCC. (2004). *Conceptos Básicos del Concreto*. [online] Available at: <<https://tecnologadelconcreto.weebly.com/concepto-de-concreto-hidraacuteculico.html>> [Accessed 19 January 2021].
189. Tharmaratnam, K., & Tan, B. S. (1990). Attenuation of ultrasonic pulse in cement mortar. *Cement and Concrete research*, 20(3), 335-345.
190. Tie-jun, Z., Xin-qi, M., y Folker, H. W., “Restrained Drying and Crack Formation of Strain Hardening Cement-Based Composites”, (2006), Eighth International Symposium and Workshop on Ferrocement and Thin Reinforced Cement Composites, pags. 549- 559.
191. Thomas, M., Hopkins, D.S., Perreault, M., Cail K. (2007). “Ternary Cement in Canada: Factory blends allow widespread application”. *Concrete international*, pp. 59-64.
192. Thomas, M. D. A. (2007) “Optimizing the use of fly ash in concrete”. PCA IS548. Portland Cement Association.
193. Topçu, İ. B., Uygunoğlu, T., & Hocoğlu, İ. (2012). Electrical conductivity of setting cement paste with different mineral admixtures. *Construction and Building Materials*, 28(1), 414-420.
194. Uysal, H., Dem Heidrich irboğa, R., Şahin, R., & Gül, R. (2004). The effects of different cement dosages, slumps, and pumice aggregate ratios on the thermal conductivity and density of concrete. *Cement and concrete research*, 34(5), 845-848.
195. Van den Heede, P., & De Belie, N. (2012). Environmental impact and life cycle assessment (LCA) of traditional and ‘green’ concretes: literature review and theoretical calculations. *Cement and Concrete Composites*, 34(4), 431-442.
196. Uysal, H., Demirboğa, R., Şahin, R., & Gül, R. (2004). The effects of different cement dosages, slumps, and pumice aggregate ratios on the thermal conductivity and density of concrete. *Cement and concrete research*, 34(5), 845-848.
197. Valdez, P., Durán, A., Rivera, J. y Juárez, C. (2007) *Concretos fluidos con altos volúmenes de ceniza volante*. Ciencia UANL, México, vol. X, No. 1, enero -marzo 2007.

198. Wang, C. C., & Wang, H. Y. (2017). Assessment of the compressive strength of recycled waste LCD glass concrete using the ultrasonic pulse velocity. *Construction and Building Materials*, 137, 345-353.
199. Williamson, R. B. (1968). Constitutional supersaturation in Portland cement solidified by hydration. *Journal of Crystal Growth*, pp. 787-794.
200. Yu, J., Mishra, D. K., Wu, C., & Leung, C. K. (2018). Very high-volume fly ash green concrete for applications in India. *Waste Management & Research*, 36(6), 520-526.

Anexos

Anexo 1. Subconjuntos homogéneos de la RC por edad

HSD Tukey ^{a,b,c}							
E	N	Subconjunto					
		1	2	3	4	5	6
7	20	16.1575					
14	20		20.4760				
28	20			24.2380			
56	20				26.8350		
90	16					29.3300	
180	20						33.7600
365	12						34.1208
Sig.		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	.999
Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos. Se basa en las medias observadas. El término de error es la media cuadrática (Error) = 4.564.							
a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 17.684.							
b. Los tamaños de grupo no son iguales. Se utiliza la media armónica de los tamaños de grupo. Los niveles de error de tipo I no están garantizados.							
c. Alfa = .05.							

Anexo 2. Subconjuntos homogéneos de la RC por mezcla

HSD Tukey ^{a,b}			
TM	N	Subconjunto	
		1	2
MB1	32	23.4934	
MT	32	24.3275	
MC	32		27.5916
MB2	32		27.9644
Sig.		.405	.898
Se basa en las medias observadas. Error es la media cuadrática (Error) = 4.564			
a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 32.000.			
b. Alfa = .05.			

Anexo 3. Subconjuntos homogéneos de la VPU por edad

HSD Tukey ^{a,b,c}						
EDAD	N	Subconjunto				
		1	2	3	4	5
7	144	4431.37				
14	124		4746.65			
28	91			4922.33		
56	84				5124.89	
90	64				5148.87	
180	20				5149.75	
365	20					5336.15
Sig.		1.000	1.000	1.000	.862	1.000
Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos. Se basa en las medias observadas. El término de error es la media cuadrática (Error) = 8613.941.						
a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 45.594.						
b. Los tamaños de grupo no son iguales. Se utiliza la media armónica de los tamaños de grupo. Los niveles de error de tipo I no están garantizados.						
c. Alfa = .05.						

