



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
MAESTRÍA EN CIENCIAS (CONSTRUCCIÓN)**

**CENIZA DE BAGAZO DE CAÑA: EFECTO  
PUZOLÁNICO EN MORTEROS DE CEMENTO**

**TESIS**

**QUE COMO PARTE DE LOS REQUISITOS PARA OBTENER EL  
GRADO DE**

**MAESTRO EN CIENCIAS (CONSTRUCCIÓN)**

**PRESENTA:**

**JOSÉ LUIS RODRÍGUEZ BUCIO**

**DIRIGIDO POR:**

**DR. JOSÉ LUIS REYES ARAIZA**

**COASESOR:**

**DRA. ELIA MERCEDES ALONSO GUZMÁN**

**CENTRO UNIVERSITARIO**

**QUERÉTARO, QRO.**

**NOVIEMBRE DEL 2014**

**MÉXICO**



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería

Maestría en Ciencias de la Construcción

Tesis

**CENIZA DE BAGAZO DE CAÑA: EFECTO PUZOLÁNICO EN  
MORTEROS DE CEMENTO**

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de

**Maestro en Ciencias**

**Presenta:**

José Luis Rodríguez Bucio

**Dirigido por:**

Dr. José Luis Reyes Araiza

Sinodales

Dr. José Luis Reyes Araiza  
Presidente

Firma

Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán  
Secretario

Firma

M.I. Rubén Ramírez Jiménez  
Vocal

Firma

Dra. Ma. de la Luz Pérez Rea  
Suplente

Firma

M. A. Wilfrido Martínez Molina  
Suplente

Firma

  
Dr. Aurelio Domínguez González  
Director de la Facultad  
Dr. Irineo Torres Pacheco  
Director de Investigación y Posgrado

Centro Universitario  
Querétaro, Qro.  
Noviembre 2014  
México

**Resumen:** Dado que la industria de la construcción es responsable del 30% de las emisiones de CO<sub>2</sub>, una forma de reducir el impacto de la actividad de la construcción es sustituir el cemento Portland ordinario por materiales reciclados. La aplicación de la utilización de residuos agrícolas en la producción de material puzolánico es técnicamente factible, la calcinación de los materiales orgánicos resultan en cenizas con un tamaño de partícula fino y alto contenido en SiO<sub>2</sub>. En la actualidad, se discute el efecto puzolánico de la ceniza de bagazo de caña de azúcar de Taretan, Michoacán, México, en las propiedades físicas y mecánicas de un mortero de cemento portland. Las muestras de ensayo se prepararon sustituyendo ceniza de bagazo de caña de azúcar en porcentajes de 5, 10, 15, 20 y 30%, con respecto al peso de cemento. Para validar las propiedades mecánicas de las muestras, a tensión, a la flexión y resistencia a la compresión fue determinar. La adherencia del mortero sobre un estrato de hormigón se determinó mediante ensayos de pull-off. La porosidad del mortero se determinó por medio de ensayo ultrasónico no destructivo de la frecuencia del pulso y la resistividad eléctrica. Los resultados mostraron que la adición de la ceniza de bagazo de caña de azúcar mejoró la resistencia mecánica, la adherencia del mortero de hormigón, y disminuye la porosidad en edades tardías de curado. Lo que sugiere que el uso de ceniza de bagazo de caña en el cemento portland puzolánico añade beneficios a la mezcla de cemento.

**(Palabras clave:** mortero, ceniza de bagazo de caña, efecto puzolánico)

**Abstract:** Since the construction industry is responsible for 30% of the CO<sub>2</sub> emissions; one way to reduce the impact of the construction activity is to substitute ordinary Portland cement by recycled materials. The application of using agricultural waste in the production of pozzolanic material is technically feasible, due to the calcination of organic materials and leaving ashes with a fine particle size and high SiO<sub>2</sub> content. In the present, it is discussed the pozzolanic effect of sugarcane bagasse ash from Taretan, Michoacán, Mexico, on the physical and mechanical properties of a portland cement mortar. Test specimens were prepared on the basis of replacing sugarcane bagasse ash percentages of 5, 10, 15, 20 and 30 %, relative to the weight of cement. To validate the mechanical properties of the specimens, tensile, flexural and compressive strength was determined. The adherence of the mortar to the concrete single was also determined by pull-out tests. The porosity of the mortar was determined by means of non-destructive ultrasonic testing of pulse rate and electrical resistivity. The results showed that the addition of the sugarcane bagasse ash improved the mechanical strength, adherence of the mortar to concrete, and decreases the porosity on large curing times. This suggests that the use of bagasse ash in portland pozzolan cement added benefits to the cement mixture.

**(Keywords:** mortar, sugarcane bagasse ash, pozzolanic effect)

## DEDICATORIA

A mi madre **MA. DOLORES BUCIO VELÁZQUEZ** mujer que merece toda mi admiración y cariño. Por sus cuidados, regaños, caricias, abrazos pero sobre todo porque siempre ha creído en mí.

MA TE AMO.

A mi padre **J. LUIS RODRÍGUEZ MARÍN** hombre inteligente, tenaz, de carácter fuerte pero que sabe demostrar el cariño hacia las personas que quiere. Persona admirable, gran Ingeniero Civil, Maestro y ahora Colega.

PA TE AMO.

A mi hermana **MARÍA GUADALUPE RODRÍGUEZ BUCIO** hermana, compañera y amiga que ha compartido a mi lado: risas, travesuras, peleas, alegrías.

PITA TE AMO.

## AGRADECIMIENTOS

A mi familia J. Luis Rodríguez Marín (padre), Ma. Dolores Bucio Velázquez (madre) y María Guadalupe Rodríguez Bucio (hermana) por todo su cariño y apoyo. A mis familiares (abuelos†, tíos, primos) y amigos quienes siempre están presentes en mi vida.

Al Dr. José Luis Reyes Araiza por su apoyo y colaboración durante mi estancia en la UAQ, así como en el desarrollo de este trabajo. Así como a todos los profesores quienes me dieron clase y por consiguiente son partícipes en esta tesis.

A la Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán y al M. Wilfrido Martínez Molina de quienes he recibido todo el apoyo en mi formación académica y que son un ejemplo como personas y catedráticos.

A mis compañeros los “harbanos”: Mauricio Arreola, Miguel Ángel Villicaña, Cipriano Bernabé y Sandra Hernández con quienes compartí muchas horas en el desarrollo del presente trabajo.

A todas las personas que laboran en el Laboratorio Ingeniero Luis Silva Ruelas de la UMSNH por todo el apoyo que me han brindado siempre.

A la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ) y Facultad de Ingeniería por el apoyo brindado durante los años en los que desarrolle mis estudios de Posgrado permitiendo desarrollarme como persona y profesionista.

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y Facultad de Ingeniería Civil la cual fue y será mi casa de estudios y forjamiento.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico que me brindó durante los dos años de la maestría y que permite a muchos estudiantes incrementar su conocimiento, dando como resultado mejores profesionistas.

A diferencia de la materia  
el ingenio **crea, destruye y transforma.**

(JLRdzB)

## Contenido

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
1.1 Justificación.....	2
1.2 Objetivo.....	2
1.3 Hipótesis.....	2
<b>2. REVISIÓN LITERARIA</b> .....	4
<b>3. METODOLOGÍA</b> .....	9
3.1. Cemento.....	9
3.2. Material Inerte.....	9
3.2.1 Caracterización de la Arena de Río “El Cuervo”.....	9
3.3 Agua.....	20
3.4 Ceniza de Bagazo de Caña (CBC).....	21
3.4.1 Obtención de la CBC.....	21
3.4.2 Caracterización de la CBC.....	26
3.5. Elaboración de la Mezcla.....	29
3.5.1 Elaboración de cubos.....	34
3.5.2 Elaboración de prismas.....	36
3.5.3 Elaboración de briquetas.....	37
3.6 Elaboración de losas de concreto para realización de pruebas de adherencia.....	39
3.7 Elaboración de mezclas para la realización de pruebas de adherencia.....	40
3.8 Pruebas no destructivas.....	41
3.8.1 Resistividad Eléctrica.....	41
3.8.2 Velocidad de pulso ultrasónico.....	46



3.9 Pruebas destructivas. ....	48
3.9.1 Determinación de la resistencia a la compresión simple de cubos de mortero.....	48
3.9.2 Determinación de la resistencia a la flexión. ....	50
3.9.3 Determinación de la resistencia a la tensión. ....	51
3.10 Pruebas de adherencia.....	52
<b>4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>55</b>
4.1 Pruebas No Destructivas .....	55
4.1.1 Resultados Velocidad de Pulso Ultrasónico.....	55
4.1.2 Resultados Resistividad Eléctrica. ....	57
4.2 Pruebas Destructivas.....	59
4.2.1 Resultados Compresión. ....	59
4.2.2 Resultados Flexión.....	62
4.2.3 Resultados Tensión.....	63
4.2 Pruebas de Adherencia.....	64
<b>5. CONCLUSIÓN .....</b>	<b>65</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>67</b>

## Contenido de Figuras, Gráficas y Tablas

Tabla 1-1.- Requerimientos de composición química.....	6
Figura 3.1.- Río del Cuervo, Zinapécuaro, .....	9
Tabla 3-1.- Resultados Humedad Actual.....	10
Figura 3.2.- Secado de la arena. ....	11
Tabla 3-2.- Resultados Humedad de Absorción.....	12
Figura 3.3.-Realizacion de la prueba de Humedad de absorción.....	12
Tabla 3-3.- Resultados de MVSS.....	13
Figura 3.4.- Prueba de MVSS .....	13
Tabla 3-4.- Resultados de MSVS.....	14
Figura 3.5.- Varillado de arena para la prueba MVSV.....	15
Tabla 3-5.- Resultados Colorimetría.....	15
Figura 3.6.- Prueba de colorimetría.....	16
Figura 3.7.- Prueba de sedimentación .....	16
Tabla 3-6.- Resultados pasa malla #200.....	17
Tabla 3-7.- Resultados Terrones de Arcilla .....	18
Tabla 3-8.- Resultados Equivalente de Arena .....	18
Figura 3.8.- Equipo de realización de Equivalente de arena. ....	19
Tabla 3-9.- Composición química arena.....	19
Figura 3.9.- Tamaño y forma de partícula arena de río .....	20
Figura 3.10.- Probetas donde se midió el agua a utilizar. ....	20
Figura 3.11.- Municipio de Taretan.....	21
Figura 3.12.- Llegada de la caña.....	22
Figura 3.13.- Molinos.....	24
Figura 3.14.- Transporte del bagazo de caña hacia las calderas.....	25
Figura 3.15.- Patios de tiradero de CBC. ....	26
Gráfica 3-1.- Tamaño de partícula CBC y Gráfica 3-2.- Distribución de tamaño de partícula CBC .....	27
Figura 3.16.- Tamaño y forma de partícula CBC.....	27
Figura 3.17.- Difractograma CBC .....	28
Tabla 3-10.- Fluorescencia CBC .....	28
Gráfica 3-3.- Fluorescencia CBC.....	29
Tabla 3-11.- Cantidad de material .....	29

Figura 3.18.- Mesa de fluidez y molde troncocónico. ....	30
Figura 3.19.- Apisonamiento de la mezcla. ....	31
Figura 3.20.- Medición del diámetro de la mezcla sobre la mesa de fluidez. ...	31
Figura 3.21.- Martillo y aspas para mezclado.....	32
Figura 3.22.- Mezclado de los elemento para lograr un mortero.....	32
Tabla 3-12.- Cantidades para elaborar el testigo. ....	33
Tabla 3-13.- Número de especímenes que se elaboraran. ....	34
Figura 3.23.- Engrasado de Moldes .....	35
Figura 3.24.- Apisonamiento en cubos.....	35
Figura 3.25.- Pila de curado. ....	36
Figura 3.26.- Especímenes prismáticos elaborados.....	37
Figura 3.27.- Elaboración de briquetas. ....	38
Figura 3.28.- Equipo para la elaboración de briquetas. ....	38
Figura 3.29.- Elaboración de la losa con malla electro soldad. ....	40
Figura 3.30.- Losas para pruebas de adherencia terminadas. ....	40
Figura 3.31.- Revestimiento de las losas. ....	41
Tabla 3-14.- Criterios de evaluación en resistencia eléctrica .....	42
Figura 3.32.- Resistómetro Nilsson. ....	43
Figura 3.33.- Colocación del espécimen para prueba de resistividad. ....	45
Figura 3.34.- Uso del Resistómetro.....	45
Tabla 3-15.- Criterios de evaluación en pulso ultrasónico.....	46
Figura 3.35.- Equipo para medir la velocidad de pulso ultrasónico, CONTROLS. ....	47
Figura 3.36.- Prueba con el equipo CONTROLS. ....	48
Figura 3.37.- Colocación y prueba del espécimen cúbico para prueba de compresión.....	49
Figura 3.38.- Prueba a flexión en primas. ....	51
Figura 3.39.- Tensión en briquetas, máquina Michellis. ....	52
Figura 3.40.- Perforación de losas para pruebas de revestimiento. ....	53
Figura 3.41.- Colocación de pegamento a discos de acero .....	53
Figura 3.42.- Realización de las pruebas de adherencia. ....	54
Gráfica 4-1a.- Resultado de Velocidad de Pulso Ultrasónico.....	55
Gráfica 4-1b.- Resultado de Velocidad de Pulso Ultrasónico.....	56
Tabla 3-15.- Criterios de evaluación en pulso ultrasónico.....	56

Gráfica 4-2a.- Resultado de Resistividad Eléctrica. ....	57
Gráfica 4-2b.- Resultado de Resistividad Eléctrica. ....	57
Gráfica 4-3a.- Resultado de Compresión Simple. ....	59
Gráfica 4-3b.- Resultado de Compresión Simple. ....	59
Tabla 4-1.- Proporcionamientos, en volumen, recomendados para mortero en elementos estructurales. ....	60
Tabla 4-2.- Proporcionamientos, en volumen, recomendados para morteros y concretos de relleno de elementos estructurales. ....	61
Gráfica 4-4a.- Resultado de Flexión. ....	62
Gráfica 4-4b.- Resultado de Flexión. ....	62
Gráfica 4-5a.- Resultado de Resistencia a Esfuerzo de Tensión. ....	63
Gráfica 4-5b.- Resultado de Resistencia a Esfuerzo de Tensión. ....	63
Gráfica 4-6a.- Resultado de Resistencia a Esfuerzo de Adherencia. ....	64
Gráfica 4-6b.- Resultado de Resistencia a Esfuerzo de Adherencia. ....	64

## 1. INTRODUCCIÓN.

En la Antigua Grecia, hacia el 500 a. C., se mezclaban compuestos de caliza calcinada con agua y arena, añadiendo piedras trituradas, tejas rotas o ladrillos, dando origen al primer concreto de la historia, usando tobas volcánicas extraídas de la isla de Santorini. Los antiguos romanos emplearon tierras o cenizas volcánicas, conocidas también como puzolana, que contienen sílice y alúmina, que al combinarse químicamente con la cal daban como resultado el denominado cemento puzolánico (obtenido en Puzzuoli, cerca del Vesubio).

A principios del siglo XX surge el rápido crecimiento de la industria del cemento, debido a varios factores: los experimentos de los químicos franceses Louis Vicat y Le Chatelier y el alemán Michaélis, que logran producir cemento de calidad homogénea; la invención del horno rotatorio para calcinación y el molino tubular; y los métodos de transportar concreto fresco ideados por Juergen Hinrich Magens que patenta entre 1903 y 1907. Con estos adelantos pudo elaborarse cemento Portland en grandes cantidades y utilizarse ventajosamente en la industria de la construcción.

Con todo esto el cemento parece ser insustituible en la industria de la construcción, aun cuando en las últimas décadas las estructuras de acero se han posicionado como una moda que da un aspecto moderno y sobre todo reduce el tiempo de ejecución de una obra civil. Sin embargo el cemento contempla aspectos que van más allá de las grandes características que puede aportar; la sustentabilidad es un tema que en años recientes se encuentra presenta en todo trabajo que se realiza, posicionando a las plantas de cemento en el ojo de los ambientalistas por las grandes emisiones de CO<sub>2</sub> producto de las altas temperaturas que alcanzan los hornos y cuyo principal materia prima son los combustibles fósiles.

El uso de materiales reciclados como ingredientes de pastas hechas con cemento ha ganado popularidad debido a la cada vez más

severa legislación medioambiental, así como la progresiva concienciación de la sociedad. Los ingredientes reciclados más empleados son las cenizas volantes, un subproducto de las centrales termoeléctricas alimentadas por carbón. El impacto ambiental de la industria del cemento es significativo, pero mediante el empleo de estos nuevos materiales se posibilita la reducción de canteras y vertederos, ya que actúan como sustitutos del cemento, y reducen la cantidad necesaria para obtener una buena mezcla de cemento. Puesto que uno de los efectos nocivos para el medio ambiente es que la producción de cemento genera grandes volúmenes de dióxido de carbono, la tecnología de sustitución del cemento desempeña un importante papel en los esfuerzos por aminorar las emisiones de dióxido de carbono.

### **1.1 Justificación.**

En el desarrollo de la presente tesis involucra dos aspectos ya mencionados. Se empleó Ceniza de Bagazo de Caña (CBC), la cual es un residuo orgánico producto de la quema de bagazo de caña en los ingenios de azúcar, para incorporarla como un sustituto parcial del cemento portland con la finalidad de disminuir la cantidad de cemento en la mezcla de mortero. Por otro lado, mediante la incorporación de CBC, se pretende obtener una reacción puzolánica producto de las características que presenta la ceniza.

### **1.2 Objetivo.**

Mejorar las propiedades mecánicas de un mortero de albañilería mediante la incorporación de CBC en la matriz cementante, producto del efecto puzolánico de la ceniza.

### **1.3 Hipótesis.**

Los silicatos y aluminatos presentes en la Ceniza de Bagazo de Caña mejoran la resistencia mecánica, incrementan la adherencia y crean una

estructura más densa en las mezclas de mortero de cemento, producto de la reacción con el hidróxido de calcio liberado en la hidratación del cemento.

## 2. REVISIÓN LITERARIA.

Las puzolanas han sido empleadas en la industria de la construcción durante años, con el fin de aportar propiedades especiales a las ya provistas por el cemento. Ciertas cenizas producto de residuos orgánicos son consideradas como puzolanas, las cuales son un compuesto que por sí solas poseen un valor cementante nulo, pero al combinarse en la mezcla de mortero reaccionan en el proceso de hidratación de calcio del cemento alterando el proceso químico y la microestructura del mortero, mejorando las propiedades físicas y mecánicas.

Las puzolanas están compuestas esencialmente por óxido de silíceo ( $\text{SiO}_2$ ) y óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). (Shetty, 2008), asegura que incorporando la cantidad adecuada de puzolanas en una mezcla, se modifican ciertas propiedades de los morteros y concretos frescos y endurecidos, como: alta defensa frente a los sulfatos y cloruros, la resistencia frente al agua de mar, aumento de la impermeabilidad, debido a la reducción de grietas en el fraguado, reducción del calor de hidratación, incremento en la resistencia a la compresión, aumento de la resistencia a la abrasión, aumento en la durabilidad del concreto y disminuye la necesidad de agua.

La hidratación de cemento da lugar al hidróxido de calcio, el cual tiene nulo valor cementante y es soluble en el agua de la mezcla y expulsada por efecto de la lechada (Shetty, 2008). Las puzolanas reaccionan con el hidróxido de calcio produciendo silicatos de calcio y aluminatos de calcio, lo que conduce a la formación de hidrato de silicato de calcio (C-S-H), aumentando la resistencia y la densidad del mortero (Liu et al., 2005).

El código ASTM (2004), en la definición 6.13 de la norma C 595-03, especifica las puzolanas como: materiales silíceos o aluminosilíceos quienes por sí solos poseen poco o ningún valor cementante, pero cuando se han dividido finamente y están en presencia de agua, reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio a temperatura ambiente para formar compuestos con propiedades cementantes. En este caso se aprovecha el alto contenido de



sílice y alúmina, que caracteriza la composición de estos materiales, para formar compuestos cementantes, los cuales al combinarse con la cal que se genera durante el proceso de hidratación del cemento producirían el efecto puzolánico mencionado. Esta cualidad permite sustituir ciertas cantidades de cemento por puzolana sin afectar o incluso mejorando su resistencia mecánica, entre otras propiedades. Algunos residuos agrícolas están siendo muy estudiados con el fin de producir puzolanas y hasta el momento se han obtenido muy buenos resultados (Aguila, 2001; Martirena, 2003; Martirena, Middendorff, Budelmann, & Gehrke, 1997; Visvesvaraya, 1986; Hammond, 1983).

De acuerdo con la norma ASTM C 618-03 las cenizas se clasifican en tres grupos o clases: N, F, C.

Clase N.- Puzolanas naturales en bruto o calcinadas, que cumplen con los requisitos aplicables para la clase como dados en este documento, como algunas tierras de diatomeas; opalina y lutitas, tobas y cenizas volcánicas o pumicitas calcinadas o sin calcinar, y diversos materiales que requieren calcinación para inducir propiedades satisfactorias, como algunas arcillas y lutitas.

Clase F.- Cenizas volantes que normalmente se producen por la quema de la antracita o carbón bituminoso que cumpla con los requisitos aplicables de esta clasificación. Esta clase de ceniza volante tiene propiedades puzolánicas.

Clase C.- Cenizas volantes que normalmente se producen a partir del lignito y carbón sub-bituminoso que cumpla con los requisitos aplicables a esta clasificación. Esta clase de las cenizas volantes, además de tener propiedades puzolánicas, también tiene algunas propiedades cementantes.

Además las cenizas volantes y puzolanas naturales deben cumplir con los requerimientos de composición química que se presenta en la Tabla 1-1, dictaminado por la ASTM 618-03.

Tabla 1-1.- Requerimientos de composición química

	Tipo de Puzolana		
	N	F	C
SiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , min, %	70	70	50
SO <sub>3</sub> , max, %	4	5	5
Contenido de Humedad, max, %	3	3	3
PPI, max, %	10	6*	6
*Se usa la clasificación "F" para puzolanas con un contenido de PPI mayor a 12%.			

La Ceniza de Bagazo de Caña es el subproducto resultado de la quema del bagazo de caña y se caracteriza por un alto contenido de sílice, por tal motivo puede ser considerada para sustituir parcialmente al cemento, para tratar de modificar y mejorar las propiedades mecánicas y físicas (Morales et., 2007).

Berry et al. (1994) en un estudio de hidratación de pastas con cenizas volantes tipo "F" concluyó que dicho material cementante suplementario (SCM por su sigla en inglés) posee una extensiva participación en la hidratación y reacciones cementantes incluso a edades de 180 días. Encontraron además una ceniza volante que no reacciona pero que ayudan a llenar los espacios vacíos en la microestructura (densificación). Otro estudio (Jiang et al., 1999), concluye que si bien un incremento en la cantidad de SCM puede inicialmente aumentar la porosidad de la pasta, la porosidad decrece con el tiempo a medida que el SCM se hidrata. Ellos concluyen además que hay un límite en el reemplazo de cemento por SCM para mejorar la microestructura de la pasta.

La generación de silicatos de calcio hidratados a partir de la reacción puzolánica contribuye a densificar la microestructura de las pastas de cemento, disminuir su porosidad y aumentar la resistencia (Meddah & Tagnit-Hamou, 2009). El efecto de las SCM's en la estructura de poros está fuertemente relacionado con la composición del SCM y la razón agua cemento (Diamond, 2000). Adicionalmente, para que la reacción puzolánica se lleve a cabo es necesario un buen curado que asegure la presencia de agua (Malhotra & Mehta, 2005; Ayers & Khan, 1993).

Por otro lado Mehta (1992) tras un estudio con ceniza de cascarilla de arroz determino que las condiciones amorfas de la sílice contribuían a efectuar una mayor reacción puzolánica con lo cual se obtenían mezclas de cemento de mayor calidad.

Cuando una mezcla de cemento portland y puzolana reaccionan, la reacción puzolánica avanza como una reacción ácido-base de cal y álcalis con óxidos ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) de la puzolana. Suceden dos cosas. En primer lugar, hay una disminución gradual en la cantidad de hidróxido de calcio libre con el tiempo, y segundo, durante esta reacción hay un aumento en la formación de CSH y aluminosilicatos de calcio que son similares a los productos de la hidratación del cemento portland. Según (Lea, 1971), la sustitución parcial de cemento portland por puzolana con una lata relación  $\text{SiO}_2/\text{R}_2\text{O}_3$  ( $\text{R}_2\text{O}_3 = \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) aumenta la resistencia del concreto a sulfato y el ataque de agua mar. Esto es en parte atribuible a la eliminación de hidróxido libre formado en la hidratación de cemento portland.

El resultado es que la pasta de cemento endurecida contiene menos hidróxido de calcio, más CSH, y otros productos de baja porosidad. La investigación sobre la hidratación de cementos mezclados con puzolanas naturales de origen volcánico (Santorin tierra, puzolana) indicó que el refinamiento de poros, resultante de la reacción puzolánica, es importante para mejorar la durabilidad química y resistencia mecánica (Mehta, 1987).

Hoy en día, los cementantes mezclados que constan de cemento portland y puzolana, cubiertos por la norma ASTM C 595 y C 1157, son utilizados en la construcción de concreto por razones económicas para ayudar a reducir el consumo de energía y para lograr beneficios técnicos.

Aditivos minerales finamente divididos, ya sean puzolanas naturales u otro material finamente dividido, por lo general deben considerarse como parte de la matriz de la pasta de cemento en la determinación de los porcentajes óptimos.

La cantidad de agua necesaria para el efecto de la puzolana natural también debe determinarse. Algunas adiciones minerales finamente divididas causan un aumento importante de las necesidades de agua; otros tienen poco o ningún efecto sobre la demanda de agua y aún otros suelen reducir las necesidades de agua en el concreto que se utilizan (Mather , 1958). Las puzolanas naturales suelen afectar la demanda de agua del concreto y, por tanto, el contenido de cemento. La puzolana natural debe ser considerada como parte del material de cemento (EE.UU. Oficina of Reclamation, 1957). La cantidad de puzolana natural utilizado varía dependiendo de manera significativa sobre la actividad de la puzolana. Algunas puzolanas naturales se utilizan en una gama de 15% a 35% en base a la masa del material cementante total. Puzolanas más reactivas se pueden utilizar en concentraciones más bajas de 5% a 15% en masa del total de cemento; sin embargo, tales bajas concentraciones pueden aumentar la expansión resultante de la reacción de sílice alterada en la presencia de algunos agregados alcalí-reactivos (Stanton, 1950).

El efecto de una puzolana natural en lo que refiere al esfuerzo de compresión varía notablemente con las propiedades de la puzolana en particular y con las características de la mezcla en la que se utiliza. El efecto de la puzolana se basa en la interacción química de la puzolana y el cemento portland durante el proceso de hidratación. Por otro lado, cementos y puzolanas contribuyen al incremento de fuerza no solo por la composición química, sino también por el empaquetamiento que se da entre partículas (Philleo, 1986)

Las puzolanas deben estar finamente molidas con el fin de exponer un área de superficie grande para las soluciones alcalinas para que la reacción proceda. La sílice en una puzolana tiene que ser amorfa, o vítreo, para que sea reactiva (Newman & Choo, 2003).

### 3. METODOLOGÍA.

#### 3.1. Cemento.

El cemento utilizado en la fabricación de la mezcla de mortero para elaborar los diferentes especímenes fue un Cemento Portland Compuesto de alta resistencia inicial y resistente a los sulfatos (CPC 30R RS).

#### 3.2. Material Inerte.

La arena utilizada para la elaboración del mortero fue arena de río proveniente del poblado del Cuervo, perteneciente al municipio de Zinapecuaro Michoacán Figura 3.1, dicho material fue tamizado, utilizando solamente el material que pasa la malla #16 y retiene la malla #30. Este material posee características similares a la arena de Ottawa, es decir con alto contenido de sílice (ASTM C 91, 1995).



Figura 3.1.- Río del Cuervo, Zinapecuaro,

#### 3.2.1 Caracterización de la Arena de Río “El Cuervo”.

Es importante mencionar que las pruebas que se presentan a continuación se efectuaron a la arena para tener un poco más de información

acerca de ella, ya que para este caso las mezclas no conllevan un proporcionamiento de mezcla.

- **Humedad actual.**

Determina el porcentaje de humedad que contiene una arena en el momento que se va utilizar para realizar una mezcla, para así poder realizar la corrección correspondiente, Figura 3.2.

$$\% \text{ de Humedad actual} = \frac{Mh - Ms}{Ms} * 100$$

Dónde:

Mh= masa de la muestra en gramos.

Ms = masa seca del material en gramos.

Mh-Ms = masa de agua que contenía el material.

Se realizaron 3 pruebas:

*Tabla 3-1.- Resultados Humedad Actual*

Mh (gr)	Ms (gr)	% de H. actual
300	297.7	0.773
300	298.2	0.604
300	297.4	0.874
	Promedio	0.750



Figura 3.2.- Secado de la arena.