Anexo 4. Subconjuntos homogéneos de la VPU por mezcla

HSD Tukey ^{a,b,c}					
TM	N	Subconjunto			
		1	2	3	4
MT	140	4737.79			
MB1	127		4807.45		
MB2	140			4869.39	
MC	140				4920.14
Sig.		1.000	1.000	1.000	1.000

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.
Se basa en las medias observadas.
El término de error es la media cuadrática (Error) = 8613.941.
a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 136.507.
b. Los tamaños de grupo no son iguales. Se utiliza la media armónica de los tamaños de grupo. Los niveles de error de tipo I no están garantizados.
c. Alfa = .05.

Anexo 5. Potencial de corrosión en concretos (CEB-192,1989)

Fuente	Rango de resistividad	Clasificación de corrosión
CEB-192	$\geq 20 \text{ k}\Omega\text{cm}$ 10 a 20 $\text{k}\Omega\text{cm}$ 5 a 10 $\text{k}\Omega\text{cm}$ $< 5 \text{ k}\Omega\text{cm}$	Velocidad de corrosión despreciable Velocidad de corrosión bajo Velocidad de corrosión alto Velocidad de corrosión muy alto

Anexo 6. Subconjuntos homogéneos de RE por Edad

HSD Tukey ^{a,b,c}								
EDAD	N	Subconjunto						
		1	2	3	4	5	6	7
7	128	1.5985						
14	128		2.4465					
28	128			3.9500				
56	96				6.9318			
90	64					11.1666		
180	64						26.0397	
365	64							49.1969
Sig.		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.
a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 86.710.
b. Los tamaños de grupo no son iguales. Se utiliza la media armónica de los tamaños de grupo. Los niveles de error de tipo I no están garantizados.
c. Alfa = .05.

Anexo 7. Subconjuntos homogéneos de RE por Tipo de Mezcla

HSD Tukey ^{a,b}					
TM	N	Subconjunto			
		1	2	3	4
MC	168	6.4604			
MB2	168		9.1682		
MB1	168			9.5493	
MT	168				17.7900
Sig.		1.000	1.000	1.000	1.000

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.
a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 168.000.
b. Alfa = .05.

Correlación VPU vs. RC para la MC

Anexo 2. Resumen del modelo para la MC.

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación
1	.982 ^a	.964	.957	1.36508

a. Predictores: (Constante), VPU_MC

Anexo 3. Resultados del ANOVA de la correlación para la MC

Modelo	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.	
1	Regresión	251.510	1	251.510	134.971	.000 ^b
	Residuo	9.317	5	1.863		
	Total	260.827	6			

a. Variable dependiente: RC_MC
b. Predictores: (Constante), VPU_MC

Anexo 4. Valores de los coeficientes de la ecuación propuesta para la MC.

Modelo	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.	
	B	Desv. Error	Beta			
1	(Constante)	-55.125	7.188		-7.669	.001
	VPU_MC	.016	.001	.982	11.618	.000

a. Variable dependiente: RC_MC

Correlación VPU vs. RC para la MB1

Anexo 5. Resumen del modelo para la MB1

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación
1	.918 ^a	.843	.811	2.66013

a. Predictores: (Constante), VPU_MB1

Anexo 6. Resultados del ANOVA de la correlación para la MB1

Modelo	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.	
1	Regresión	189.811	1	189.811	26.824	.004 ^b
	Residuo	35.381	5	7.076		
	Total	225.193	6			

a. Variable dependiente: RC_MB1
b. Predictores: (Constante), VPU_MB1

Anexo 7. Valores de los coeficientes de la ecuación propuesta para la MB1

Modelo	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.	
	B	Desv. Error	Beta			
1	(Constante)	-55.447	15.374		-3.606	.015
	VPU_MB1	.016	.003	.918	5.179	.004

a. Variable dependiente: RC_MB1

Correlación VPU vs. RC para la MB2

Anexo 8. Resumen del modelo para la MB2

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación
1	.889 ^a	.791	.749	3.16240

a. Predictores: (Constante), VPU_MB2

Anexo 9. Resultados del ANOVA de la correlación para la MB2

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	188.964	1	188.964	18.895	.007 ^b
	Residuo	50.004	5	10.001		
	Total	238.968	6			

a. Variable dependiente: RC_MB2

b. Predictores: (Constante), VPU_MB2

Anexo 10. Valores de los coeficientes de la ecuación propuesta para la MB2

Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.
		B	Desv. Error	Beta		
1	(Constante)	-101.903	30.002		-3.397	.019
	VPU_MB2	.026	.006	.889	4.347	.007