REFERENCIA.

NMX – C – 166 – ONNCCE – 2006.

- **Humedad de absorción**

Capacidad máxima de absorción que tiene una arena expresada en porcentaje, Figura 3.3.

$$\% \text{ de Humedad de absorción} = \frac{Mh - Ms}{Ms} * 100$$

Dónde:

Mh= masa saturada y superficialmente seca en gramos.

Ms = masa seca del material en gramos.

Se realizaron 3 pruebas:



Tabla 3-2.- Resultados Humedad de Absorción

Mh (gr)	Ms (gr)	% de H. absorción
301.8	290.8	3.78
300.5	290.0	3.62
304.2	293.1	3.78
	Promedio	3.73



Figura 3.3.-Realización de la prueba de Humedad de absorción.

REFERENCIA.

NMX – C – 165 – ONNCCE – 2004.

- **Determinación de la masa volumétrica seca y suelta de una arena (MVSS)**

Consiste en determinar la masa por unidad de volumen de una arena cuando el acomodo de sus partículas es en forma natural, Figura 3.4.

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

Donde:

MVSS= Masa volumétrica seca y suelta (gramos/cm<sup>3</sup>).



M= Masa de la arena en gramos.

V= Volumen del recipiente en cm<sup>3</sup>.

Se realizaron 3 pruebas:

*Tabla 3-3.- Resultados de MVSS.*

M (gr)	V (cm <sup>3</sup> )	MVSS(gr/cm <sup>3</sup> )
3455	2783	1.241
3405	2783	1.223
3375	2783	1.213
	Promedio	1.226



*Figura 3.4.- Prueba de MVSS*

REFERENCIA.

NMX – C – 073 – ONNCCE – 2004.

- **Determinación de la masa volumétrica seca y suelta de una arena (MVSV).**

Consiste en determinar la masa por unidad de volumen de una arena cuando el acomodo de sus partículas es en forma natural, Figura 3.5.

$$MVSV = \frac{M}{v}$$

Donde:

MVSV= Masa volumétrica seca y varillada (gramos/cm<sup>3</sup>).

M= Masa de la arena en gramos.

V= Volumen del recipiente en cm<sup>3</sup>.

Se realizaron 3 pruebas:

*Tabla 3-4.- Resultados de MSVS*

M (gr)	V (cm <sup>3</sup> )	MVSV (gr/cm <sup>3</sup> )
3655	2783	1.313
3755	2783	1.349
3705	2783	1.331
	Promedio	1.331



Figura 3.5.- Varillado de arena para la prueba MVSV.

REFERENCIA.

NMX – C – 073 – ONNCCE – 2004.

- **Colorimetría.**

Determina el contenido de materia orgánica en una arena en forma comparativa, utilizando una solución de color normal, Figura 3.6.

Se realizaron 3 pruebas:

Tabla 3-5.- Resultados Colorimetría

No Prueba	Colorimetría
1	Escala 3
2	Escala 3
3	Escala 3

El material se encuentra en el color límite de presencia de materia orgánica.



Figura 3.6.- Prueba de colorimetría.

- **Sedimentación.**

Determina si el contenido de material fino que contiene una arena es aceptable para reportar si se acepta o no, Figura 3.7.

Se realizaron 3 pruebas:

En las 3 pruebas el resultado fue “Contenido de finos aceptable”.



Figura 3.7.- Prueba de sedimentación

- **Material que pasa por la malla n° 200 en arena**

Determina la cantidad de materia fina que contiene una arena, cribándola por la malla n° 200.

$$A = \frac{Mi - Mf}{Mf} * 100$$

Dónde:

A= porcentaje de material que pasa la malla n° 200.

Mi= masa seca inicial

Mf = masa seca final.

*Tabla 3-6.- Resultados pasa malla #200*

Mi (gr)	Mf (gr)	% A
582.3	569.1	2.32
546.9	536.8	1.88
565.9	556.2	1,74
	Promedio	1.98

- **Prueba de terrones de arcilla.**

Es útil para conocer la cantidad de terrones de arcilla que contiene una arena, ya que son partículas de baja resistencia estructural, que además en contacto con el agua forman lodos que contaminan el concreto, cuando se encuentran en abundancia formando parte de la arena.

$$A = \frac{Mi - Mf}{Mf} * 100$$

Dónde:

A= porcentaje de material que pasa la malla n° 200.

Mi= 100 gramos

Mf = masa seca final.

Tabla 3-7.- Resultados Terrones de Arcilla

Mi (gr)	Mf (gr)	% terrones
106.6	104.1	2.35
101.2	99.5	1.68
106.9	103.4	3.27
	Promedio	2.43

- **Equivalente de arena.**

Determinar las proporciones volumétricas relativas de las partículas gruesas de un suelo respecto a los finos plásticos que contiene, empleando un procedimiento que amplifica el volumen de los materiales finos plásticos, Figura 3.8.

$$E. de arena = \frac{Lectura\ de\ arena}{Lectura\ de\ arcilla} * 100$$

Tabla 3-8.- Resultados Equivalente de Arena

L. arena	L. arcilla	% E. de arena
11.4	11.6	98.28
10.8	11.0	98.18
11.6	11.8	98.31
	Promedio	98.26



Figura 3.8.- Equipo de realización de Equivalente de arena.

- **Fluorescencia Rayos X Arena**

En la Tabla 3-9 comprueba el contenido de sílice superior al 78% y dado que es un material de origen volcánico se puede inferir que el sílice está presente en forma cristalina.

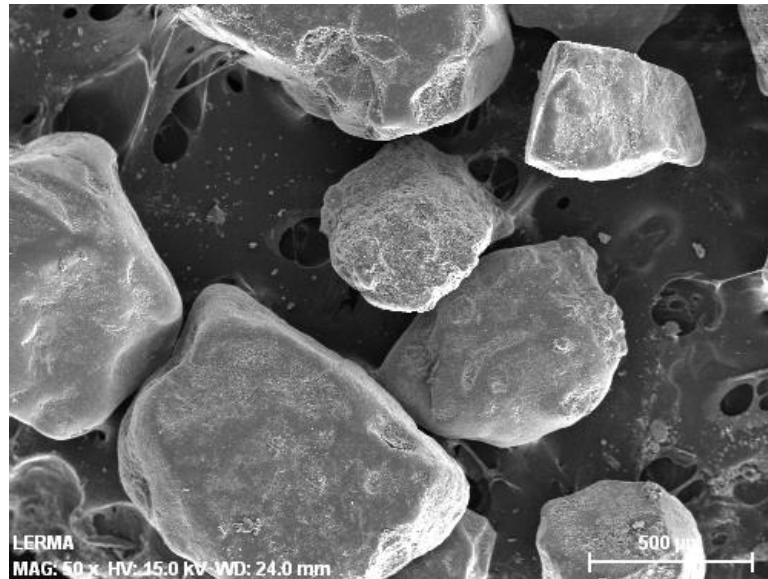
Tabla 3-9.- Composición química arena

Componente	%	Componente	%
SiO <sub>2</sub>	78.185	CaO	1.015
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.557	Na <sub>2</sub> O	2.666
TiO <sub>2</sub>	0.203	K <sub>2</sub> O	3.577
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.567	PXC/PPI	1.19
MgO	0.239	BaO	0
MnO	0.03	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.036
suma		100.29	

- **Tamaño y forma de partícula de arena**

La Figura 3.9 muestra una forma característica de las partículas de cuarzo.





*Figura 3.9.- Tamaño y forma de partícula arena de río (Arreola, 2013)*

### **3.3 Agua.**

El agua utilizada para elaborar las mezclas de mortero, fue agua proveniente de la red de agua potable de la ciudad de Morelia Michoacán Figura 3.10.



*Figura 3.10.- Probetas donde se midió el agua a utilizar.*



### 3.4 Ceniza de Bagazo de Caña (CBC).

El material de Ceniza de Bagazo de Caña se logró obtener gracias al apoyo del Ingenio de Azúcar “Lázaro Cárdenas” ubicado en el Municipio de Taretan del estado de Michoacán de Ocampos, su ubicación geográfica se puede observar en la Figura 3.11



Figura 3.11.- Municipio de Taretan.

Los suelos del municipio datan de los períodos cenozoico, terciario y eoceno, corresponden principalmente a los del tipo podzólico. Su uso es primordialmente forestal y en proporción semejante están dedicados a la actividad agrícola y ganadera.

#### 3.4.1 Obtención de la CBC.

En lo que se refiere a la producción de la Ceniza de Bagazo de Caña se tiene lo siguiente (información proporcionada por el ingenio de azúcar “Lázaro Cárdenas”):

La caña se pesa a granel en una báscula de plataforma junto con el vehículo de transporte en el que se le recibe en el ingenio, tal como se observa en la Figura 3.12, posteriormente se destara el camión para tener la caña neta.



*Figura 3.12.- Llegada de la caña.*

Lo mejor es que toda la caña que entra se muele inmediatamente, es decir: del camión a la mesa alimentadora, "cero batey" con la finalidad de abatir las pérdidas de sacarosa en la caña que se estiba en el batey.

Los equipos de descarga de caña en el ingenio son las grúas radiales auto-estables que descargan la caña de los camiones y la depositan en las mesas alimentadoras.

Las mesas alimentadoras son unas rampas de hierro estructural con una cubierta con inclinación de  $8^\circ$  de lámina de fierro, provista con carriles guía donde circulan unas cadenas dotadas de aditamentos para impulsar la caña que se mueve por unas ruedas dentadas (sprockets) los cuales van montados en un eje motriz y otro conducido, accionados por un moto-reductor, llevan la caña hacia el conductor general de alimentación al molino.

Se tiene también colocado un nivelador de caña en la punta de las mesas alimentadoras con el objeto de nivelar mejor el colchón de caña y evitar sobrecargas en la desfibradora, consistiendo en juegos de aspas de acero montados en una flecha con espaciamiento regular, que giran, mediante un moto-reductor a una velocidad de entre 60 a 100 rpm.

El transporte de la caña hacia los molinos, consiste en un conductor de tablillas de acero, instaladas en dos cadenas de rodillos con aditamentos, movidas por rueda dentadas (sprockets), montados en dos flechas: conductora y conducida, se tiene dos conductores de caña: uno horizontal y otro inclinado. el cual tiene la finalidad de elevar la caña para lograr una correcta alimentación hacia los molinos. La longitud de los conductores se diseña para recibir la caña e instalar sobre el conductor un gallego nivelador y el equipo de preparación de caña que es la desfibradora.

La caña se corta en la desfibradora, en trozos de un tamaño tal que permita una buena alimentación a los molinos, una mejoría en la extracción de jugo al romper la corteza de la caña y un mayor tonelaje de molienda por día.

#### Extracción o molienda

La caña después de pasar por la desfibradora es conducida hacia los equipos de extracción, que son los molinos, estos son equipos en serie que funcionan en tándem de 5 unidades, Figura 3.13, están montados en bancazos de hierro, niveladas sobre bases de concreto, consta, para cada unidad, de 2 "vírgenes" o soportes de forma triangular donde se asientan cuatro "mazas", para hacer más rápida la extracción.

El mecanismo que mueve los molinos son conjuntos de engranes rectos y reductores de velocidad movidos por turbina de vapor y transmisiones hidráulicas, el sistema está diseñado para mover una unidad (molino), el molino 1 es accionado por turbina de vapor de 700 hp, y los molinos 2,3,4 y 5 movidos por transmisión hidráulica cada uno.

Para mejorar la extracción de jugo se le agrega agua a los últimos molinos pero, para no incluir demasiada agua al proceso, el jugo que se extrae de los últimos molinos (y que tiene menor contenido de sacarosa), se bombea hacia los primeros molinos para "imbibir" la caña a la salida de ellos (a partir del 1er molino) y diluir la sacarosa contenida en la caña que sale de dichos molinos, a este proceso se le llama "imbibición" o "maceración".



*Figura 3.13.- Molinos.*

El jugo de los primeros molinos (normalmente del 1º y 2º es el que se envía hacia la elaboración) se pasa por un rotofiltro para separar el bagacillo que también se arrastra con el jugo en la extracción, para que entren la menor cantidad de impurezas al proceso, entre más limpia este la caña, menor cantidad de impurezas se tendrán en fabrica.

El jugo mezclado es el jugo que se bombea a la fábrica para iniciar la elaboración y que es, en esencia, jugo de caña más agua de dilución.

El bagazo es el residuo fibroso que sale del último molino del tándem, está compuesto de la fibra o materia leñosa de la caña y de humedad que no ha sido eliminada por la presión de las mazas de los molinos, la cual debe ir a formar parte del jugo mezclado y que queda como remanente en el bagazo y sólidos solubles.

El bagazo que sale del último molino es enviado por conductores de cadenas con tablillas de madera o de acero hacia las calderas, Figura 3.14, y ahí se descarga y dosifica a los hornos donde se quema (se utiliza como combustible) para generar el calor necesario para producir el vapor que se requiere en las turbinas que mueven a los molinos y al turbogenerador ; el vapor que sale de estas turbinas, es utilizado para el cocimiento del jugo mezclado en el área de elaboración, el excedente de bagazo, se envía a un patio de almacenamiento para ser utilizado como combustible de reserva.



*Figura 3.14.- Transporte del bagazo de caña hacia las calderas.*

Las calderas son equipos mediante los cuales se efectúa la combustión de bagazo, para producir la generación de vapor necesaria para mover los equipos del ingenio. Como residuo de la combustión se genera la ceniza, la cual es enviada a una tolva al realizar la limpieza de los hornos de calderas.

Las chimeneas de las calderas, No. 1 y No. 3 cuentan con un sistema de deshollinador para capturar la ceniza de los gases de combustión. Manejándose por vía húmeda, enviando el hollín precipitado a una tolva.

Toda la ceniza que se produce producto de la quema del bagazo es enviada a patios exteriores del ingenio, Figura 3.15, donde, donde personas ajenas al ingenio se encargan de recogerlas y distribuirlas a los agricultores como material de abono.

Los equipos movidos por vapor comprenden en primer lugar todos los primotores:

Turbo-generadores que deben ser los productores de toda la energía eléctrica que se necesita en un ingenio, y la turbina que opera un molino, además de algunas otras turbinas de vapor que se utilicen para algún movimiento específico (bombas de agua, etc.)



*Figura 3.15.- Patios de tiradero de CBC.*

### **3.4.2 Caracterización de la CBC.**

Se realizó un estudio previo para caracterizar la CBC, el cual sería útil para dictaminar si la ceniza es apta para ser considerada como materia puzolánica (Arreola M., 2014), es importante mencionar que se tomaron los datos de la tesis mencionada, ya que se trata de la misma ceniza.

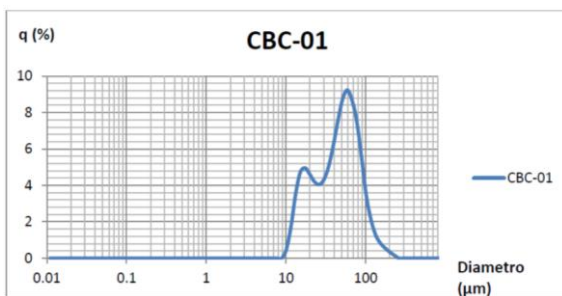
- **Tamaño y Forma de Partícula**

Particularmente, la puzolana finamente dividida agregada como adición a materiales cementantes, puede afectar las propiedades del cemento mortero/concreto en el estado fresco y en el estado endurecido. En estado fresco o plástico, las adiciones tienen influencia en las proporciones de mezcla, requerimiento de agua para una consistencia específica, características de tiempo de fraguado, trabajabilidad incluyendo cohesividad, sangrado y calor de hidratación. En el estado endurecido, estas adiciones minerales tienen influencia en el desarrollo de resistencia a edades tardías.

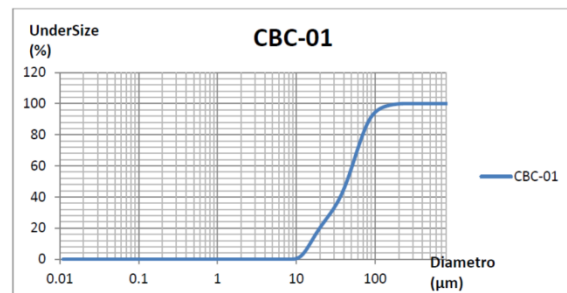


En las gráficas 3.1 y 3.2 se aprecia que la CBC tiene una distribución uniforme de tamaños de entre 10 y 100  $\mu\text{m}$ . La CBC usada en esta investigación fue previamente cribada para eliminar el carbón y las partículas gruesa, y solo se utilizó el material que paso la malla N°200 (80  $\mu\text{m}$ ).

En la Figura 3.16, se puede apreciar la forma de la partícula, la cual tiene una apariencia alargada en forma de fibras, la cual es característica de las cenizas de origen agrícola, además de poderse apreciar lo amorfo de la misma .



Gráfica 3-1.- Tamaño de partícula CBC



Gráfica 3-2.- Distribución de tamaño de partícula CBC (Arreola, 2013)

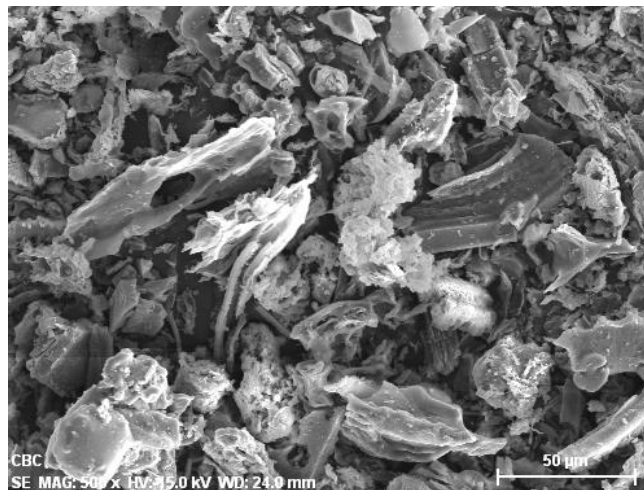


Figura 3.16.- Tamaño y forma de partícula CBC (Arreola, 2013)

- **Difracción Rayos x**

El análisis de facas de la CBC, Figura 3.17, determinó una estructura completamente amorfa de la ceniza, lo cual la coloca como una ceniza con alto potencial puzolánico.

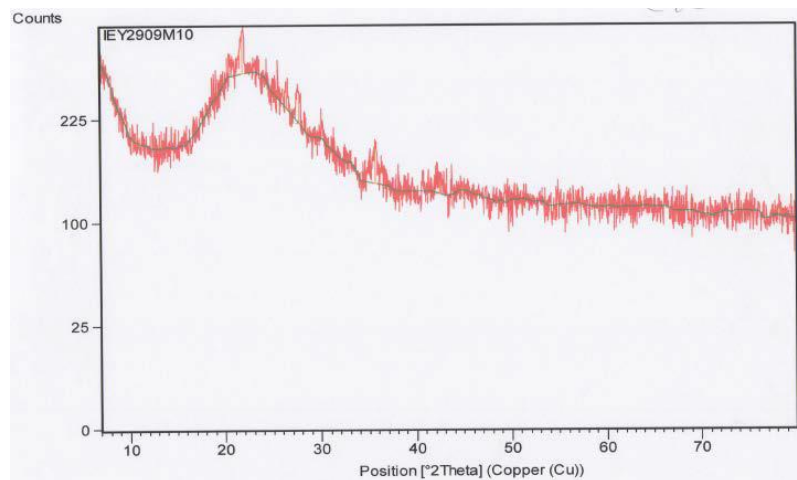


Figura 3.17.- Diffractograma CBC (Arreola, 2013)

- **Fluorescencia en CBC**

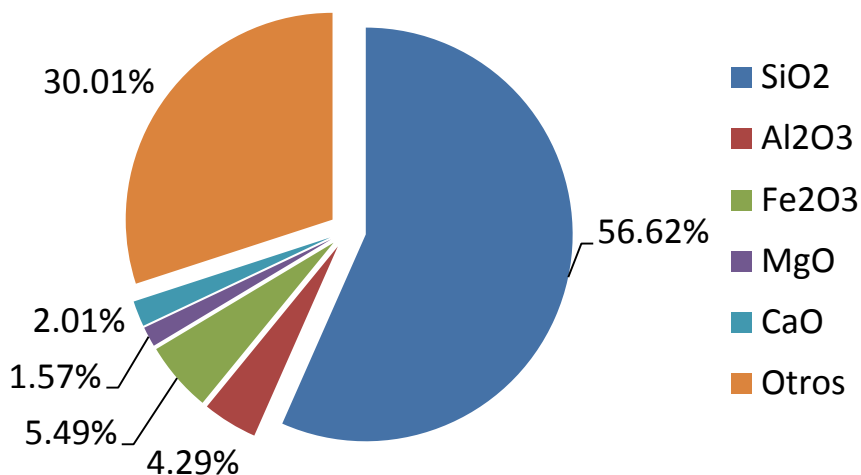
La Tabla 3-10 y Grafica 3-3, muestra el análisis químico cualitativo y cuantitativo de los materiales presentes en la ceniza.

Tabla 3-10.- Fluorescencia CBC

<b>SiO<sub>2</sub></b>	56.62	<b>SO<sub>3</sub></b>	0.244
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	4.293	<b>ZrO<sub>2</sub></b>	0
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0.422	<b>Cl</b>	0
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	5.488	<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0
<b>MgO</b>	1.573	<b>SrO</b>	0.057
<b>MnO</b>	0.227	<b>ZnO</b>	0
<b>CaO</b>	2.013	<b>PXC/PPI</b>	26.65
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	0.24	<b>BaO</b>	0
<b>K<sub>2</sub>O</b>	2.178	<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0
<b>Suma</b>		100.005	



### Fluorescencia RX



Gráfica 3-3.- Fluorescencia CBC

### 3.5. Elaboración de la Mezcla.

Una vez elegido el tipo de cemento y analizado la arena que se previó para el desarrollo de la tesis, se continuo con la elaboración del mortero. Dicha mezcla está conformada por los elementos para realizar un mortero estándar, es decir, cemento + arena + agua y será denominada durante este trabajo como “testigo”. Como se está trabajando con un cemento del tipo CPC la norma *ASTM C 109/C 109M 07* indica que la proporción en peso de los materiales secos para elaborar el mortero estándar debe consistir de una parte de cemento y 2.75 de arena graduada y la cantidad de agua de mezclado debe ser la que produzca una fluidez de  $110\% \pm 5\%$  determinada como se especifica en la norma. La misma norma establece las cantidades para elaborar cierto número de especímenes, Tabla 3-11:

Tabla 3-11.- Cantidad de material

Materiales	Caso 1	Caso 2
Número de	6	9

especímenes		
Cemento	500g	740 g
Arena graduada	1375 g	2035
Agua para cemento CPO	-	-
Agua para cemento CPP, CPC, CPEG, CPS CEG.	La necesaria para dar una fluidez de 110% ± 5%	La necesaria para dar una fluidez de 110% ± 5%

Para determinar la cantidad de agua necesaria se efectuó la prueba de fluidez la cual consiste en llenar el molde troncocónico con la mezcla de mortero, sobre el plato circular, es decir sobre la mesa de fluidez, tal como se muestra Figura 3.18, el llenado se hace en dos capas, agregando a cada una de estas la mitad del volumen del molde aproximadamente, después del llenado de la primera capa se le dan 15 golpes con el pisón a la mezcla distribuidos en toda la superficie, tal como se muestra en la Figura 3.19, se procede a llenar la segunda capa teniendo cuidado en dejar un sobrante de mezcla sobre la parte superior, después se le dan a esta capa otros 15 golpes con el pisón, se enraza el molde ayudándose de una espátula, cuchara de albañil o similar, se retira el molde.



Figura 3.18.- Mesa de fluidez y molde troncocónico.



*Figura 3.19.- Apisonamiento de la mezcla.*

Mediante el uso de la manivela el plato circular se levanta y se deja caer súbitamente, esta operación debe hacerse un total de 25 veces en un tiempo aproximado de 15 segundos. Una vez realizado lo anterior se proceda a medir con el uso de un vernier la fluidez de la mezcla, esto se haciendo la sumatoria de cuatro medidas del diámetro de la mezcla desparramada sobre la mesa, dicha mediciones deben pasar por el centro del plato o bien siguiendo las guías si es que están marcadas en la superficie de la mesa de fluidez Figura 3.20.



*Figura 3.20.- Medición del diámetro de la mezcla sobre la mesa de fluidez.*

Es importante mencionar que para obtener una mezcla más rápida y homogénea se usó un taladro eléctrico marca Bosch con potencia de 750w y 3500 RPM, al cual se le incorporó unas espas mezcladoras. Dado que se haría uso de este equipo para realizar las mezclas, se incorporó a la idea usar cubetas con capacidad de 19 lts como recipientes para realizar el mezclado, de esta forma se evitaría que el material se disperse por acción de las revoluciones de las espas, Figura 3.21. Este método de realizar la mezcla fue de gran utilidad ya que el resultado sencillo, práctico y sobretodo funcional, Figura 3.22.



*Figura 3.21.- Martillo y espas para mezclado*



*Figura 3.22.- Mezclado de los elementos para lograr un mortero.*

Con todo lo anterior se logró realizar el testigo Tabla 3-12, el cual además de ser el parámetro por el cual serán comparadas todas las mezclas con las sustituciones planteadas, marcará la pauta de la relación A/C que se respetará en las mezclas subsecuentes. En el caso que los morteros con sustituciones de Ceniza de Bagazo de Caña (CBC) no cumplan con la fluidez marcada en la norma, se le añadirá un aditivo fluidificante cuya función como bien dice su nombre es proporcionar a la mezcla una mayor trabajabilidad la cual se ve reflejada con la fluidez.

Tabla 3-12.- Cantidades para elaborar el testigo.

Cemento	1481 gr
Arena	4072gr
Agua	1495 ml
Relación agua/cemento(A/C)	1.01
Fluidez	108%

Se fijó usar la cantidad de 1481gr de cementante, puesto que se cuantifico el volumen que se debía llenar para los especímenes que se elaborarían, ya que después de varios tanteos se observó que el rendimiento de cementante era de  $0.47\text{gr}/\text{cm}^3$ , y ya que si se utilizaba lo que indica la norma (ASTM C 109M, 2002), para llenar de mezcla 6 cubos de dimensiones 5cm x 5cm x 5cm, habría un desperdicio considerable.

Se elaboraron dos mezclas por cada sustitución, con cantidades iguales de material, dichas mezclas servirían para el llenado de los especímenes mostrados en la Tabla 3-13:

Tabla 3-13.- Número de especímenes que se elaboraran.

<b>Espécimen</b>	<b>Prueba a realizar</b>	<b>Cantidad de especímenes elaborados</b>
Cubos de 5 x 5 x 5 cm	Compresión axial	15
Prismas de 4 x4 x16 cm	Flexión	10
Briquetas	Tensión	15
Losa de concreto	Adherencia	15

De los especímenes elaborados, se realizarían las pruebas correspondientes a las edades de 14\*, 28, 45, 90 y 180 días.

### **3.5.1 Elaboración de cubos.**

En la elaboración de los cubos de mortero se utilizaron moldes de acero inoxidable y bronce que cumplen con las dimensiones especificadas (ASTM C 109M, 2002).

Para la fabricación de los cubos de mortero, es necesario recubrir los moldes con un desmoldante como se puede observar en la Figura 3.23, con la finalidad de que al día siguiente una vez cumplido de 20-24 horas se descimbraran con facilidad. Para tal fin se utilizó aceite para transmisión mezclado con diésel.

Una vez realizada la prueba de fluidez se regresa la mezcla y se procede a elaborar los especímenes cúbicos. La preparación de los especímenes se debe empezar dentro de un tiempo no mayor de 2 minutos 30 segundos a partir de haber terminado el mezclado. Se vierte aproximadamente 4 capas de 25mm de espesor aproximadamente y luego el mortero de cada compartimiento se compacta con el pisón, 32 veces en 10 segundos, en 4 vueltas.





Figura 3.23.- Engrasado de Moldes

La iniciación de cada vuelta se efectúa a  $90^\circ$  con respecto a lo siguiente (o a lo anterior) y consiste en 8 golpes adyacentes repartidos sobre la superficie, tal como se muestra en la Figura 3.24. La presión para compactar el espécimen debe ser la necesaria para asegurar un llenado uniforme del molde.