a. Variable dependiente: RC_MB2

Correlación VPU vs. RC para la MT

Anexo 11. Resumen del modelo de la MT

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación
1	.896 ^a	.804	.764	3.87588

a. Predictores: (Constante), VPU_MT

Anexo 12. Resultados del ANOVA de la correlación para la MT

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	307.267	1	307.267	20.454	.006 ^b
	Residuo	75.112	5	15.022		
	Total	382.379	6			

a. Variable dependiente: RC_MT

b. Predictores: (Constante), VPU_MT

Anexo 13. Valores de los coeficientes de la ecuación propuesta para la MT

Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.
		B	Desv. Error	Beta		
1	(Constante)	-87.565	24.950		-3.510	.017
	VPU_MT	.023	.005	.896	4.523	.006

a. Variable dependiente: RC_MT

Correlación RE vs. RC para la MC

Anexo 14. Resumen del modelo de la MC

R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación
.967	.934	.921	1.852

La variable independiente es RE_MC.

Anexo 15. Resultados del ANOVA de la correlación para la MC

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Regresión	243.683	1	243.683	71.069	.000
Residuo	17.144	5	3.429		
Total	260.827	6			

La variable independiente es RE_MC.

Anexo 16. Valores de los coeficientes de la ecuación propuesta para la MC

	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.
	B	Desv. Error	Beta		
ln(RE_MC)	6.178	.733	.967	8.430	.000
(Constante)	17.720	1.423		12.449	.000

Correlación RE vs. RC para la MB1

Anexo 17. Resumen del modelo de la MB1

R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación
.976	.952	.943	1.466

La variable independiente es RE_MB1.

Anexo 18. Resultados del ANOVA de la correlación para la MB1

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Regresión	214.441	1	214.441	99.727	.000
Residuo	10.751	5	2.150		
Total	225.193	6			

La variable independiente es RE_MB1.

Anexo 19. Valores de los coeficientes de la ecuación propuesta para la MB1

	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.
	B	Desv. Error	Beta		
ln(RE_MB1)	4.870	.488	.976	9.986	.000
(Constante)	14.445	1.106		13.056	.000

Correlación RE vs. RC para la MB2

Anexo 20. Resumen del modelo de la MB2

R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación
.953	.909	.890	2.089

La variable independiente es RE_MB2.

Anexo 21. Resultados del ANOVA de la correlación para la MB2

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Regresión	217.159	1	217.159	49.785	.001
Residuo	21.809	5	4.362		
Total	238.968	6			

La variable independiente es RE_MB2.

Anexo 22. Valores de los coeficientes de la Ecuación propuesta para la MB2

	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.
	B	Desv. Error	Beta		
ln(RE_MB2)	5.672	.804	.953	7.056	.001
(Constante)	16.931	1.808		9.365	.000

Correlación RE vs. RC para la MT

Anexo 23. Resumen del modelo de la MT

R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación
.985	.969	.963	1.530

La variable independiente es RE_MT.

Anexo 24. Resultados del ANOVA de la correlación para la MT

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Regresión	370.668	1	370.668	158.267	.000
Residuo	11.710	5	2.342		
Total	382.379	6			

La variable independiente es RE_MT.

Anexo 25. Valores de los coeficientes de la Ecuación propuesta para la MT

	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.
	B	Desv. Error	Beta		
ln(RE_MT)	5.290	.420	.985	12.580	.000
(Constante)	12.980	1.122		11.564	.000

Correlación VPU-RE vs. RC para la MC

Anexo 26. Resumen del modelo de la MC

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación	Estadísticos de cambio				
					Cambio en R cuadrado	Cambio en F	gl1	gl2	Sig. Cambio en F
1	.992 ^a	.984	.976	1.01660	.984	124.190	2	4	.000

a. Predictores: (Constante), VPU_MC, RE_MC
b. Variable dependiente: RC_MC

Anexo 27. Resultados del ANOVA de la correlación para la MC

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	256.694	2	128.347	124.190	.000 ^b
	Residuo	4.134	4	1.033		
	Total	260.827	6			

a. Variable dependiente: RC_MC
b. Predictores: (Constante), VPU_MC, RE_MC

Anexo 28. Valores de los coeficientes de la ecuación propuesta para la MC

Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados		95.0% intervalo de confianza B		Correlaciones			Estadísticas de colinealidad		
		B	Desv.	Beta	t	Sig.	Límite inferior	Límite superior	Orden cero	Parcial	Parte	Tolerancia	VIF
1	Constante	-41.815	7.999		-5.228	.006	-64.023	-19.607					
	RE_MC	.181	.081	.225	2.240	.089	-.043	.405	.853	.746	.141	.394	2.538
	VPU_MC	.013	.002	.807	8.049	.001	.009	.018	.982	.970	.507	.394	2.538