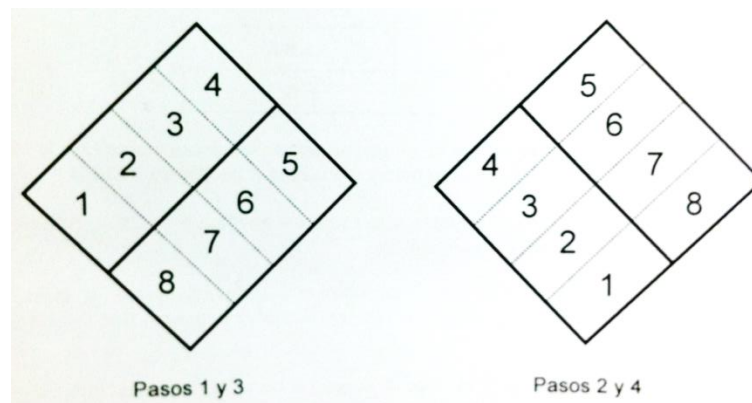


Figura 3.24.- Apisonamiento en cubos

Fabricados el número de cubos para a las edades de prueba especificadas y con la sustitución correspondiente, se rotulaban con ayuda de un marcador indeleble, su correspondiente nomenclatura (la nomenclatura que se le puso a todos los especímenes como son: cubos, cilindros, prismas y briquetas fue la misma), en dicha nomenclatura llevaba la fecha de elaboración

del cubo, la sustitución, el porcentaje de la sustitución de la mezcla con la que se elaboró y el material de dicha sustitución, una vez realizado lo anterior, se procedía a curar los cubos de mortero tal como se puede observar en la Figura 3.25. El curado que se dio a los especímenes fue por inmersión en agua hasta el día de la prueba (ASTM C 511, 2004).



*Figura 3.25.- Pila de curado.*

### **3.5.2 Elaboración de prismas.**

Para la fabricación de los prismas con dimensiones 4cm x 4cm x 16cm con las mezclas y sustituciones correspondientes, se utilizaron moldes de acero inoxidable que cumplen con las dimensiones especificadas por la norma correspondiente para su fabricación.

El llenado de los prismas se hizo en dos capas de igual espesor aproximadamente lo cual se ilustra en la Figura 3.26, es decir a la mitad de la altura del prisma, en cada capa se le dieron 12 golpes con un pisón, el cual es el mismo que se utiliza para la elaboración de especímenes cúbicos, los golpes se dieron en diferente sentido, a cada capa, como se describió en el llenado de cubos. Previamente se engrasaron los moldes para facilitar el descimbrado.



Después de la elaboración del número de los especímenes prismáticos correspondiente a las edades de prueba especificadas y con las diferentes sustituciones, se dejaron fraguar durante 20-24 horas aproximadamente, se descimbraron y al igual que en los cubos se utilizó la misma nomenclatura, Finalmente se procedió a curar los prismas de mortero, la manera de curar los especímenes menes fue la ya mencionada.



*Figura 3.26.- Especímenes prismáticos elaborados.*

### **3.5.3 Elaboración de briquetas.**

Para la fabricación de las briquetas (especímenes en forma de cacahuete) con las mezclas y sustituciones correspondientes, se utilizaron moldes de bronce.

De la misma forma que para los anteriores especímenes se engrasaron los moldes y después se llenaron con la mezcla de mortero correspondiente.

Puesto que no hay ninguna norma para el llenado de las briquetas, estas se llenaron siguiendo el procedimiento descrito el Manual de Análisis de

Materiales tercera edición, publicado por la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. El llenado de las briquetas consiste en llenar los comprimiendo la mezcla con el dedo índice y enrazando con la ayuda de una espátula Figura 3.27, y Figura 3.28, puesto que los moldes no tienen una base en la cual quedará la mezcla, el molde se puso sobre una superficie de cristal, engrasado previamente para evitar que la mezcla se adhiera a este.

Después de la elaboración del número correspondiente de briquetas para las edades de prueba especificadas, se dejaron fraguar durante 20-24 horas, después se les puso la misma nomenclatura descrita anteriormente y se sumergieron en agua para su curado hasta la fecha de prueba.



Figura 3.27.- Elaboración de briquetas.



Figura 3.28.- Equipo para la elaboración de briquetas.

### **3.6 Elaboración de losas de concreto para realización de pruebas de adherencia.**

Mientras se elaboraban los diferentes especímenes mencionados, también se elaboraron unas pequeñas losas de concreto de  $1\text{m}^2$  por 7 cm de espesor aproximadamente, con el fin colocarles una vez que cumplieran los 28 días un revestimiento de las mezclas de mortero con sus diferentes sustituciones y con la mezcla testigo para realizar sobre estas pruebas de adherencia. Aprovechando el material con el que se cuenta, el concreto se elaboraría con material pétreo de origen volcánico y cemento del tipo CPC 30R RS.

Para elaborar las losas primero se preparó la cimbra, la cual fue hecha de madera de tercera calidad. La elaboración se logró de la siguiente manera: se llenaron en dos capas, la primera fue a una altura de 3.5cm aproximadamente, después de la primera capa, se colocó malla electro soldada a la mitad del espesor de la losa Figura 3.29, esto para aumentar la rigidez y evitar posibles accidentes cuando se descimbraran o se movieran de lugar. Posteriormente se llenó la siguiente capa de concreto hasta alcanzar una altura de aproximadamente 7cm Figura 3.30, a la superficie de la losa no se le dio ningún tipo de acabado (ASTM C 1583, 2004), es decir solo se tuvo el cuidado de que el espesor de la losa fuera uniforme de 7cm aproximadamente.

El concreto para la elaboración de las losas se diseñó para una resistencia ( $f'c$ ) de  $200\text{ kg/cm}^2$ .

Se procedió a curar el concreto, esto durante 28 días. Una vez transcurrido este tiempo las losas fueron descimbradas y se procedió a colocar el revestimiento de mortero previsto.



*Figura 3.29.- Elaboración de la losa con malla electro soldada.*



*Figura 3.30.- Losas para pruebas de adherencia terminadas.*

### **3.7 Elaboración de mezclas para la realización de pruebas de adherencia.**

Para la realización de las pruebas de adherencia (ASTM C 1583, 2004), se elaboraron mezclas de mortero tanto de testigo como con los diferentes porcentajes de sustitución de CBC.

Las losas de concreto sobre las cuales se colocaría el revestimiento se dividieron en 6 partes de aproximadamente 50 cm por 33 cm, donde una vez elaboradas las mezclas de mortero se colocaron sobre la superficie dividida, Figura 3.31, de manera que cada losa de 1m<sup>2</sup> obtuvo 6 mezclas con diferentes

sustituciones de CBC además de una mezcla testigo, para posteriormente realizar la prueba de adherencia correspondiente a la edad especificada.



*Figura 3.31.- Revestimiento de las losas.*

### **3.8 Pruebas no destructivas.**

#### **3.8.1 Resistividad Eléctrica.**

Las propiedades eléctricas en baja y media frecuencia (hasta el orden del MHz) reflejan el movimiento de iones en la solución de los poros y, por tanto, son función de la geometría de la porosidad. La resistividad eléctrica en corriente continua de un material poroso es proporcional a la movilidad de los iones en la porosidad conectada. El factor de formación y la difusión de los iones en el medio poroso se pueden calcular a partir de la resistividad del material y la resistividad de la solución del poro (Snyder, 2001). La difusión del ion cloruro es responsable de la degradación de la estructura metálica del concreto armado, la cual tiene importantes consecuencias económicas (Alonso et al., 1998). De acuerdo a Cabeza et al.(2002), la capacidad eléctrica del material está relacionada con la geometría de la porosidad bloqueada (5) y el carácter fractal del poro bloqueado (Ji, Chan, & Feng, 1997).

La resistividad eléctrica es una propiedad de cada material, y corresponde al recíproco de su conductividad. Depende en gran proporción del grado de saturación de los poros del mortero y en menor grado, de la hidratación de la pasta y de la presencia de sales disueltas en la fase acuosa en función de variables tales como: el tipo de cemento, las adiciones inorgánicas, la relación agua/cemento, la porosidad de la estructura, entre otras. Es una propiedad de cada material, y corresponde al recíproco de su conductividad; su unidad de medida es el ohm-cm u ohm-m.

El uso de las puzolanas en la preparación de morteros es una practica habitual porque mejoran las propiedades mecánicas y aumentan su durabilidad en ambientes con agentes agresivos. Estas mejoras contribuyen a dos procesos: a) la formacion de productos hidratados adicionales debido a la reacción de la puzolana con la del hidroxido cálcico derivado de la hidratación del cemento y b) la reducción de la permeabilidad por el efecto de llenado de los poros con los productos formados en la reacción puzolanica (Malhotra & Mehta, 1996). Estos efectos deberían reflejarse en las propiedades eléctricas.

En cuanto a los criterios de evaluación, no existe un acuerdo de carácter general entre los diferentes investigadores acerca del nivel límite de resistividad eléctrica por encima del cual el riesgo de corrosión de las armaduras puede ser considerado despreciable. Sin embargo, la práctica ha demostrado que se puede utilizar como criterio general los datos que se muestran en la Tabla 3-14.

Debe tenerse en cuenta que la resistividad es sólo uno de los parámetros que evalúa la velocidad de corrosión del acero de refuerzo en el mortero, por tanto, no podrá considerarse como único criterio para definir o prever un posible daño sobre la estructura.

*Tabla 3-14.- Criterios de evaluación en resistencia eléctrica*

<b>Intervalo</b>	<b>Criterio</b>
$\rho > 200 \text{ k}\Omega\text{-cm}$	Poco riesgo
$200 > \rho > 10 \text{ k}\Omega\text{-cm}$	Riesgo moderado



10 < 10 kΩ-cm	Alto riesgo
---------------	-------------

(Durar, 1997)

La resistividad eléctrica fue la primera prueba no destructiva realizada a los especímenes cúbicos, cilíndricos y prismáticos, los especímenes se extraían del área de curado y se cubrían con una franela húmeda para evitar la pérdida de humedad. Las mediciones correspondientes a esta prueba se realizaron con un equipo “Resistómetro” que mide resistividad eléctrica en suelos y materiales porosos, marca Nilsson (ver Figura 3.32).



Figura 3.32.- Resistómetro Nilsson.

El procedimiento seguido se resume a continuación:

1. Determinaron las dimensiones de la muestra.
2. Se revisa la conexión de las terminales de corriente y voltaje.
3. Se monta la muestra en el equipo Nilsson.

4. Se colocan las caras laterales del espécimen a realizarle la prueba entre dos placas de cobre y entre éstas esponjas húmedas Figura 3.33.
5. Mediante la fuente y a través de las placas metálicas adosadas a las caras laterales del espécimen, se somete el espécimen a una corriente dada, (I) y voltaje (E).
6. La resistencia eléctrica (R) se calcula como E/I y se expresa en Ohmios (Lo hace el equipo automáticamente) Figura 3.34.

De esta manera la resistividad eléctrica está dada por la ecuación:

$$\rho = R_e \left( \frac{A}{L} \right)$$

*Dónde:*

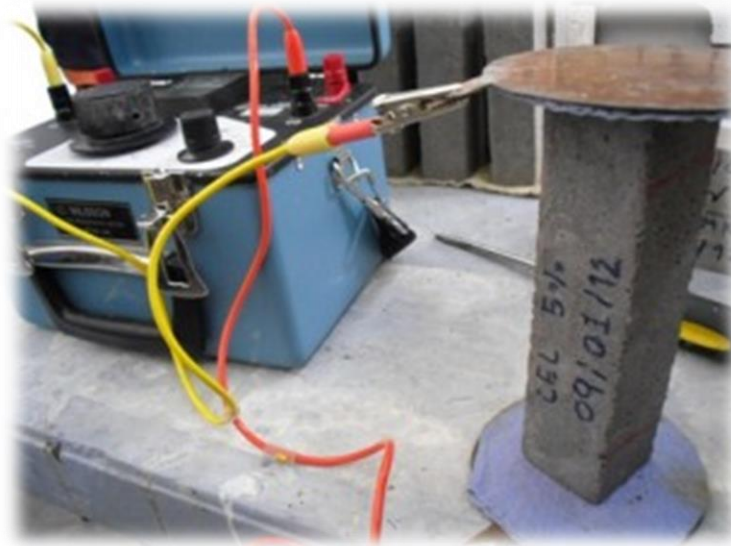
$\rho$  = Resistividad eléctrica en K $\Omega$ -cm (ohm-m)

$R_e$  = Resistencia eléctrica que el equipo proporciona, en K $\Omega$

$A$  = Área transversal del espécimen en cm<sup>2</sup>

$L$  = Longitud del espécimen en cm





*Figura 3.33.- Colocación del espécimen para prueba de resistividad.*



*Figura 3.34.- Uso del Resistómetro.*

Cabe mencionar que esta prueba se realizó al total de especímenes (cubos y prismas) que se tenían el día de la prueba, es decir para cubos y prismas a edades de 14, 28, 45, 90 y 180 días.

### 3.8.2 Velocidad de pulso ultrasónico.

La velocidad de pulso ultrasónico se define como la relación que existe entre la distancia de viaje, a través del mortero, de una onda ultrasónica y el tiempo que tarda en recorrerla. Un impulso eléctrico generado por una unidad central se transmite a un emisor que excita un bloque de cristales. El emisor a través del bloque emite un pulso ultrasónico que viaja a través del mortero, hasta que es detectado por el receptor. Aquí, el pulso ultrasónico se convierte en un impulso eléctrico el cual se registra en un osciloscopio.

Los criterios de evaluación para esta prueba son los descritos en el manual de la Red DURAR (1997), y que se muestran a continuación en la Tabla 3-15.

Tabla 3-15.- Criterios de evaluación en pulso ultrasónico

Velocidad de propagación	Calidad del mortero
< 2000 m/s	Deficiente
2001 a 3000 m/s	Normal
3001 a 4000 m/s	Alta
> 4000 m/s	Durable

Los especímenes empleados para determinar lecturas de resistividad eléctrica eran pasados en seguida a una mesa contigua en donde se la determinaba el tiempo de tránsito de pulso ultrasónico (ASTM C 597-02).

El equipo empleado para esta prueba fue una máquina dual para ensayos ultrasónicos y por rebote, con introducción automática de los resultados del esclerómetro, modelo 58-E0049/B, marca CONTROLS, medidor de velocidad de pulsos ultrasónicos, (ver Figura 3.35); con una escala de frecuencia de 24 a 150kHz; impedancia de entrada del receptor de 1M; salida RS 232; cuenta con la posibilidad de conectar un osciloscopio; con una medición del tiempo de propagación de 0.1 a 1 999.9 $\mu$ s; velocidad de los impulsos con una selección de 1 a 10 por segundo; precisión 1 $\mu$ s; salida del

transmisor hasta 1500V; funciona con baterías recargables internas; incluye un esclerómetro para ensayos en concreto con una energía de impacto de 2.207NM.

El equipo tiene dos transductores, un emisor y un receptor, estos transductores tienen que tener un buen contacto con la superficie a probar y para tal fin se emplea un medio conductor o gel. Este gel es proporcionado por el fabricante del equipo, sin embargo, se hicieron mediciones empleado un gel antibacterial, haciendo comparaciones de las lecturas obtenidas con ambos geles y las diferencias fueron mínimas, fue entonces que se decidió el empleo del gel antibacterial para la toma de mediciones de velocidad de pulso. Se buscó el empleo de otro gel debido a que el que proporciona el fabricante es insuficiente para realizar la cantidad de mediciones planeadas tomar, y los tiempos de adquisición de este gel son prolongados Figura 3.36.

Durante la realización de la prueba se tomó la precaución de mantener constantemente húmedos los especímenes y evitar así variantes en las lecturas.

El grado de saturación del espécimen afecta a la velocidad de pulso, y este factor debe tenerse en cuenta al evaluar los resultados del ensayo. Además, la velocidad de pulso en el espécimen saturado es menos sensible a los cambios en su calidad relativa.



Figura 3.35.- Equipo para medir la velocidad de pulso ultrasónico, CONTROLS.



*Figura 3.36.- Prueba con el equipo CONTROLS.*

### **3.9 Pruebas destructivas.**

Terminadas las lecturas con los equipos de pruebas no destructivas se reservaron los especímenes programados para las pruebas destructivas.

Las pruebas destructivas se realizaron poco después de terminar con las pruebas no destructivas, siempre se tuvo la precaución de mantener las muestras húmedas, sumergidas en agua.

#### **3.9.1 Determinación de la resistencia a la compresión simple de cubos de mortero.**

Como ya se mencionó, en la prueba de resistividad se tomaron las dimensiones de cada espécimen cúbico, la prueba de compresión se realizó utilizando la Máquina Universal Tinius Olsen. Se colocó el espécimen entre la platina de prueba y la base de la maquina aplicando la carga a una velocidad constante en el rango de 5000kg (ver Figura 3.37), dicho rango tiene una aproximación a 0.5kg, la velocidad se mantiene constante toda la prueba hasta la falla del espécimen cúbico, registrando la carga de falla para posteriormente calcular el esfuerzo a compresión del espécimen (ASTM C 109M, 2002).

Se prueban 3 cubos por cada sustitución de CBC a compresión Figura 10.1 a las edades de 14, 28, 45, 90, 180 días. Con los valores obtenidos se saca un promedio para determinar la resistencia a compresión de dicha mezcla. Cabe aclarar que de la misma forma se probaron los especímenes testigo (3 por edad).

Para determinar la resistencia a compresión se usó:

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

Dónde:

$\sigma$  = Esfuerzo a compresión, MPa.

$P$  = Carga, N.

$A$  = Área transversal del cilindro, mm<sup>2</sup>.



Figura 3.37.- Colocación y prueba del espécimen cúbico para prueba de compresión.

### 3.9.2 Determinación de la resistencia a la flexión.

Esta prueba se realiza a los especímenes prismáticos de 4cm x 4cm x 16cm (ASTM C 348 – 02). Se probaron tres muestras por sustitución de CBC y testigo en cada fecha establecida, el procedimiento seguido se describe a continuación:

1. Se marcó el prisma a 1" de sus extremos, también se marca con una línea al centro del claro del prisma, la cual deberá ser donde se aplique la carga.
2. Se montó en los soportes adecuados para esta prueba y se aplica carga sin impacto y a una velocidad constante (ASTM C 293, 2002) Figura 3.38.
3. Se registró la carga de falla y la ubicación de la misma, ya que la ecuación para el Módulo de Ruptura es diferente si la falla se da en el tercio medio marcado o fuera de él.

Los cálculos se realizaron con el empleo de la siguiente ecuación:

$$Sf = 0.0028P$$

Dónde:

Sf=Esfuerzo de flexión, MPa

P= Carga máxima, N.





*Figura 3.38.- Prueba a flexión en primas.*

### **3.9.3 Determinación de la resistencia a la tensión.**

La determinación de la resistencia a tensión realizada en briquetas, se efectuó en la Máquina de Prueba para Tensión en Morteros tipo Michaelis.

El procedimiento seguido se describe a continuación:

1. Se sacaron de la pila de curado las muestras a probar a la edad correspondiente.
2. Se tomaron las medidas de la sección media ( $S_m$ ) de la biqueta.
3. Se colocó la biqueta en la maquina la cual debe quedar perfectamente nivelada.
4. Se aplicó la carga lenta y constantemente por medio de las municiones hasta la falla de la muestra, Figura 3.39.
5. Después de la falla de la muestra se retiraron la municiones pesándolas al décimo de gramo, el peso de las municiones ( $P_m$ ) fue considerado como la carga que soporto la sección media de la biqueta.

En los cálculos para determinar la resistencia a tensión se usó la siguiente ecuación:

$$R = Pm \frac{x50}{sm}$$

Donde:

R = resistencia a la tensión, en MPa

Pm = peso de las municiones o carga de ruptura, en kg.

Sm = sección media de la briqueta en cm<sup>2</sup>.

50 = constante de la máquina.



Figura 3.39.- Tensión en briquetas, máquina Michellis.

### 3.10 Pruebas de adherencia.

Una vez que obtuvo la edad correspondiente para realizar las pruebas de adherencia, se comienza por hacer una perforación en la superficie del revestimiento lo cual se observa en la Figura 3.40, esta se hizo mediante la ayuda de un esmeril angular portátil marca Black & Decker con una potencia de 750w y 11000rpm adicionada de una broca circular con punta de diamante de



50mm de diámetro, la perforación se hizo a un cm por debajo del sustrato de concreto.

Se realizaron las perforaciones a las mezclas correspondientes se procedió a pegar los discos de acero inoxidable, esto se ilustra en la Figura 3.41 los cuales sirvieron para realizar dicha prueba, los discos se adhirieron al revestimiento mediante un epóxico, el epóxico utilizado es marca Sikadur-31 Hi-Mod Gel, se dejó secar el epóxico aproximadamente 3 o 4 horas.



*Figura 3.40.- Perforación de losas para pruebas de revestimiento.*



*Figura 3.41.- Colocación de pegamento a discos de acero*

Una vez que el epóxico estuvo seco se procedió a realizar la prueba de adherencia, esto se observa en la Figura 3.42, la cual consistió en insertar el perno con cabeza cilíndrica en el disco de metal pegado a la superficie de la muestra, después se colocó el instrumento de medición de carga en el perno con cabeza de pelota para después apretar ligeramente hasta sentir una ligera tensión, se comenzó a aplicarle carga lenta y constante en el rango que indica la norma, hasta que se obtuvo la falla de la muestra (ASTM C 1583, 2004), es decir hasta que hubo desprendimiento del revestimiento o sustrato de concreto, posteriormente se tomó la lectura de carga necesaria para desprender el revestimiento y se registró como carga de ruptura, también se observó y registro el tipo de falla, es decir si la falla ocurrió en el sustrato, en la línea de unión entre el sustrato y el revestimiento o en el revestimiento de mortero.



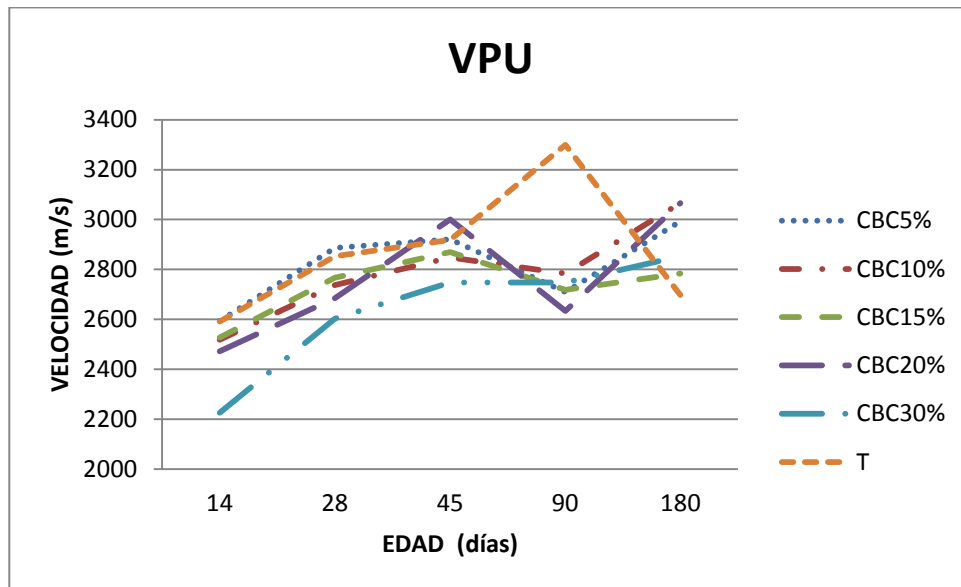
*Figura 3.42.- Realización de las pruebas de adherencia.*

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

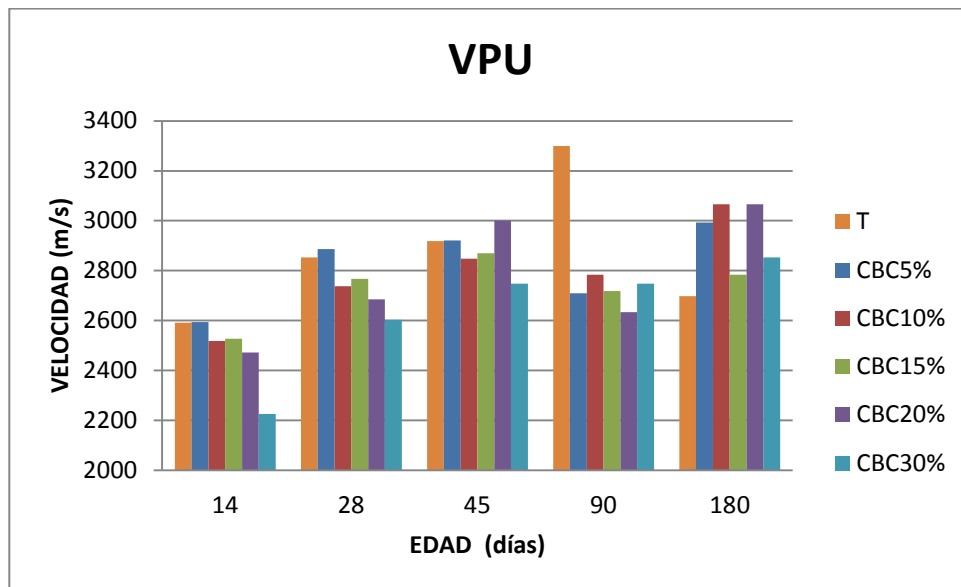
A continuación se presentan los resultados de las pruebas realizadas en la investigación. Para cada prueba realizada se muestran dos gráficas, con la intención de mostrar comparativamente los resultados entre el testigo y las diferentes sustituciones.

##### 4.1 Pruebas No Destructivas.

##### 4.1.1 Resultados Velocidad de Pulso Ultrasónico.



Gráfica 4-1a.- Resultado de Velocidad de Pulso Ultrasónico.



Gráfica 4-1b.- Resultado de Velocidad de Pulso Ultrasónico.

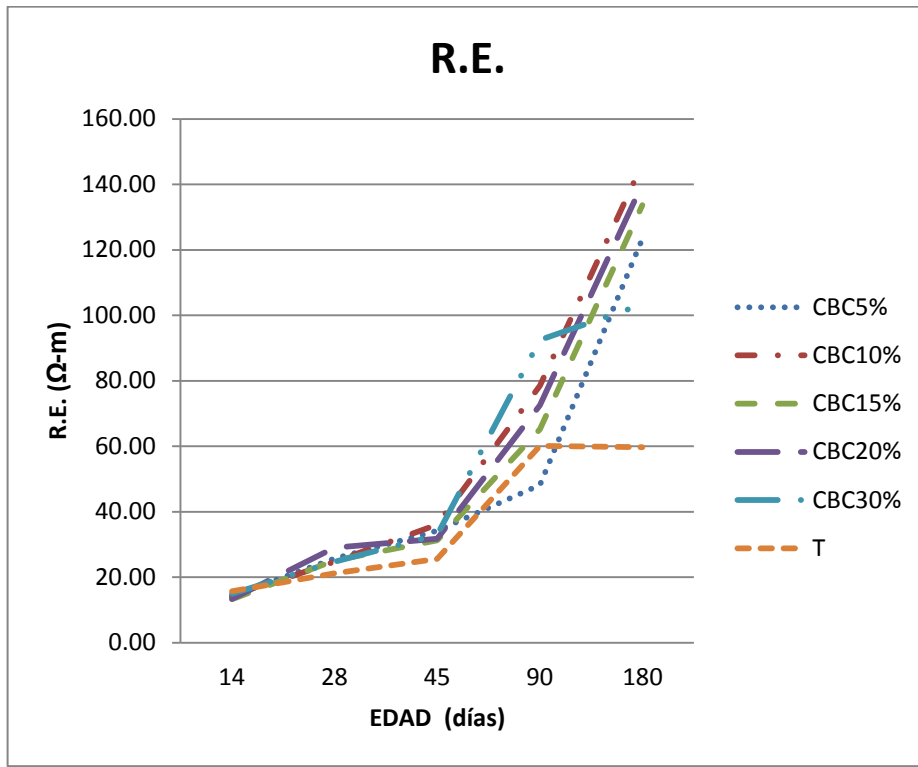
La gráfica 4-1a y 4-1b muestra los resultados de la prueba de VPU, la cual deja ver que hasta la edad de 180 días los resultados se encuentran parejos, resaltando el resultado obtenido a los 90 días por parte del testigo el cual muestra una discrepancia con respecto a los resultados de las edades anteriores y posterior.

Un panorama general de los resultados de VPU muestra datos que se encuentran entre 2400 con una aproximación a los 3000 m/s que de acuerdo a la Tabla 3-15 antes proporcionada ubica la calidad del mortero en **alta y normal**. Presentando los valores más altos las sustituciones de **20%, 10% y 5%**.