a. Variable dependiente: RC_MC

Correlación VPU-RE vs. RC para la MB1

Anexo 29. Resumen del modelo de la MB1

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación	Estadísticos de cambio				
					Cambio en R cuadrado	Cambio en F	g1	g2	Sig. Cambio en F
1	.963 ^a	.927	.891	2.02615	.927	25.427	2	4	.005
a. Predictores: (Constante), VPU_MB1, RE_MB1									
b. Variable dependiente: RC_MB1									

Anexo 30. Resultados del ANOVA de la correlación para la MB1

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	208.772	2	104.386	25.427	.005 ^b
	Residuo	16.421	4	4.105		
	Total	225.193	6			
a. Variable dependiente: RC_MB1						
b. Predictores: (Constante), VPU_MB1, RE_MB1						

Anexo 31. Valores de los coeficientes de la ecuación propuesta para la MB1

Coeficientes ^a														
Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.	95.0% intervalo de confianza para B		Correlaciones			Estadísticas de colinealidad		
		B	Desv. Error	Beta			Límite inferior	Límite superior	Orden cero	Parcial	Parte	Tolerancia	VIF	
1	Constante	-31.040	16.313		-1.903	.130	-76.332	14.251						
	RE_MB1	.187	.087	.424	2.149	.098	-.055	.429	.868	.732	.290	.467	2.139	
	VPU_MB1	.011	.003	.608	3.081	.037	.001	.020	.918	.839	.416	.467	2.139	
a. Variable dependiente: RC_MB1														

Correlación VPU-RE vs. RC para la MB2

Anexo 32. Resumen del modelo de la MB2

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación	Estadísticos de cambio				
					Cambio en R cuadrado	Cambio en F	g1	g2	Sig. Cambio en F
1	.890 ^a	.791	.687	3.52940	.791	7.592	2	4	.043
a. Predictores: (Constante), VPU_MB2, RE_MB2									
b. Variable dependiente: RC_MB2									

Anexo 33. Resultados del ANOVA de la correlación para la MB2

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	189.141	2	94.571	7.592	.043 ^b
	Residuo	49.827	4	12.457		
	Total	238.968	6			
a. Variable dependiente: RC_MB2						
b. Predictores: (Constante), VPU_MB2, RE_MB2						

Anexo 34. Valores de los coeficientes de la ecuación propuesta para la MB2

Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.	95.0% intervalo de confianza para B		Correlaciones			Estadísticas de colinealidad		
		B	Desv. Error	Beta			Límite inferior	Límite superior	Orden cero	Parcial	Parte	Tolerancia	VIF	
1	Constante	-108.592	65.313		-1.663	.172	-289.930	72.747						
	RE_MB2	-.029	.246	-.055	-1.119	.911	-.714	.655	.760	-.060	-.027	.243	4.109	
	VPU_MB2	.028	.014	.937	2.025	.113	-.010	.065	.889	.712	.462	.243	4.109	
a. Variable dependiente: RC_MB2														

Correlación VPU-RE vs. RC para la MT

Anexo 35. Resumen del modelo de la MT

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar estimación	Estadísticos de cambio				
					Cambio en R cuadrado	Cambio en F	gl1	gl2	Sig. Cambio en F
1	.962 ^a	.926	.889	2.66268	.926	24.967	2	4	.006
a. Predictores: (Constante), RE_MT, VPU_MT									
b. Variable dependiente: RC_MT									

Anexo 36. Resultados del ANOVA de la correlación para la MT

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	354.019	2	177.010	24.967	.006 ^b
	Residuo	28.359	4	7.090		
	Total	382.379	6			
a. Variable dependiente: RC_MT						
b. Predictores: (Constante), RE_MT, VPU_MT						

Anexo 37. Valores de los coeficientes de la Ecuación propuesta para la MT

Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.	95.0% intervalo de confianza para B		Correlaciones			Estadísticas de colinealidad		
		B	Desv. Error	Beta			Límite inferior	Límite superior	Orden cero	Parcial	Parte	Tolerancia	VIF	
1	Constante	-57.053	20.856		-2.736	.052	-114.959	.853						
	VPU_MT	.016	.004	.635	3.731	.020	.004	.029	.896	.881	.508	.641	1.561	
	RE_MT	.096	.037	.437	2.568	.062	-.008	.200	.817	.789	.350	.641	1.561	
a. Variable dependiente: RC_MT														