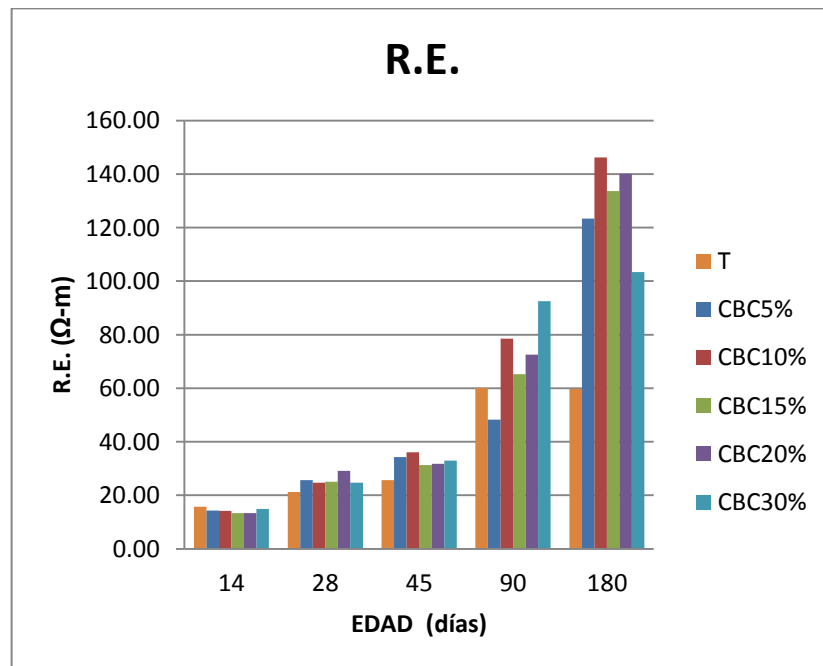
Tabla 3-15.- Criterios de evaluación en pulso ultrasónico

Velocidad de propagación	Calidad del mortero
< 2000 m/s	Deficiente
2001 a 3000 m/s	Normal
3001 a 4000 m/s	Alta
> 4000 m/s	Durable

4.1.2 Resultados Resistividad Eléctrica.



Gráfica 4-2a.- Resultado de Resistividad Eléctrica.

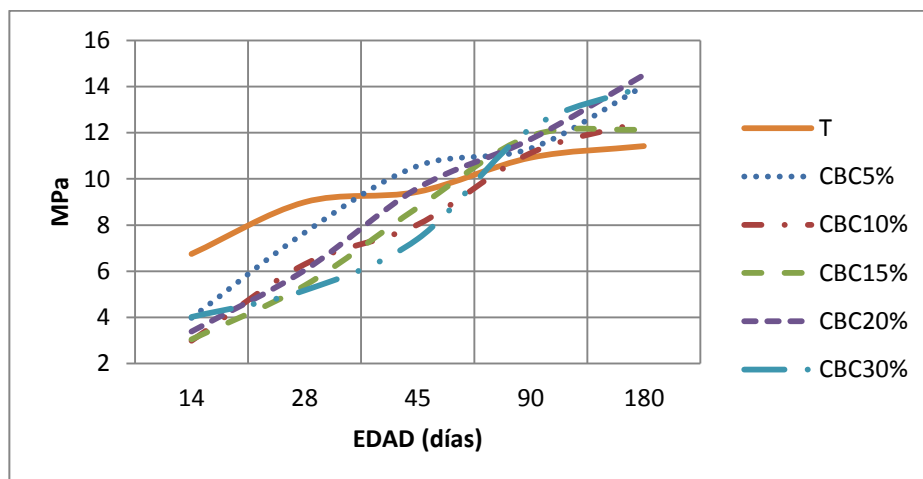


Gráfica 4-2b.- Resultado de Resistividad Eléctrica.

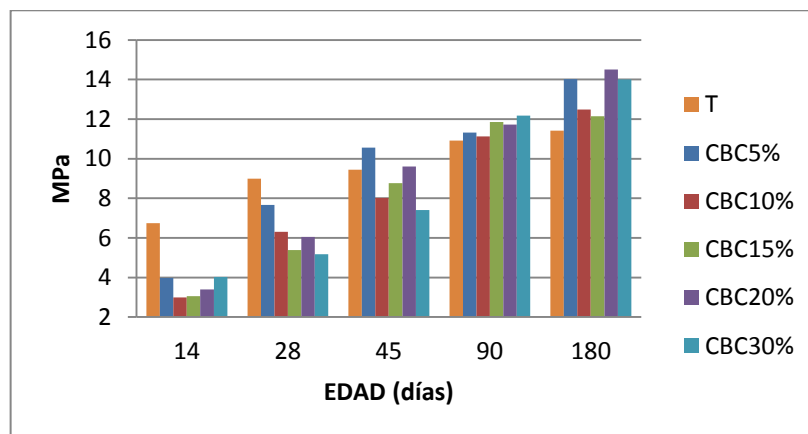
Como ya se mencionó la resistividad eléctrica es una propiedad de cada material, y corresponde al recíproco de su conductividad, por lo que entre mayor valor se obtenga en las pruebas de resistividad eléctrica se puede inferir una mezcla con una menor cantidad de poros lo que favorece al mortero para impedir afectaciones por agentes externos. Los mejores resultados son las mezclas con sustituciones de **10%, 20%, 15% y 5%**.

## 4.2 Pruebas Destructivas.

### 4.2.1 Resultados Compresión.



Gráfica 4-3a.- Resultado de Compresión Simple.



Gráfica 4-3b.- Resultado de Compresión Simple.

La grafica 4-3a permite apreciar como todos los especímenes que contienen alguna sustitución de CBC se encuentran por arriba en cuanto a resistencia de compresión con respecto del testigo, sobresaliendo las sustituciones de **20%, 5% y 30%**.

De acuerdo al RCDF el mortero debe presentar las siguientes características de acuerdo a su empleo:

Mortero para pegar piezas.- Los morteros que se empleen en elementos estructurales de mampostería deberán cumplir con los requisitos siguientes:

- a) Su resistencia a compresión será por lo menos 4 MPa.
- b) Siempre deberán contener cemento en la cantidad mínima indicada en la tabla 2.2.
- c) La relación volumétrica entre la arena y la suma de cementantes se encontrará entre 2.25 y 3. El volumen de arena se medirá en estado suelto.
- d) Se empleará la mínima cantidad de agua que de como resultado un mortero fácilmente trabajable.

Si el mortero incluye cemento de albañilería, la cantidad máxima de éste, a usar en combinación con cemento, será la indicada en la tabla 2.2.

Tabla 4-1.- Proporcionamientos, en volumen, recomendados para mortero en elementos estructurales.

Tipo de mortero	Partes de cemento hidráulico	Partes de cemento de albañilería	Partes de cal hidratada	Partes de arena <sup>1</sup>	Resistencia nominal en compresión, $f_j^*$ , MPa (kg/cm <sup>2</sup> )
I	1	—	0 a 1/4	No menos de 2.25 ni más de 3 veces la suma de cementantes en volumen	12.5 (125)
	1	0 a 1/2	—		
II	1	—	1/4 a 1/2		7.5 (75)
	1	1/2 a 1	—		
III	1	—	1/2 a 1 1/4		4.0 (40)

<sup>1</sup> El volumen de arena se medirá en estado suelto.



Morteros y concretos de relleno.- Los morteros y concretos de relleno que se emplean en elementos estructurales de mampostería para rellenar celdas de piezas huecas deberán cumplir con los siguientes requisitos.

- a) Su resistencia a compresión será por lo menos de 12.5 MPa.
- b) El TMA no excederá de 10 mm.
- c) Se empleará la mínima cantidad de agua que permita que la mezcla sea lo suficientemente fluida para rellenar las celdas y cubrir completamente las barras de refuerzo vertical, en el caso que se cuente con refuerzo interior. Se aceptará el uso de aditivos que mejoren la trabajabilidad.

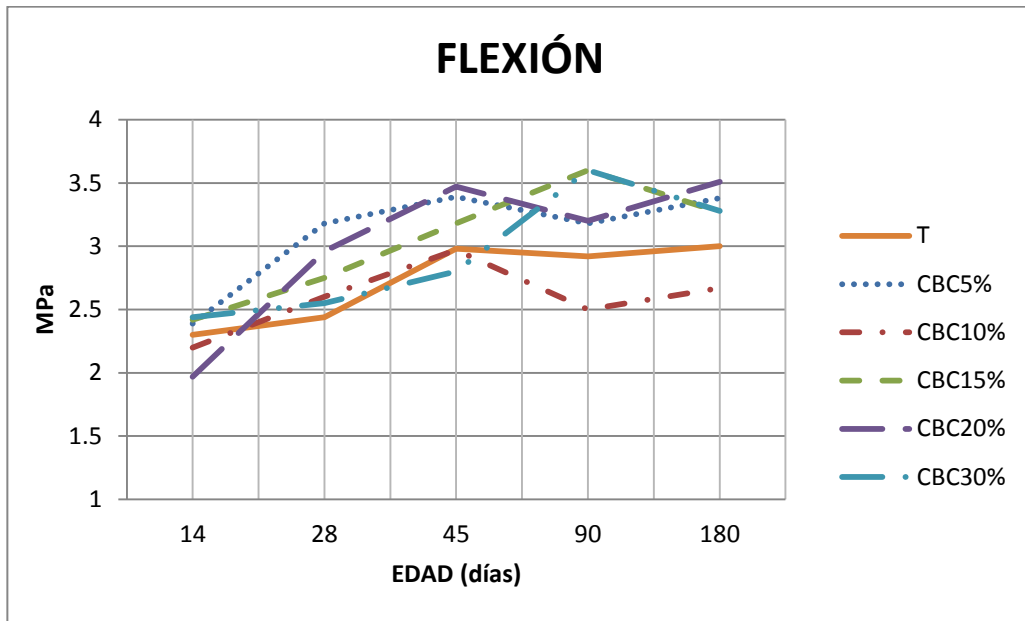
En la tabla 4-2 se muestran las relaciones volumétricas recomendadas entre los distintos componentes.

*Tabla 4-2.- Proporcionamientos, en volumen, recomendados para morteros y concretos de relleno de elementos estructurales.*

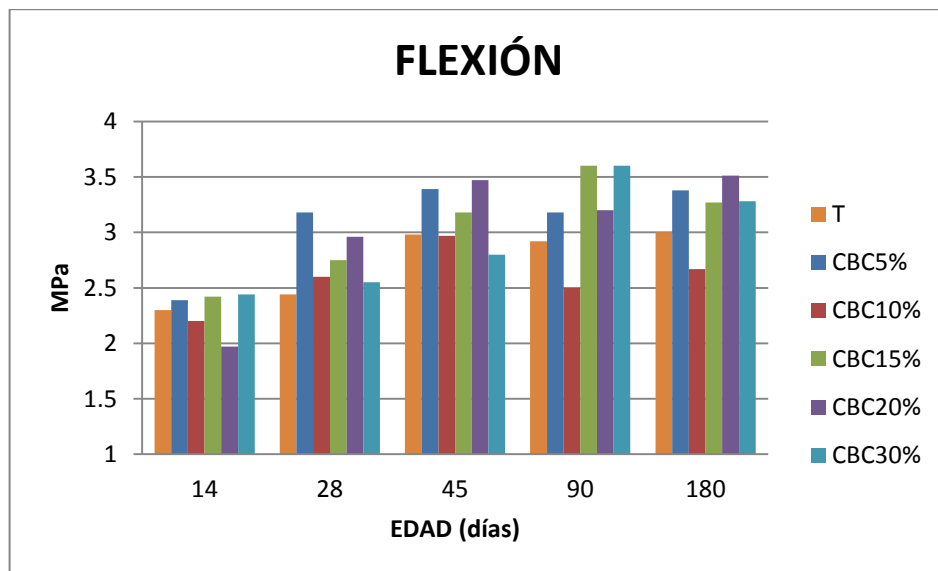
Tipo	Partes de cemento hidráulico	Partes de cal hidratada	Partes de arena <sup>1</sup>	Partes de grava
Mortero	1	0 a 0.25	2.25 a 3	—
Concreto	1	0 a 0.1	2.25 a 3	1 a 2

<sup>1</sup> El volumen de arena se medirá en estado suelto.

4.2.2 Resultados Flexión.

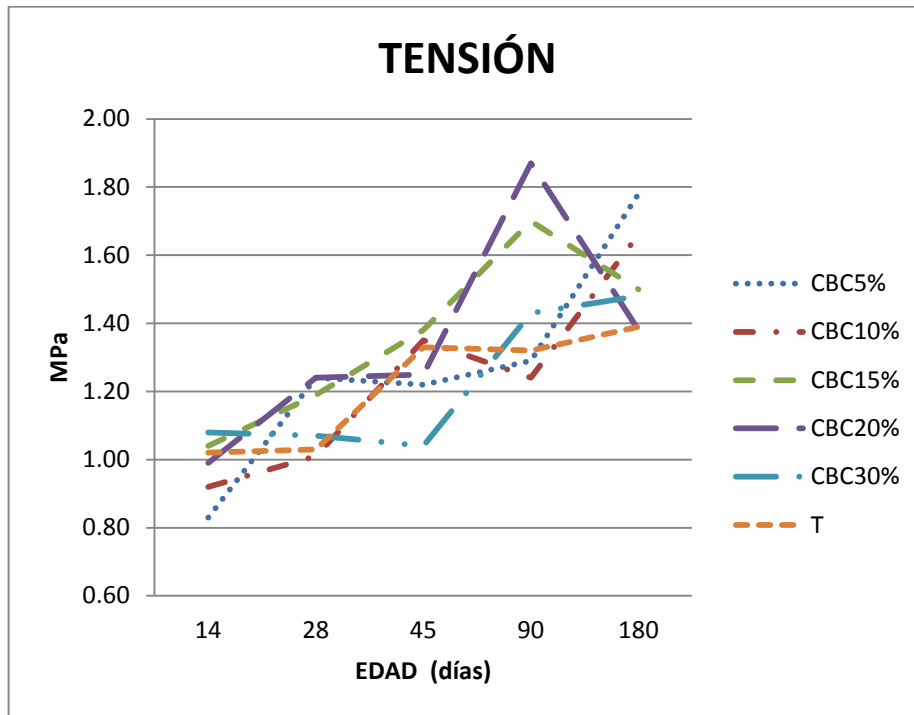


Gráfica 4-4a.- Resultado de Flexión.

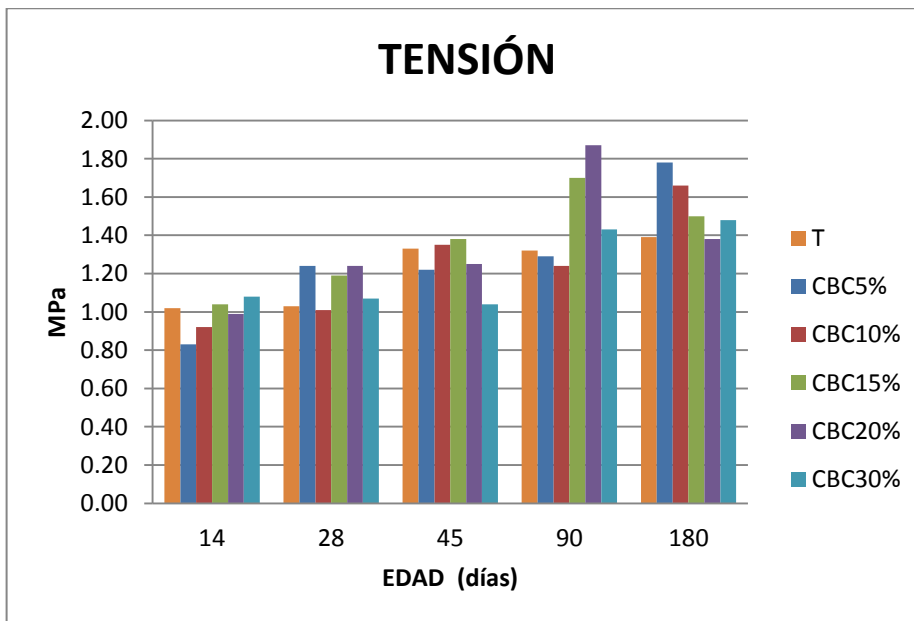


Gráfica 4-4b.- Resultado de Flexión.

4.2.3 Resultados Tensión.

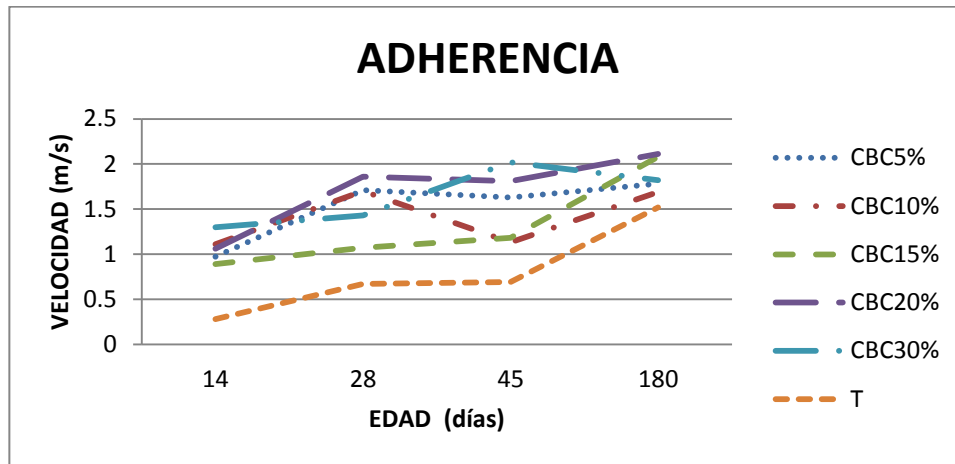


Gráfica 4-5a.- Resultado de Resistencia a Esfuerzo de Tensión.

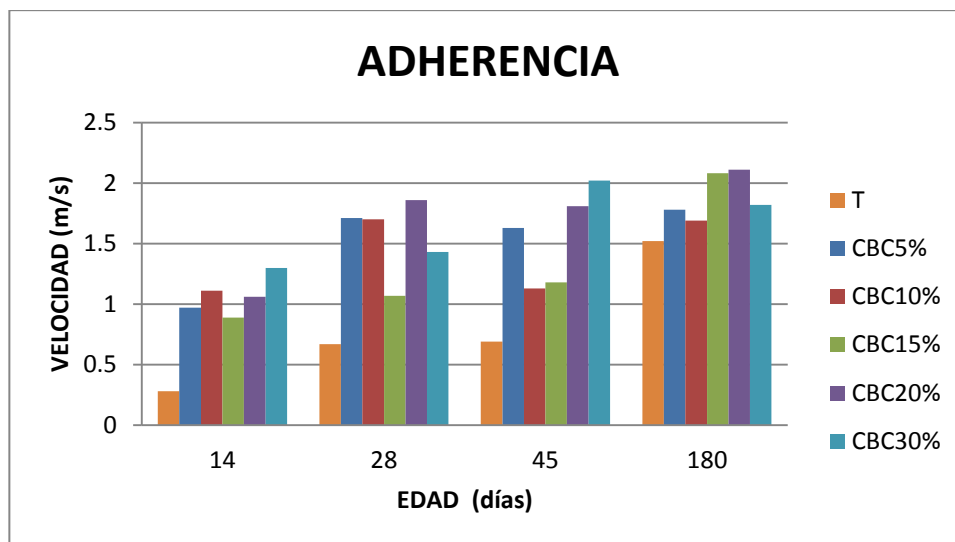


Gráfica 4-5b.- Resultado de Resistencia a Esfuerzo de Tensión.

4.2 Pruebas de Adherencia.



Gráfica 4-6a.- Resultado de Resistencia a Esfuerzo de Adherencia.



Gráfica 4-6b.- Resultado de Resistencia a Esfuerzo de Adherencia.

Las gráficas 4-6a y 4-6b ilustran el aporte en cuanto a adherencia a un estrato de concreto por parte de las mezclas que contienen CBC, el cual es uno de los puntos que se pretendía aumentar en el presente trabajo. Resaltando las mezclas con sustituciones de **20%, 15%, 5% y 30%**.

## 5. CONCLUSIÓN

La utilización de residuos orgánicos en la industria de la construcción es un tema que toma gran relevancia desde años recientes, la inclusión de cenizas en pastas de cemento como sustitución y adición ha despertado el interés por parte de la sociedad de investigadores interesados en el tema, poniendo manos a la obra para y así demostrar cómo es posible obtener ventajas adicionales a las provistas por cemento.

Podría argumentarse que una sustitución con un bajo porcentaje pareciera insignificante en cuanto a cantidad de uso de residuo, sin embargo no hay que olvidar que el cemento es el principal elemento en la industria de la construcción y que es difícil hablar de una construcción carente de este elemento, lo que se traduce en miles de millones de toneladas utilizadas anualmente a nivel mundial. Si se hablara en cuestión de números y a forma de ejemplificación: la empresa Cemex catalogada la tercer empresa a nivel mundial, en lo que a ventas de cemento se refiere, produce un aproximado de 77 millones de toneladas anuales de cemento y sí de esta producción sólo el 10 por ciento fuera (7 millones de toneladas) usado para producir un “cemento ecológico” con una sustitución del 10 por ciento en peso por alguna ceniza, estaríamos hablando de que 700 mil toneladas anuales de cenizas de residuos orgánicos podrían estar ocupando un lugar en las construcciones en lugar de tomar el lugar de áreas de vegetación.

Aunque el tema primordial de esta investigación no abarca parámetros ambientales, se quiere hacer mención que se atacaría de manera directa un problema que es de interés y de cierta forma popular en estos tiempos donde el aspecto de protección al medio ambiente se encuentra fuertemente observado por las autoridades de cualquier país. Además pudiendo entrar en discusión se podría hablar de la elaboración de un producto con cierta denominación de ecológico al usar un producto de desperdicio para la elaboración de un nuevo producto, el cual atacaría dos puntos; la disminución de producción de cemento, y la disminución en el volumen de material depositado en el suelo.

En cuanto a los resultados de las pruebas realizadas y habiendo hecho el análisis y comparativo entre los diferentes porcentajes y el testigo, se puede asumir un mejoramiento en las propiedades mecánicas. Y de acuerdo a lo establecido por el RCDF el mortero elaborado puede ser utilizado como material para pegar piezas, mientras que los resultados obtenidos ponen en discusión y a criterio del constructor el uso del mortero como material de relleno, al no alcanzar los 12.5 MPa de resistencia a compresión a la edad de 28 días establecidos por el Reglamento, obteniendo esta resistencia a edades de 90 o más días.

Por otro lado de acuerdo a los resultados el material presenta buen comportamiento en la prueba de adherencia lo que lo sitúa como un material con posibilidades de fungir como revestimiento, en este caso la prueba se realizó sobre un estrato de concreto.

Con lo anterior la Ceniza de Bagazo de Caña del Ingenio “Lázaro Cárdenas” presenta los argumentos para continuar con futuras investigaciones y de esta forma dar un dictamen final que asegure un efecto puzolánico en las mezclas de mortero.

## BIBLIOGRAFÍA

- Aguila, I. (2001). Cementos puzolánicos, una alternativa para Venezuela. *Tecnología y Construcción*. IDEC-FAUUCV, Caracas, 17-III; 27-34.
- Alonso, C., Andrade, C., Izquierdo, M., Novoa, X. R., & Perez, M. C. (1998). Effect of protective oxide scales in the macrogalvanic behaviour of concret reinforcements. . *Corros. Sci. vol. 40, n° 8*, 1379-1389.
- Arreola, M. (2013). ACTIVIDAD PUZOLÁNICA DE MATERIALES (SUSTITUTOS PARCIALES DEL CEMENTO), PARA MEJORAR LA DURABILIDAD DE MORTEROS PARA REPARACIÓN Y/O CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO. *Tesis de Maestria, Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo, Michoacán México*.
- ASTM C 109M, I. (2002). *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)*1. Estados Unidos.
- ASTM C 1583. (2004). *Standard Test Method for Tensile Strength of Concrete Surfaces and the Bond Strength or Tensile Strength of Concrete Repair and Overlay Materials by Direct Tension (Pull-off Method)*. Estados unidos.
- ASTM C 293. (2002). *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading)*. Estados Unidos.
- ASTM C 511. (2004). *Standard Specification for Mixing Rooms, Moist Cabinets, Moist Rooms, and Water Storage Tanks Used in the Testing of Hydraulic Cements and Concretes*. estados unidos.
- ASTM C 91. (1995). *Standard Specification for Masonry Cement*. Estados Unidos.
- Ayers, M. E., & Khan, M. S. (1993). Overview of Fly Ash and Silica Fume Concretes: The Need of Rational Curing Standars, in *Proceedingd ofV. MOhan Malhotra Symposium. 1993: American Concrete Institute*.

- Berry, E. E., Hemmings, R. T., Zhang, M. H., Cornelius, B. J., & Golden, D. M. (1994). Hydration in High-Volume Fly Ash Concrete Binders. *ACI Material Journal*. 1994. 91(4):. 382-389.
- Cabeza, M., Merino, P., Miranda, A., Novoa, X. R., & Sanchez, I. (2002). Impedance spectroscopy study of hardened Portland cement paste. *Cem. Concr. Res.*, vol 32, n°6 (2002), pp. 881-891. doi:10.1016/S0008-8846(02)00720-2.
- Diamond, S. (2000). Studies on Hydration in High-Volume Fly Ash Concrete Binders. *ACI Material Journal*, 1999. 96(6):. 251-257.
- Hammond, A. (1983). Pozzolana cements for low cost housing. Appropriate Building Materials for low cost housing, Proceedings of a Symposium, CIB, RILEM. Nairobi, 73-83.
- Ji, X., Chan, S., & Feng, N. (1997). Fractal model for simulating the space-filling process of cement hydrates and fractal dimensions of pore structure of cement-based materials. *Cem. Concr. Res.*, vol. 27, n° 11, pp. 1691-1699. doi:10.1016/S0008-8846(97)00157-9.
- Jiang, L., Lin, B., & Cai, Y. (1999). Studies on Hydration in High-Volume Fly Ash Concrete Binders. *ACI Material Journal*, 1999. 96(6):. 703-706.
- Lea, F. M. (1971). *The Chemistry of Cement and Concrete*, Chemical Publishing. Inc. 414-453.
- Malhotra, V. M., & Mehta, P. K. (1996). *Pozzolanic and cementitious materials*. Ottawa: Gordon and Brach Publishers.
- Malhotra, V. M., & Mehta, P. K. (2005). High-Performance, High-Volume Fly Ash Concrete: Material, Mixture Proportions, Properties, Construction Practice, and Case Histories. 2nd ed. 2005. *Ottawa: Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development Inc.*
- Martirena, J. F. (2003). Una alternativa ambientalmente compatible para disminuir el consumo de aglomerantes de clínker de cemento Portland: El aglomerante calpuzolana como adición mineral activa. Resumen de la



Tesis. p 65. *Disponible en: <http://www.ecohabitar.org/> (tomado 12-04-2013).*

Martirena, J. F., Middendorff, B., Budelmann, H., & Gehrke, M. (1997). Estudio de la reacción de hidratación de aglomerantes de cal puzolana fabricados en base a desechos de la industria azucarera. *Informe resultado de trabajo de investigación. UCLV, Santa Clara.*, p. 20.

Mather , B. (1958). The Partial Replacement of Portland Cement in Concrete. *Cement and Concrete, STP-205, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pa.*, 37-73.

Meddah, M. S., & Tagnit-Hamou, A. (2009). Pore Structure of Concrete with Mineral Admixtures and Its Effect on Self-Desiccation Shrinkage. *ACI Material Journal*, 241-250.

Mehta, P. K. (1987). Natural Puzzolans: Supplementary Cementing Materials for Concrete. *CANMENT-SP-86-8E, Canadian Government Publishing Center, Supply and Services, Ottawa, Canada, K1A0S9.*

Mehta, P. K. (1992). A Unique Supplementary Cementing Material, CANMET, Proceedings of the International Symposium on Advances in Concrete Technology, Athens, Grece, V.M. Malhotra, ed. May. pp 531-541.

Morales , E. V., Villar-Cociña, E., Frías, M., Santos , S. F., & Savastano , J. R. (2007). Actividad Puzolánica y aspectos microestructurales de las cenizas de bagazo y paja de caña de azucar a través de la microscopia electronica de transmisión. *In: Conferência Brasileira sobre materiais e tecnologias não convencionais na construcao ecológica e sustentavel. BRASIL NOCMAT.*

Newman, J., & Choo, B. S. (2003). "Advanced Concrete Technology Constituent Materials", First published, Butterworth-Heinemann, imprint of Elsevier, (2003). ISBN 0 7506 5103 2.

- Philleo, R. E. (1986). Freezing and Thawing Resistance of High-Strength Concrete. *NCHRP Synthesis of Highway Practice 129: TRB, National Research Council, Washington D.C.*
- Shetty, M. S. (2008). Concrete Techonology: Theory and practice. S. Chand & Company Ltd. New Delhi, India.
- Snyder, K. A. (2001). The relationship between the formation factor and the diffusion coefficient of porous materials saturated with concentrated electrolytes: theoretical and experimental considerations. *Concr. Sci. Eng., vol. 3, n° 12, 216-224.*
- Stanton , T. E. (1950). Use of Pozzolans for Conteracting Excessive Concrete Expansion Resulting from Reaction Between Aggregates and Alkaes in Cement. *Symposium on Use of Pozzolanic Materials in Mortars and Concrete STP No. 99, American Society for Testing and Materials Materials, West Conshohocken, Pa., 178-201.*
- Visvesvaraya, H. C. (1986). Recycling of agricultural wastes with special emphasis on Rice Husk Ash. Use of vegetable plants and their fibers as building materials, Joint Symposium, RILEM. Bagdad, E1-E22.